



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΑΝΑΠΤΥΣΣΟΝΤΑΣ ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΕΝΙΑΙΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΚΟΣΤΟΥΣ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Διατριβή που υπεβλήθη για τη μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την απόκτηση
Διδακτορικού Διπλώματος

Υπό του

ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΥ Ι. ΑΜΟΙΡΑΛΗ

Χανιά 2008



TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE
DEPARTMENT OF PRODUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT
DIVISION OF PRODUCTION ENGINEERING

**ENERGY SAVINGS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS BY DEVELOPMENT OF
ADVANCED UNIFORM MODELS FOR THE EVALUATION OF TRANSFORMER
MANUFACTURING AND OPERATING COST**

Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of
Doctor of Philosophy

By

ELEFThERIOS I. AMOIRALIS

Greece, Chania 2008

Ελευθέριος Ι. Αμοιραλής (eamir@tee.gr)

© Copyright Πολυτεχνείο Κρήτης. All rights reserved.

Έτος: 2008

Γ' ΚΟΙΝΟΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΣΤΗΡΙΞΗΣ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ



Η υλοποίηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής συγχρηματοδοτείται ως ακολούθως:

- 72% από την Ευρωπαϊκή Ένωση – Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο
- 18% από το Ελληνικό Δημόσιο – Υπουργείο Ανάπτυξης – Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας
- 10% από την εταιρία Σνεντέρ Ελεκτρικ ΑΕ

στο πλαίσιο του Μέτρου 8.3 του Επιχειρησιακού Προγράμματος Ανταγωνιστικότητα – Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης.



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης
Τομέας Συστημάτων Παραγωγής

Εξοικονόμηση Ενέργειας στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας
Αναπτύσσοντας Προηγμένα Ενιαία Μοντέλα Εκτίμησης Κόστους Κατασκευής
και Λειτουργίας Μετασχηματιστών

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΤΟΥ ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΥ Ι. ΑΜΟΙΡΑΛΗ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ Π.Κ.

Επιβλέπων Καθηγητής
Πάυλος Σ. Γεωργιάκης

Συμβουλευτική Επιτροπή
Πάυλος Σ. Γεωργιάκης
Βασίλης Σ. Κουϊκόγλου
Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Η διδακτορική διατριβή εγκρίθηκε από την Επταμελή Εξεταστική Επιτροπή την Πέμπτη 18 Σεπτεμβρίου 2008.

Π. Γεωργιάκης
Επικουρος Καθηγητής Π.Κ.

Β. Κουϊκόγλου
Καθηγητής Π.Κ.

Α. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. Καλαϊτζάκης
Καθηγητής Π.Κ.

Γ. Σταυρακάκης
Καθηγητής Π.Κ.

Γ. Σταυρουλάκης
Καθηγητής Π.Κ.

Ι. Νικολός
Λέκτορας Π.Κ.

Χανιά, 18 Σεπτεμβρίου 2008

Πρόλογος

Όταν φτάνεις στο τέλος ενός μεγάλου στόχου και κοιτάς πίσω μόνο τότε συνειδητοποιείς τη συνολική σου πορεία και τους ανθρώπους που την επηρέασαν. Σε αυτούς θα ήθελα να αναφερθώ σε αυτές τις λίγες γραμμές και να τους ευχαριστήσω θερμά για τη σημαντική βοήθεια που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια αυτής της πορείας.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή κ. Παύλο Γεωργιάκη όχι μόνο επειδή στάθηκε η αφορμή να ασχοληθώ με το χώρο των μετασχηματιστών αλλά γιατί στηρίξε την προσπάθειά μου και συνέβαλε καθοριστικά στην εκπόνηση της διατριβής με τη συνεχή καθοδήγηση και ενθάρρυνσή του.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αντώνη Κλαδά, Καθηγητή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και μέλος της τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής για τη διαρκή υποστήριξή του, τις συμβουλές του και την καθοδήγησή του στη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής και τον κ. Βασίλη Κουϊκόγλου, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης και μέλος της τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, για τις υποδείξεις και τις εύστοχες παρατηρήσεις του σε όλα τα στάδια υλοποίησης της διατριβής.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στα μέλη της επιταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, καθηγητές κκ. Σταυρουλάκη Γιώργο, Καλαϊτζάκη Κώστα, Σταυρακάκη Γιώργο, Νικολό Ιωάννη, οι οποίοι με τίμησαν αποδεχόμενοι να συμμετάσχουν στην εξέταση της διατριβής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κα. Μαρίνα Τσίλη, διδάκτορα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, μηχανικό του ΔΕΣΜΗΕ, για τη σπουδαία συμβολή της, το αμέριστο ενδιαφέρον της, τις συζητήσεις και την ανταλλαγή απόψεων καθόλη τη διάρκεια της παρούσας διατριβής.

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη του Εργαστηρίου Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ηλεκτρονικής του Πολυτεχνείου Κρήτης και τον Διδάκτορα Γιάννη Κατσιγιάννη καθώς επίσης και το Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την άριστη συνεργασία που είχαμε όλο αυτό το χρονικό διάστημα.

Θα ήθελα να εκφράσω ακόμη τις θερμές μου ευχαριστίες στην εταιρία Σνεντέρ Ελεκτρικ ΑΕ. Καθοριστική υπήρξε η συμβολή του κ. Δημήτρη Παπαρήγα, Διευθυντή Βιομηχανικής Λειτουργίας της εταιρίας Σνεντέρ Ελεκτρικ ΑΕ, που με τη στενή συνεργασία και την ηθική και υλική υποστήριξη που παρείχε σε όλες τις φάσεις του έργου κατέστησε δυνατή την επιτυχή περάτωσή του. Επίσης, τον κ. Θανάση Σουφλάρη, Προϊστάμενο Μελετών Μετασχηματιστών της εταιρίας Σνεντέρ Ελεκτρικ ΑΕ, που με τη στενή συνεργασία και καθοδήγησή του συνέβαλε ουσιαστικά στην υλοποίηση της διατριβής. Η παροχή κάθε είδους αναγκαίων τεχνικών πληροφοριών, η ενεργός συμμετοχή του σε κάθε βήμα της έρευνας και η συμπαράσταση σε όλους τους τομείς καθώς και το κλίμα συνεργασίας το οποίο καλλιεργήθηκε σε όλη την πορεία του έργου υπήρξαν καθοριστικοί παράγοντες, για την επιτυχή ολοκλήρωσή του.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ αξίζει στην οικογένεια μου που με την αμέριστη συμπαράστασή τους κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής υπήρξαν η κινητήρια δύναμη. Τους ευχαριστώ για όλες τις θυσίες που έχουν κάνει ώστε να μου δώσουν τη δυνατότητα να ασχοληθώ απερίσπαστος σε κάτι τόσο συναρπαστικό όσο η αναζήτηση της γνώσης.

Σύντομο Βιογραφικό

Ο Ελευθέριος Ι. Αμοιραλής γεννήθηκε στην Αθήνα το 1980. Το 1999 εισήχθη μέσω πανελληνίων εξετάσεων στο τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Το 2004 απέκτησε το Δίπλωμα Μηχανικού Παραγωγής και Διοίκησης (ΜΠΔ) από το Πολυτεχνείο Κρήτης με βαθμό 7.70 (9ος σε σειρά αποφοίτησης) και το 2005 απέκτησε το Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης στο τομέα «Συστήματα Παραγωγής» του τμήματος ΜΠΔ του Πολυτεχνείου Κρήτης με βαθμό 8.79. Από τον Οκτώβριο του 2005 μέχρι και σήμερα είναι υποψήφιος διδάκτωρ του τμήματος ΜΠΔ του Πολυτεχνείου Κρήτης και εκπονεί τη διδακτορική του διατριβή υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή κ. Π. Γεωργιλάκη.

Συμμετείχε στη συγγραφή άρθρων σε επιστημονικά περιοδικά, βιβλία και πρακτικά διεθνών συνεδρίων. Έχει εκπονήσει αρκετές μελέτες και έχει συμμετάσχει σε ερευνητικά προγράμματα. Στα ερευνητικά του ενδιαφέροντα περιλαμβάνονται θέματα σχετικά με τη βέλτιστη σχεδίαση μετασχηματιστών διανομής, την οικονομική αξιολόγηση μετασχηματιστών λαμβάνοντας υπόψη το περιβαλλοντικό κόστος, τη βέλτιστη αεροδυναμική σχεδίαση σε αεροτομές αεροσκαφών, μεθοδολογίες τεχνητής νοημοσύνης και συνδυαστικής βελτιστοποίησης.

Περίληψη

Η διδακτορική διατριβή ασχολείται με τα προβλήματα της βέλτιστης σχεδίασης των μετασχηματιστών, της διαστασιολόγησης και της οικονομικής τους αξιολόγησης. Η επίλυση των παραπάνω προβλημάτων εμπεριέχει σημαντικές δυσκολίες. Για παράδειγμα, το πρόβλημα της βέλτιστης σχεδίασης μετασχηματιστών είναι ένα σύνθετο πρόβλημα μη γραμμικού μικτού ακέραιου προγραμματισμού, για την επιτυχή επίλυση του οποίου εκτός από την υιοθέτηση αποτελεσματικής μεθόδου βελτιστοποίησης απαιτείται και η ενσωμάτωση μοντέλων για τον υπολογισμό των τεχνικών χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή τα οποία θα πρέπει να συνδυάζουν υπολογιστική ταχύτητα και ακρίβεια. Επίσης, η διαστασιολόγηση των μετασχηματιστών, δηλαδή η επιλογή από μία ηλεκτρική εταιρία των ονομαστικών μεγεθών των μετασχηματιστών καθώς και των χρονικών στιγμών (ετών) που θα εγκατασταθούν στο δίκτυο, είναι ένα σύνθετο πρόβλημα συνδυαστικής βελτιστοποίησης με κύριους περιορισμούς την εξυπηρέτηση του φορτίου και τη θερμική αντοχή των μετασχηματιστών. Ακόμη, η οικονομική αξιολόγηση των μετασχηματιστών είναι ένα σύνθετο πρόβλημα κυρίως εξαιτίας της αβεβαιότητας στις τιμές πολλών και σημαντικών παραμέτρων που εμπλέκονται σε αυτή.

Η επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών αποτελεί υποπρόβλημα του προβλήματος της βέλτιστης σχεδίασης μετασχηματιστών. Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής προτείνεται καινοτομική υβριδική τεχνική τεχνητής νοημοσύνης-αριθμητικής μεθόδου για την επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών. Το σημαντικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθόδου είναι ότι ο χρόνος βελτιστοποίησης της σχεδίασης μειώνεται στο μισό, καθώς αποφεύγεται η ανάγκη του κατασκευαστή να εξετάσει για κάθε σχεδίαση μετασχηματιστή ποιο υλικό για την κατασκευή των τυλιγμάτων είναι το οικονομικότερο, ο χαλκός ή το αλουμίνιο.

Επίσης, προτείνεται μεθοδολογία μικτού ακέραιου προγραμματισμού σε συνδυασμό με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για τη βέλτιστη σχεδίαση των μετασχηματιστών. Τα βασικά σημεία υπεροχής της μεθόδου συνίστανται: i) στην επέκταση του χώρου των πιθανών λύσεων μέσω κατάλληλου προσδιορισμού του τρόπου μεταβολής καίριων μεταβλητών σχεδίασης, όπως η διατομή των αγωγών, εξασφαλίζοντας ολικά βέλτιστες σχεδιάσεις, ii) στην ενσωμάτωση αριθμητικών τεχνικών για την επιβεβαίωση της βέλτιστης σχεδίασης.

Μια από τις δημοφιλέστερες μεθοδολογίες οικονομικής αξιολόγησης των μετασχηματιστών είναι η μέθοδος του συνολικού κόστους κατοχής, σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο C57.120 του Ινστιτούτου των ηλεκτρολόγων και ηλεκτρονικών μηχανικών (IEEE). Στο συνολικό κόστος κατοχής συνυπολογίζονται το κόστος αγοράς καθώς και το κόστος των απωλειών του μετασχηματιστή σε όλη τη διάρκεια ζωής του. Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής προτείνεται η επέκταση του διεθνούς προτύπου C57.120 του IEEE, εισάγοντας το περιβαλλοντικό κόστος στη μέθοδο του συνολικού κόστους κατοχής.

Για τη διαστασιολόγηση των μετασχηματιστών, η διδακτορική διατριβή προτείνει μία μέθοδο που βασίζεται στη βελτιστοποίηση της αποικίας μυρμηγκιών. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου καταδεικνύουν την καταλληλότητά της για την επίλυση του προβλήματος της επιλογής των μεγεθών των μετασχηματιστών, κατά τον προγραμματισμό των δικτύων διανομής, λόγω της δυνατότητας της μεθόδου να αξιολογήσει σωστά και με μικρό υπολογιστικό κόστος το πλήθος των πιθανών στρατηγικών διαστασιολόγησης των μετασχηματιστών σε ένα δίκτυο.

Τέλος, αναπτύσσεται ένα πλήρες λογισμικό σχεδίασης και απεικόνισης μετασχηματιστών, εφαρμόζοντας τις μεθοδολογίες βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διατριβής.

Λέξεις Κλειδιά: Βέλτιστη Σχεδίαση Μετασχηματιστών, Στοχαστικές Μέθοδοι Βελτιστοποίησης, Αιτιοκρατικές Μέθοδοι Βελτιστοποίησης, Τεχνητή Νοημοσύνη, Αριθμητικές Μέθοδοι, Εξοικονόμηση Ενέργειας, Οικονομική Αξιολόγηση Μετασχηματιστών, Συνολικό Κόστος Κατοχής, Περιβαλλοντικό Κόστος, Διαστασιολόγηση Μετασχηματιστών.

Abstract

The present PhD thesis deals with transformer design optimization, optimal transformer sizing as well as transformer economic evaluation problems. The aforementioned problems constitute thorny issues, implicating several complexities. For instance, the transformer design optimization problem represents a sophisticated mixed integer non-linear programming problem, which must be dealt, not only by adapting efficient optimization methods but also by embedding proper models able to compute the required transformer technical parameters, combining computational speed as well as accuracy. Furthermore, the transformer sizing problem, namely the selection of the appropriate transformer rated power as well as the determination of the time (years) when the transformer is installed on a network by an electric utility, comprises a complex combinatorial optimization problem, subject mainly to the constraints imposed by the characteristics of the load to be served as well as the transformer thermal durability constraints. Moreover, transformer economic evaluation constitutes a complicate problem, mainly due to the uncertainty of plenty and important parameters which concern the specific evaluation study.

Transformer winding material selection comprises a subproblem of the main transformer design optimization problem. In the present PhD thesis, a novel hybrid artificial intelligence method/numerical method is proposed for the transformer winding material selection, able to automatically select the transformer winding material (namely, copper or aluminum), which consists a significant parameter in the manufacturing cost optimization process, thus reducing the necessity to perform the design optimization twice, with copper or aluminum windings.

In addition, hybrid mixed integer non-linear programming in conjunction with finite element technique methodologies are developed for the solution of the transformer design optimization problem. The major predominant points of the proposed method are: i) extension of the solution space through proper definition of the variation of crucial design variables, such as the conductors' cross-section, ensuring global optimum transformer designs, ii) incorporation of numerical field computation in order to validate the feasibility of the optimum designs.

One of the most widely used technique for the economic evaluation of transformers is the Total Owning Cost method (TOC), according to the international standard C57.120 of the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). The purchasing transformer cost as well as the transformer loss cost is taken into consideration by TOC method over the transformer lifetime. In the frames of the PhD thesis, the extension of the IEEE C57.120 international standard is proposed, through the insertion of proper environmental cost in the TOC method.

Regarding the optimal transformer sizing (OTS) problem, a stochastic optimization method, based on the elitist ant system (EAS) method is developed. The results of the proposed method demonstrate the benefits of its application to the OTS problem, during network distribution planning, due to its ability to properly evaluate and compare all potential transformer sizing strategies, while remaining at a low computational cost.

Last but not least, a Transformer Design Optimization (TDO) software package is implemented based on the optimization methods developed in the present thesis, providing a user-friendly and interactive transformer design and visualization environment.

Keywords: Transformer Design Optimization, Stochastic Optimization Methods, Deterministic Optimization Methods, Artificial Intelligence, Numerical Methods, Energy Saving, Transformer Economic Evaluation, Total Owning Cost, Environmental Cost, Optimal Transformer Sizing.

Επιστημονικά Δημοσιεύματα

Παρουσιάζονται τα επιστημονικά δημοσιεύματα του Ελευθέριου Ι. Αμοιραλή στα πλαίσια της εκπόνησης της διδακτορικής του διατριβής στο Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης.

A. Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά και βιβλία μετά από κρίση

- A1. E. I. Amoiralis, M. A. Tsili, P. S. Georgilakis, A. G. Kladas, A. T. Souflaris, "A Parallel Mixed Integer Programming-Finite Element Method Technique for Global Design Optimization of Power Transformer," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 44, No. 6, pp. 1022-1025, 2008.
- A2. E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, T. D. Kefalas, M. A. Tsili, A. G. Kladas, "Artificial Intelligence combined with Hybrid FEM-BE Techniques for Global Transformer Optimization," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 43, No. 4, pp. 1633-1636, 2007.
- A3. P. S. Georgilakis, E. I. Amoiralis, "Spotlight on Transformer Design," *IEEE Power and Energy*, Vol. 5, No. 1, pp. 40-50, 2007.
- A4. M. A. Tsili, E. I. Amoiralis, A. G. Kladas, A. T. Souflaris, "Hybrid Numerical-Analytical Technique for Power Transformer Thermal Modeling", *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008 (accepted).
- A5. E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, M. Tsili, "Design Optimization of Distribution Transformers Based on Mixed Integer Programming Methodology," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, Vol. 10, No. 5, pp. 1178-1183, 2008.
- A6. E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, M. Tsili, A. T. Souflaris, "Utility-Based Economic Assessment of Distribution Transformers Considering Specific Load Characteristics and Environmental Factors," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, Vol. 10, No. 5, pp. 1184-1191, 2008.
- A7. E. I. Amoiralis, M. Tsili, P. S. Georgilakis, "The State of the Art in Engineering Methods for Transformer Design and Optimization: a Survey," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, Vol. 10, No. 5, pp. 1149-1158, 2008.
- A8. E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, M. A. Tsili, A. G. Kladas, "Ant Colony System-Based Algorithm for Optimal Multi-Stage Planning of Distribution Transformer Sizing", *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, Part II, LNAI 5178, pp. 9-17, 2008.
- A9. E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, A. T. Gioulekas, "An Artificial Neural Network for the Selection of Winding Material in Power Transformers," *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Springer-Verlag, LNAI 3955, pp. 465-468, 2006.

B. Δημοσιεύσεις σε πρακτικά συνεδρίων μετά από κρίση

- B1. E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, M. A. Tsili, A. G. Kladas, "Global Transformer Optimization Method using Evolutionary Design and Numerical Field Computation", *Proc. 13th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation CEFC 2008*, Athens, Greece, May 11-15, 2008.
- B2. E. I. Amoiralis, M. A. Tsili, P. S. Georgilakis, A. G. Kladas, "Energy Efficient Transformer Selection Implementing Life Cycle Costs and Environmental Externalities," *Proc. 9th International Conference on the Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU 2007)*, Barcelona, Spain, October 9-11, 2007.
- B3. E. I. Amoiralis, M. A. Tsili, P. S. Georgilakis, A. G. Kladas, "Ant Colony Solution to Optimal Transformer Sizing Problem," *Proc. 9th International Conference on the Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU 2007)*, Barcelona, Spain, October 9-11, 2007.
- B4. E. I. Amoiralis, E. Litsos, P. S. Georgilakis, "Methodology for the Optimum Design of Power Transformers using Minimum Number of Input Parameters," *Proc. 17th International Conference on Electrical Machines (ICEM 2006)*, Chania, Greece, September 2006.

Περιεχόμενα

<i>Πρόλογος</i>	<i>xi</i>
<i>Σύντομο Βιογραφικό</i>	<i>xiii</i>
<i>Περίληψη</i>	<i>xv</i>
<i>Abstract</i>	<i>xvii</i>
<i>Επιστημονικά Δημοσιεύματα</i>	<i>xix</i>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1	Περιοχή Έρευνας – Αντικείμενο της Εργασίας	1
1.2	Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας	3
1.2.1	Υπολογισμός Κύριων Τεχνικών Χαρακτηριστικών Μετασχηματιστή	3
1.2.1.1	Απώλειες Κενού Φορτίου	3
1.2.1.2	Απώλειες Φορτίου	5
1.2.1.3	Πεδίο Σκέδασης και Τάση βραχυκύκλωσης	6
1.2.1.4	Καταπόνηση και Δυναμική Συμπεριφορά υπό Βραχυκύκλωμα	7
1.2.1.5	Θόρυβος Μετασχηματιστή	7
1.2.1.6	Μόνωση Μετασχηματιστή	8
1.2.1.7	Ψύξη Μετασχηματιστή	8
1.2.1.8	Η Τάση της Νέας Τεχνολογίας στους Μετασχηματιστές	9
1.2.2	Μεθοδολογία Βέλτιστης Σχεδίασης Μετασχηματιστών	10
1.2.2.1	Μοντέλα Ελαχιστοποίησης Κόστους Κατασκευής Μετασχηματιστών	10
1.2.2.2	Μοντέλα Ελαχιστοποίησης Κόστους Λειτουργίας Μετασχηματιστών	11
1.2.3	Βέλτιστη Επιλογή Μεγέθους Μετασχηματιστή	13
1.3	Ανάπτυξη Προηγμένων Μοντέλων Κόστους Κατασκευής και Λειτουργίας	14
1.3.1	Ανάπτυξη Μεθόδων Τεχνητής Νοημοσύνης για την Επιλογή του Υλικού των Τυλιγμάτων	14
1.3.2	Ανάπτυξη Μεθόδου Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού σε Συνδυασμό με την Τεχνική Διακλάδωσης και Φράγματος για τη Βέλτιστη Σχεδίαση Μετασχηματιστών	14
1.3.3	Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Ενσωμάτωσης Περιβαλλοντικού Κόστους στην Οικονομική Αξιολόγηση Μετασχηματιστών	15
1.3.4	Ανάπτυξη Μεθόδου Βελτιστοποίησης Αποικίας Μυρμηγκιών για την Επιλογή Μεγέθους Μετασχηματιστή	15
1.4	Δομή της Διατριβής	15
1.5	Βιβλιογραφία	17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

2.1	Συμβολισμοί	29
2.1.1	Συμβολισμοί Ηλεκτρικών Μεγεθών	29

2.1.2	Συμβολισμοί Γεωμετρικών Μεγεθών	30
2.1.3	Συμβολισμοί Οικονομικών Μεγεθών	32
2.1.4	Συμβολισμοί Διάφορων Μεγεθών	33
2.2	Διατύπωση Προβλήματος Βέλτιστης Σχεδίασης Μετασχηματιστή	34
2.2.1	Μεταβλητές Σχεδίασης	34
2.2.1.1	Συνεχείς και Διακριτές Μεταβλητές Σχεδίασης	34
2.2.1.2	Όρια των Μεταβλητών Σχεδίασης	35
2.2.2	Αντικειμενική Συνάρτηση	35
2.2.2.1	Ελαχιστοποίηση Κόστους Ενεργού Μέρους Μετασχηματιστή	35
2.2.2.2	Ελαχιστοποίηση Κόστους Οκτώ Κύριων Υλικών	35
2.2.2.3	Ελαχιστοποίηση Κατασκευαστικού Κόστους	36
2.2.2.4	Ελαχιστοποίηση Συνολικού Κόστους Κατοχής	36
2.2.2.5	Ελαχιστοποίηση Συνολικού Κόστους Κατοχής με Περιβαλλοντικό κόστος	36
2.2.3	Περιορισμοί	36
2.2.3.1	Περιορισμός Επαγόμενης Τάσης	37
2.2.3.2	Περιορισμός Λόγου Σπειρών	38
2.2.3.3	Περιορισμός Απωλειών Κενού Φορτίου	38
2.2.3.4	Περιορισμός Απωλειών Φορτίου	38
2.2.3.5	Περιορισμός Συνολικών Απωλειών (Κενού Φορτίου και Φορτίου)	38
2.2.3.6	Περιορισμός Τάσης Βραχυκύκλωσης	39
2.2.3.7	Περιορισμός Μαγνητικής Επαγωγής	39
2.2.3.8	Περιορισμός Μετάδοσης Θερμότητας	39
2.2.3.9	Περιορισμός Ανύψωσης Θερμοκρασίας	39
2.2.3.10	Περιορισμός Απόδοσης Μετασχηματιστή	39
2.2.3.11	Περιορισμός Ρεύματος Κενού Φορτίου (Ρεύματος Μαγνήτισης)	39
2.2.3.12	Περιορισμός Ρύθμισης Τάσης	39
2.2.3.13	Περιορισμός Αντοχής των Μονωτικών	40
2.2.3.14	Περιορισμός Διάστασης Δοχείου	40
2.2.4	Μοντελοποίηση	40
2.3	Περιγραφή του Σχεδιαζόμενου Μετασχηματιστή	40
2.3.1	Πυρήνες	41
2.3.2	Πηνία	42
2.3.3	Δοχείο	43
2.4	Τεχνικές Προδιαγραφές για τη Σχεδίαση Μετασχηματιστών	43
2.5	Υφιστάμενη Μεθοδολογία Βελτιστοποίησης της Σχεδίασης	45
2.5.1	Συνοπτική Περιγραφή	45
2.5.2	Δεδομένα Εισόδου	45
2.5.3	Αλγόριθμος Εύρεσης της Βέλτιστης Λύσης	45
2.5.4	Ανάλυση Ευαισθησίας για την Εύρεση της Βέλτιστης Λύσης	48
2.5.5	Μειονεκτήματα της Μεθόδου	48

2.6	Ενεργό και Μηχανικό Μέρος του Μετασχηματιστή	49
2.7	Υπολογισμός Τάσης ανά Σπείρα και Πάχους Σκέλους Πυρήνα	50
2.8	Υπολογισμός Μονωτικών Στρώσεων	51
2.9	Κατασκευαστική Περιγραφή Πηνίου	52
2.10	Υπολογισμός Διαστάσεων Πηνίου	54
2.10.1	Διαστάσεις Πηνίου Χαμηλής Τάσης	55
2.10.2	Διαστάσεις Πηνίου Υψηλής Τάσης	57
2.10.3	Υπολογισμός του Εύρους των Παραθύρων των Πυρήνων	60
2.10.4	Έλεγχος της Ορθότητας Επιλογής των Μονωτικών Μεταξύ των Στρώσεων των Πηνίων Χαμηλής και Υψηλής Τάσης	61
2.11	Υπολογισμός Βάρους και Απωλειών Πυρήνα	62
2.12	Υπολογισμός Επαγωγικού Μέρους Τάσης Βραχυκύκλωσης	63
2.13	Υπολογισμός Απωλειών Φορτίου και Βάρους Αγωγών	63
2.13.1	Απώλειες Φορτίου Πηνίου Χαμηλής Τάσης	63
2.13.2	Απώλειες Φορτίου Πηνίου Υψηλής Τάσης	64
2.13.3	Συνολικές Απώλειες Φορτίου	64
2.13.4	Υπολογισμός Βάρους Αγωγών Χαμηλής και Υψηλής Τάσης	65
2.14	Υπολογισμός Τάσης Βραχυκύκλωσης	65
2.15	Υπολογισμός Μήκους Πηνίου	66
2.15.1	Υπολογισμός Πάχους Καναλιών	66
2.15.2	Υπολογισμός Πάχους Μπαρών (Λήψεων) Χαμηλής και Υψηλής Τάσης	66
2.15.3	Υπολογισμός Λοιπών Παχών και Ανοχών	66
2.15.4	Υπολογισμός Συνολικού Μήκους Πηνίου	66
2.16	Υπολογισμός Διαστάσεων Δοχείου	67
2.17	Υπολογισμός Διαφοράς Θερμοκρασίας Λαδιού και Τυλίγματος	68
2.18	Υπολογισμός Διαστάσεων Ψυκτικών Πανέλων	69
2.19	Υπολογισμός Διαστάσεων Μονωτικών Υλικών	70
2.20	Υπολογισμός Βάρους Καναλιών	71
2.21	Υπολογισμός Βάρους Λαδιού	71
2.22	Κόστος Κύριων Υλικών Μετασχηματιστή	71
2.23	Συμπεράσματα	72
2.24	Βιβλιογραφία	73

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

3.1	Εισαγωγή	75
3.2	Δέντρα Αποφασής	76
3.2.1	Γενικά Χαρακτηριστικά των Δέντρων Απόφασής	76
3.2.2	Επαγωγική Εξαγωγή Συμπερασμάτων	77
3.2.3	Βέλτιστο Κριτήριο Διαχωρισμού	77
3.2.4	Κριτήριο Διακοπής Διαχωρισμού	79
3.2.5	Αλγόριθμος Κατασκευής των Δέντρων Απόφασής	81

3.3	Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα	82
3.3.1	Εισαγωγή	82
3.3.2	Βασικές Συνιστώσες Νευρωνικών Δικτύων	83
3.3.3	Νευρώνες	84
3.3.4	Υπολογισμός Εισόδου και Εξόδου Νευρώνα	84
3.3.5	Κατηγορίες Νευρώνων Βάσει της Διαμόρφωσής τους	85
3.3.6	Εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων	85
3.3.7	Λειτουργία Νευρωνικών Δικτύων	86
3.4	Προτεινόμενη Μεθοδολογία Επιλογής Υλικού Τυλιγμάτων Μετασχηματιστή	87
3.4.1	Εισαγωγή	87
3.4.2	Δημιουργία Βάσης Γνώσης	87
3.4.3	Νευρωνικό Δίκτυο	88
3.4.4	Προτεινόμενη Μεθοδολογία για την Επιλογή του Υλικού των Τυλιγμάτων	90
3.4.5	Αριθμητική Επιβεβαίωση της Προτεινόμενης Μεθόδου με Χρήση της Υβριδικής Τεχνικής Πεπερασμένων-Οριακών Στοιχείων	98
3.5	Σύνοψη Αποτελεσμάτων και Συμπεράσματα	99
3.6	Βιβλιογραφία	100

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΙΚΤΟΥ ΑΚΕΡΑΙΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΔΙΑΚΛΑΔΩΣΗΣ ΚΑΙ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

4.1	Εισαγωγή	103
4.2	Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός και Μέθοδος Διακλάδωσης και Φράγματος	104
4.2.1	Μικτός Ακέραιος Μη Γραμμικός Προγραμματισμός	104
4.2.2	Μέθοδος Διακλάδωσης και Φράγματος	107
4.2.2.1	Ακολουθιακός Τετραγωνικός Προγραμματισμός	109
4.3	Τρισδιάστατη Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων	110
4.3.1	Εξισώσεις Πεδίου	111
4.3.2	Οριακές Συνθήκες	112
4.3.3	Γεωμετρία Μοντέλου Μετασχηματιστή	112
4.3.4	Διακριτοποίηση των Εξισώσεων Πεδίου και Αναπαράστασή τους στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων	113
4.3.5	Υπολογισμός Τάσης Βραχυκύκλωσης με τη Χρήση των Αποτελεσμάτων της Τρισδιάστατης Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων	114
4.4	Μέθοδος Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού με την Τεχνική της Διακλάδωσης και Φράγματος σε Συνδυασμό με τα Πεπερασμένα Στοιχεία για τη Βέλτιστη Σχεδίαση του Μετασχηματιστή	115
4.4.1	Βήματα/Πορεία Επίλυσης του Προβλήματος Βέλτιστης Σχεδίασης Μετασχηματιστή Διανομής	115
4.4.2	Αντικειμενική Συνάρτηση	116
4.4.2.1	Ελαχιστοποίηση Κόστους Ενεργού Μέρους Μετασχηματιστή	116
4.4.2.2	Ελαχιστοποίηση Κόστους Οκτώ Κύριων Υλικών	117
4.4.2.3	Ελαχιστοποίηση Κατασκευαστικού Κόστους	118

4.4.2.4	Ελαχιστοποίηση Συνολικού Κόστους Κατοχής	118
4.4.2.5	Ελαχιστοποίηση Συνολικού Κόστους Κατοχής με Περιβαλλοντικό κόστος	118
4.4.3	Περιορισμοί	119
4.4.3.1	Περιορισμός Επαγόμενης Τάσης	119
4.4.3.2	Περιορισμός Λόγου Σπειρών	119
4.4.3.3	Περιορισμός Απωλειών Κενού Φορτίου	119
4.4.3.4	Περιορισμός Απωλειών Φορτίου	119
4.4.3.5	Περιορισμός Συνολικών Απωλειών (Κενού Φορτίου και Φορτίου)	119
4.4.3.6	Περιορισμός Τάσης Βραχυκύκλωσης	119
4.4.3.7	Περιορισμός Μαγνητικής Επαγωγής	120
4.4.3.8	Περιορισμός Μετάδοσης Θερμότητας	120
4.4.3.9	Περιορισμός Ανύψωσης Θερμοκρασίας	120
4.4.3.10	Περιορισμός Απόδοσης Μετασχηματιστή	120
4.4.3.11	Περιορισμός Ρεύματος Κενού Φορτίου (Ρεύματος Μαγνήτισης)	120
4.4.3.12	Περιορισμός Ρύθμισης Τάσης	120
4.4.3.13	Περιορισμός Αντοχής των Μονωτικών	120
4.4.3.14	Περιορισμός Διάστασης Δοχείου	121
4.4.3.15	Ειδικοί Περιορισμοί Διαστάσεων Πυρήνα	121
4.4.3.16	Περιορισμοί Μεταβλητών Σχεδίασης	121
4.4.4	Ανάλυση της Μεθόδου	122
4.4.4.1	Ελαχιστοποίηση Κόστους Ενεργού Μέρους με Παράλληλες Υλοποιήσεις Μικτού Ακέραιου Μη Γραμμικού Προγραμματισμού σε Συνδυασμό με Τρισδιάστατη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων	122
4.4.4.2	Ελαχιστοποίηση Κόστους Οκτώ Κύριων Υλικών Μετασχηματιστή με την Υβριδική Μέθοδο Μικτού Ακέραιου Μη Γραμμικού Προγραμματισμού σε Συνδυασμό με Τρισδιάστατη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων	123
4.4.5	Εφαρμογή της Προτεινόμενης Μεθοδολογίας και Αποτελέσματα	126
4.4.6	Αποτελέσματα Διαφοροποίησης της Αντικειμενικής Συνάρτησης	140
4.4.7	Πλεονεκτήματα της Προτεινόμενης Μεθοδολογίας Βελτιστοποίησης της Σχεδίασης των Μετασχηματιστών	143
4.5	Συμπεράσματα	144
4.5	Βιβλιογραφία	144

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

5.1	Συμβολισμοί	147
5.2	Εισαγωγή	149
5.3	Απώλειες Μετασχηματιστών	150
5.3.1	Απώλειες Φορτίου	150
5.3.2	Απώλειες Κενού Φορτίου	151

5.3.3	Χρησιμότητα της Αξιολόγησης των Απωλειών στην Απελευθερωμένη Αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας	152
5.4	Απόδοση Μετασχηματιστών και Εξοικονόμηση Ενέργειας	153
5.4.1	Απόδοση Μετασχηματιστών	153
5.4.2	Μετασχηματιστές Υψηλής Ενεργειακής Απόδοσης	155
5.4.3	Οι Μετασχηματιστές Διανομής στην Ελλάδα, η Εξοικονόμηση Ενέργειας και οι Περιβαλλοντικές Εκτιμήσεις	157
5.5	Αξιολόγηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων	158
5.5.1	Ερμηνεία του Προβλήματος	158
5.5.2	Συμμετοχή στην Αύξηση της Μέσης Θερμοκρασίας της Γης	159
5.5.3	Το Πρωτόκολλο του Κυότο για τις Κλιματικές Μεταβολές	160
5.5.4	Εκπομπές Αερίων Θερμοκηπίου από Ενεργειακή Χρήση	160
5.6	Σκοπός και Στόχος της Αξιολόγησης των Μετασχηματιστών	161
5.7	Βασική Ιδέα Αξιολόγησης Απωλειών Μετασχηματιστή	162
5.8	Καμπύλες Φόρτισης Μετασχηματιστών	163
5.8.1	Εισαγωγή	163
5.8.2	Συλλογή και Επεξεργασία Στοιχείων Φόρτισης Μετασχηματιστών	164
5.8.3	Αξιοποίηση των Στοιχείων Φόρτισης Μετασχηματιστών στον Υπολογισμό του Συνολικού Κόστους Κατοχής	170
5.9	Μέθοδος Αξιολόγησης του Κόστους Απωλειών	172
5.9.1	Συντελεστής Διαθεσιμότητας	172
5.9.2	Συντελεστής Ευθύνης	172
5.9.3	Ετήσια Ισοδύναμη Αιχμή Φορτίου	173
5.9.4	Ετήσιος Συντελεστής Φορτίου	174
5.9.5	Ετήσιος Συντελεστής Απωλειών	174
5.9.6	Συντελεστής Φόρτισης	174
5.9.7	Συντελεστής Ανάκτησης Κεφαλαίου Επένδυσης	174
5.9.8	Παρόν Ετήσιο Κόστος Ενέργειας	175
5.9.9	Συντελεστής Ανάκτησης Κεφαλαίου	175
5.9.10	Τιμή Προσφοράς	175
5.9.11	Διάρκεια Χρήσης του Μετασχηματιστή	175
5.9.12	Συντελεστής Προσαύξησης	175
5.9.13	Κόστος της Παραγωγικής Ικανότητας του Συστήματος	176
5.9.14	Κανονικοποιημένο Κόστος Ενέργειας και Μέθοδος Κανονικοποίησης του Κόστους	176
5.9.15	Ετήσιος Ρυθμός Ανάπτυξης της Αιχμής του Φορτίου του Μετασχηματιστή	177
5.10	Οικονομική Αξιολόγηση Μετασχηματιστών Χωρίς Περιβαλλοντικό Κόστος	177
5.10.1	Υπολογισμός Κόστους Απωλειών και Συνολικού Κόστους Κατοχής Χωρίς Περιβαλλοντικό Κόστος	178
5.11	Μεθοδολογία Οικονομικής Αξιολόγησης Μετασχηματιστών Λαμβάνοντας Υπόψη το Περιβαλλοντικό Κόστος	179
5.11.1	Εισαγωγή	179
5.11.2	Συνολικό Κόστος Κατοχής με Περιβαλλοντικό Κόστος	179

5.11.3	Υπολογισμός των Συντελεστών Κόστους Απωλειών A και B	180
5.11.4	Υπολογισμός των Συντελεστών Περιβαλλοντικού Κόστους A_e και B_e	181
5.12	Εφαρμογή Μεθοδολογίας και Αποτελέσματα	183
5.12.1	Εισαγωγή	183
5.12.2	Οικονομική Αξιολόγηση χωρίς Θεώρηση Περιβαλλοντικού Κόστους	184
5.12.3	Οικονομική Αξιολόγηση με Θεώρηση Περιβαλλοντικού Κόστους	186
5.12.4	Απόδοση Μετασχηματιστή και Απώλειες	189
5.12.5	Ανάλυση Ευαισθησίας	190
5.12.6	Επίδραση του Τύπου του Φορτίου	191
5.13	Συμπεράσματα	193
5.14	Βιβλιογραφία	193

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΠΟΙΚΙΑΣ ΜΥΡΜΗΓΚΙΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

6.1	Εισαγωγή	197
6.1.1	Διαστασιολόγηση Μετασχηματιστή	197
6.1.2	Στοχαστικοί Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης	198
6.1.3	Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών	200
6.2	Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών	200
6.2.1	Εισαγωγή	201
6.2.2	Αυτό-οργάνωση	201
6.2.3	Στιγμέργια και Συντονισμός	203
6.2.4	Αναζήτηση και Συγκομιδή Τροφής στις Αποικίες Μυρμηγκιών	204
6.2.5	Από τα Πραγματικά στα «Ψηφιακά» Μυρμήγκια	205
6.2.6	Ο Αλγόριθμος των Μυρμηγκιών Ant System (AS)	207
6.3	Μεθοδολογία Επιλογής Μεγέθους Μετασχηματιστή Βασισμένη στην Τεχνική των Μυρμηγκιών	209
6.3.1	Σύνοψη Προτεινόμενης Μεθοδολογίας	209
6.3.2	Υπολογισμοί Θερμικής Φόρτισης Μετασχηματιστή	211
6.3.3	Υπολογισμός Κόστους Ενέργειας Απωλειών Μετασχηματιστή	214
6.3.4	Επίλυση Προβλήματος Επιλογής Μεγέθους Μετασχηματιστή Χρησιμοποιώντας τον Ελιτιστικό Αλγόριθμο Αποικίας Μυρμηγκιών (EAS)	215
6.4	Εφαρμογή Μεθοδολογίας και Αποτελέσματα	216
6.5	Συμπεράσματα	222
6.6	Βιβλιογραφία	222

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1	Σύνοψη της Διατριβής και των Αποτελεσμάτων της	227
7.2	Συμβολή και Πρωτοτυπία της Διατριβής	230
7.3	Επεκτάσεις της Διατριβής	232

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

A.1	Εισαγωγή	233
A.1.1	Εισαγωγή Δεδομένων Εισόδου του Μετασχηματιστή	237
A.1.2	Εισαγωγή Δεδομένων Εισόδου της Τεχνικής του Μικτού Ακέραιου Μη Γραμμικού Προγραμματισμού	239
A.1.3	Επιλογή Αντικειμενικής Συνάρτησης	240
A.2	Βέλτιστη Σχεδίαση Μετασχηματιστών με Μικτό Ακέραιο Προγραμματισμό	241
A.2.1	Υπολογισμός Διατομής Αγωγών με Κριτήριο τη Θερμική Δοκιμή Βραχυκύκλωσης	241
A.2.2	Υπολογισμοί Διατομής Αγωγών με Κριτήριο την Πυκνότητα Ρεύματος	241
A.2.2.1	Σταθερή Πυκνότητα Ρεύματος	241
A.2.2.2	Ορισμός Διαστήματος και Βήματος Μεταβολής Πυκνότητας Ρεύματος Λαμβάνοντας Υπόψη Όλους τους Πιθανούς Συνδυασμούς	242
A.2.2.3	Υπολογισμός Πυκνότητας Ρεύματος ως Μεταβλητής Σχεδίασης στον Αλγόριθμο Βελτιστοποίησης	242
A.3	Εργαλεία Ανάλυσης Τρισδιάστατων Πεπερασμένων Στοιχείων	242
A.4	Εργαλεία Οικονομικής Αξιολόγησης Μετασχηματιστών	245
A.5	Εργαλεία Διαχείρισης Δεδομένων Εισόδου και Αποτελεσμάτων	247
A.6	Βάση Δεδομένων	248
A.7	Εργαλεία Γραφικής Απεικόνισης Αποτελεσμάτων	248
A.8	Εργαλεία Ανάλυσης Λειτουργικών Χαρακτηριστικών Μετασχηματιστή	249
A.9	Αποτελέσματα	250
A.10	Συμπεράσματα	251
A.11	Βιβλιογραφία	252

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1	Γενική επισκόπηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.	2
Σχήμα 2.1	Δημιουργία μαγνητικής ροής σε μετασχηματιστές διανομής με τυλιγμένους πυρήνες. Για απλότητα παρουσιάζεται το τύλιγμα της μιας μόνο φάσης.	38
Σχήμα 2.2	Μετασχηματιστής διανομής λαδιού [2.1].	41
Σχήμα 2.3	(α) Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μικρού και του μεγάλου τυλιγμένου πυρήνα.(β) Τελική μορφή τυλιγμένου πυρήνα.	41
Σχήμα 2.4	(α) Κατασκευή πηνίου χαμηλής τάσης χρησιμοποιώντας φύλλο χαλκού και το μονωτικό υλικό (β) Κατασκευή πηνίου υψηλής τάσης χρησιμοποιώντας αγωγό κυκλικής διατομής.	42
Σχήμα 2.5	Συναρμολόγηση ενεργού μέρους μετασχηματιστή.	42
Σχήμα 2.6	(α) Εσωτερική όψη του δοχείου λαδιού (β) αριστερή πλάγια όψη και (γ) κάτωψη του δοχείου λαδιού.	43
Σχήμα 2.7	Αλγόριθμος βέλτιστης σχεδίασης μετασχηματιστή.	47
Σχήμα 2.8	Γεωμετρικές διαστάσεις τομής του μετασχηματιστή διανομής.	50
Σχήμα 2.9	Είδη αγωγών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πηνίων. (α) αγωγός κυκλικής διατομής, (β) διπλός αγωγός κυκλικής διατομής, (γ) αγωγός ορθογωνικής διατομής, (δ) διπλός αγωγός ορθογωνικής διατομής, και (ε) φύλλο.	52
Σχήμα 2.10	Οι ακροδέκτες του πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης, ο μεταγωγέας τάσεων και τα κανάλια ψύξης.	53
Σχήμα 2.11	Απεικόνιση ενεργού μέρους του μετασχηματιστή.	54
Σχήμα 2.12	Καλούπι πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης μιας φάσης.	54
Σχήμα 2.13	Οι τρεις κύριες διαστάσεις του δοχείου.	67
Σχήμα 2.14	Μεταβολή διαφορικού θερμοκρασίας τυλίγματος σε σχέση με τη μέση ανύψωση της θερμοκρασίας του τυλίγματος και τις απώλειες του τυλίγματος.	68
Σχήμα 2.15	Μονωτικό χαρτόνι <i>Tube</i> και <i>Extend</i> .	71
Σχήμα 3.1	Υποθετικό δέντρο απόφασης και η αντίστοιχη γεωμετρική του ερμηνεία.	76
Σχήμα 3.2	χ^2 συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της $\hat{A}$ με ένα βαθμό ελευθερίας.	80
Σχήμα 3.3	Λογικό διάγραμμα κατασκευής δέντρου απόφασης.	81
Σχήμα 3.4	Βασικές συνιστώσες ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου.	83
Σχήμα 3.5	Είδη συναρτήσεων ενεργοποίησης	85
Σχήμα 3.6	Παράδειγμα ενός πλήρως συνδεδεμένου τεχνητού νευρωνικού δικτύου απλής τροφοδότησης.	85
Σχήμα 3.7	Η ακρίβεια των 8 διαφορετικών νευρωνικών δικτύων όσον αφορά το σύνολο εκπαίδευσης και ελέγχου.	89
Σχήμα 3.8	Αρχιτεκτονική του βέλτιστου νευρωνικού δικτύου για την επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές.	89
Σχήμα 3.9	Δέντρο απόφασης για την επιλογή του υλικού των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών διανομής.	90
Σχήμα 3.10	Μηχανισμός προσαρμοσμένης εκπαίδευσης για την επιλογή του υλικού των τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές.	91
Σχήμα 3.11	Βαθμός επιτυχίας ταξινόμησης στο σύνολο ελέγχου χρησιμοποιώντας 16 διαφορετικές συναρτήσεις εκπαίδευσης της εργαλειοθήκης της Matlab.	92

Σχήμα 3.12	Βαθμός επιτυχίας ταξινόμησης στο σύνολο ελέγχου χρησιμοποιώντας 11 διαφορετικές συναρτήσεις ενεργοποίησης της εργαλειοθήκης της Matlab.	93
Σχήμα 3.13	Όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των τριών καλύτερων συναρτήσεων ενεργοποίησης και εκπαίδευσης.	93
Σχήμα 3.14	Τα 10 καλύτερα αποτελέσματα με βάση τον υψηλότερο βαθμό επιτυχίας ταξινόμησης χρησιμοποιώντας τους δεκατρείς νευρώνες εισόδου, ένα ή δύο κρυφά στρώματα, και δυο διαφορετικές περιπτώσεις όσον αφορά το μέγεθος του συνόλου μάθησης και ελέγχου. (α) ένα κρυφό στρώμα με 50% ΣΜ και 50% ΣΕ, (β) ένα κρυφό στρώμα με 70% ΣΜ και 30% ΣΕ, (γ) δύο κρυφά στρώματα με 50% ΣΜ και 50% ΣΕ, και (δ) δύο κρυφά στρώματα με 70% ΣΜ και 30% ΣΕ.	95
Σχήμα 3.15	Τα 10 καλύτερα αποτελέσματα με βάση τον υψηλότερο βαθμό επιτυχίας ταξινόμησης χρησιμοποιώντας τους έξι νευρώνες εισόδου, ένα ή δύο κρυφά στρώματα, και δυο διαφορετικές περιπτώσεις όσον αφορά το μέγεθος του συνόλου μάθησης και ελέγχου. (α) ένα κρυφό στρώμα με 50% ΣΜ και 50% ΣΕ, (β) ένα κρυφό στρώμα με 70% ΣΜ και 30% ΣΕ, (γ) δύο κρυφά στρώματα με 50% ΣΜ και 50% ΣΕ, και (δ) δύο κρυφά στρώματα με 70% ΣΜ και 30% ΣΕ.	96
Σχήμα 3.16	Η βέλτιστη αρχιτεκτονική του προτεινόμενου τεχνητού νευρωνικού δικτύου.	97
Σχήμα 4.1	Προοπτική όψη της μίας φάσης του τριφασικού μετασχηματιστή που χρησιμοποιήθηκε για τη διαμόρφωση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.	113
Σχήμα 4.2	Πλέγμα μετασχηματιστή με αναπαράσταση των καναλιών.	113
Σχήμα 4.3	(α) το ενεργό μέρος του μετασχηματιστή με τις βασικές διαστάσεις του πυρήνα, (β) το μηχανικό μέρος του μετασχηματιστή.	117
Σχήμα 4.4	Διάγραμμα ροής της αρχικής προσέγγισης της προτεινόμενης μεθοδολογίας για τη σχεδίαση των μετασχηματιστών.	123
Σχήμα 4.5	Διάγραμμα ροής της προτεινόμενης υβριδικής τεχνικής.	126
Σχήμα 4.6	Μέση μείωση κόστους της προτεινόμενης σε σχέση με τη υφιστάμενη μέθοδο.	127
Σχήμα 4.7	Γραφική απεικόνιση των κύριων αποτελεσμάτων της σύγκρισης των δύο μεθόδων (προτεινόμενης και υφιστάμενης) για το μετασχηματιστή διανομής με ονομαστική ισχύ 400 kVA.	129
Σχήμα 4.8	Συνολικό κόστος των οκτώ κύριων υλικών για κάθε μια από τις 14 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 1600 kVA.	132
Σχήμα 4.9	Συνολικές απώλειες για κάθε μια από τις 14 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 1600 kVA.	132
Σχήμα 4.10	Τάση βραχυκύκλωσης για κάθε μια από τις 14 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 1600 kVA.	132
Σχήμα 4.11	Συνολικό κόστος των οκτώ κύριων υλικών για κάθε μια από τις 24 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 1000 kVA.	133
Σχήμα 4.12	Συνολικές απώλειες για κάθε μια από τις 24 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 1000 kVA.	133
Σχήμα 4.13	Τάση βραχυκύκλωσης για κάθε μια από τις 24 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 1000 kVA.	133
Σχήμα 4.14	Συνολικό κόστος των οκτώ κύριων υλικών για κάθε μια από τις 20 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 800 kVA.	134
Σχήμα 4.15	Συνολικές απώλειες για κάθε μια από τις 20 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 800 kVA.	134
Σχήμα 4.16	Τάση βραχυκύκλωσης για κάθε μια από τις 20 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 800 kVA.	134

Σχήμα 4.17	Συνολικό κόστος των οκτώ κύριων υλικών για κάθε μια από τις 48 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 630 kVA.	135
Σχήμα 4.18	Συνολικές απώλειες για κάθε μια από τις 48 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 630 kVA.	135
Σχήμα 4.19	Τάση βραχυκύκλωσης για κάθε μια από τις 48 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 630 kVA.	135
Σχήμα 4.20	Συνολικό κόστος των οκτώ κύριων υλικών για κάθε μια από τις 28 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 400 kVA.	136
Σχήμα 4.21	Συνολικές απώλειες για κάθε μια από τις 28 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 400 kVA.	136
Σχήμα 4.22	Τάση βραχυκύκλωσης για κάθε μια από τις 28 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 400 kVA.	136
Σχήμα 4.23	Συνολικό κόστος των οκτώ κύριων υλικών για κάθε μια από τις 16 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 250 kVA.	137
Σχήμα 4.24	Συνολικές απώλειες για κάθε μια από τις 16 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 250 kVA.	137
Σχήμα 4.25	Τάση βραχυκύκλωσης για κάθε μια από τις 16 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 250 kVA.	137
Σχήμα 4.26	Συνολικό κόστος των οκτώ κύριων υλικών για κάθε μια από τις 24 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 160 kVA.	138
Σχήμα 4.27	Συνολικές απώλειες για κάθε μια από τις 24 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 160 kVA.	138
Σχήμα 4.28	Τάση βραχυκύκλωσης για κάθε μια από τις 24 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 160 kVA.	138
Σχήμα 4.29	Συνολικό κόστος των οκτώ κύριων υλικών για κάθε μια από τις 14 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 100 kVA.	139
Σχήμα 4.30	Συνολικές απώλειες για κάθε μια από τις 14 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 100 kVA.	139
Σχήμα 4.31	Τάση βραχυκύκλωσης για κάθε μια από τις 14 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 100 kVA.	139
Σχήμα 5.1	Τρίγωνο ισχύος.	153
Σχήμα 5.2	Σχηματική απεικόνιση μηχανισμού φαινομένου θερμοκηπίου.	159
Σχήμα 5.3	Ποσοστό συμμετοχής κάθε τύπου καυσίμου στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (α) στο διασυνδεδεμένο σύστημα και (β) στο νησιωτικό σύστημα.	161
Σχήμα 5.4	Τυπικές καμπύλες φορτίου οικιακού καταναλωτή κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου. (α) Χρονολογική καμπύλη φορτίου, (β) Καμπύλη διάρκειας φορτίου.	164
Σχήμα 5.5	Τυπική καμπύλη φόρτισης μετασχηματιστή διανομής που τροφοδοτεί οικιακούς καταναλωτές σε αστική περιοχή κατά τη διάρκεια μίας εργάσιμης ημέρας.	166
Σχήμα 5.6	Τυπική καμπύλη φόρτισης μετασχηματιστή διανομής που τροφοδοτεί οικιακούς καταναλωτές σε αστική περιοχή κατά τη διάρκεια μίας μη εργάσιμης ημέρας.	166
Σχήμα 5.7	Τυπική καμπύλη φόρτισης μετασχηματιστή διανομής που τροφοδοτεί μέσους και μικρούς βιομηχανικούς καταναλωτές κατά τη διάρκεια μίας εργάσιμης ημέρας.	167
Σχήμα 5.8	Τυπική καμπύλη φόρτισης μετασχηματιστή διανομής που τροφοδοτεί μέσους και μικρούς βιομηχανικούς καταναλωτές κατά τη διάρκεια μίας μη εργάσιμης ημέρας.	167

Σχήμα 5.9	Τυπική καμπύλη φόρτισης μετασχηματιστή διανομής που τροφοδοτεί αγροτικούς και αρδευτικούς καταναλωτές κατά τη διάρκεια μίας εργάσιμης ημέρας.	168
Σχήμα 5.10	Τυπική καμπύλη φόρτισης μετασχηματιστή διανομής που τροφοδοτεί αγροτικούς και αρδευτικούς καταναλωτές κατά τη διάρκεια μίας μη εργάσιμης ημέρας.	168
Σχήμα 5.11	Τυπική καμπύλη φόρτισης μετασχηματιστή διανομής που τροφοδοτεί τουριστικούς καταναλωτές κατά τη διάρκεια μίας εργάσιμης ημέρας.	169
Σχήμα 5.12	Τυπική καμπύλη φόρτισης μετασχηματιστή διανομής που τροφοδοτεί τουριστικούς καταναλωτές κατά τη διάρκεια μίας μη εργάσιμης ημέρας.	169
Σχήμα 5.13	Τυπική καμπύλη φορτίου αιχμής διασυνδεδεμένου συστήματος.	171
Σχήμα 5.14	Τυπική καμπύλη φορτίου αιχμής συστήματος Κρήτης.	171
Σχήμα 5.15	Τυπική καμπύλη φορτίου αιχμής συστήματος Ρόδου.	172
Σχήμα 5.16	Καμπύλες φορτίου συστήματος και μετασχηματιστή.	173
Σχήμα 5.17	Ετήσιο κανονικοποιημένο κόστος.	177
Σχήμα 5.18	Σχήμα 5.18 Τυπικές καμπύλες φορτίου μετασχηματιστή δικτύου διανομής στην Ελλάδα για τέσσερα διαφορετικά είδη φορτίου, τα οποία αφορούν τον οικιακό, βιομηχανικό, αγροτικό και τουριστικό τύπο φορτίου (τα τρία πρώτα βρίσκονται στο διασυνδεδεμένο σύστημα ενώ το τέταρτο βρίσκεται σε αυτόνομο νησιωτικό σύστημα): (α) τυπικές καμπύλες των φορτίων στην αρχή της μελέτης (έτος 0) και (β) τυπικές καμπύλες των φορτίων στο τέλος της διάρκειας ζωής του μετασχηματιστή (έτος 30).	184
Σχήμα 5.19	Γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων του TOC_e (Πίνακας 5.13). Κάθε στήλη του TOC_e είναι χωρισμένη σε τέσσερα τμήματα: 1) τιμή πώλησης, 2) κόστος απωλειών κενού φορτίου, 3) κόστος απωλειών φορτίου, και 4) περιβαλλοντικό κόστος.	189
Σχήμα 5.20	Απόδοση και απώλειες των τριών μετασχηματιστών προσφοράς συναρτήσει του φορτίου.	189
Σχήμα 5.21	Γραφική αναπαράσταση του TOC_e συναρτήσει των αλλαγών της κάθε παραμέτρου.	191
Σχήμα 5.22	Αποτελέσματα του TOC_e συναρτήσει του τύπου φορτίου.	193
Σχήμα 6.1	Τα μυρμήγκια κινούνται από το Α στο Β και αντίστροφα. Όταν φτάσουν στη διακλάδωση Α ή Β θα πρέπει να επιλέξουν μεταξύ της μικρής και της μεγάλης διαδρομής. Η επιλογή γίνεται τυχαία καθώς και στις δυο διαδρομές δεν υπάρχει φερομόνη (αριστερό σχήμα, αρχική κατάσταση). Στο δεξιό σχήμα (τελική κατάσταση), η έντονη πράσινη γραμμή δείχνει την κατανομή των επιπέδων της φερομόνης αφού τα μυρμήγκια που επέλεξαν τη σύντομη διαδρομή ολοκληρώσουν την μετακίνηση από το Α στο Β και αντίστροφα. Είναι φανερό ότι τα νέα μυρμήγκια που θα φτάσουν στη διακλάδωση Α ή Β θα επιλέξουν τη σύντομη διαδρομή με μεγαλύτερη πιθανότητα.	205
Σχήμα 6.2	Διάγραμμα ροής των κυρίων βημάτων της προτεινόμενης τεχνικής.	210
Σχήμα 6.3	Μεταβολή της ανώτατης θερμοκρασίας τυλιγμάτων έξι μετασχηματιστών (Μ/Σ) ισχύος 160, 250, 300, 400, 500 και 630 kVA, οι οποίοι εξυπηρετούν οικιακό φορτίο, κατά τη διάρκεια μίας ημέρας.	214
Σχήμα 6.4	Το γράφημα που χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος επιλογής μεγέθους του μετασχηματιστή.	216
Σχήμα 6.5	Μονογραμμικό διάγραμμα του εξεταζόμενου δικτύου διανομής.	217
Σχήμα 6.6	Καμπύλες φορτίου για τα τρία είδη καταναλωτών που περιλαμβάνονται στο Σχήμα 6.5.	217

Σχήμα 6.7	Γράφημα το οποίο χρησιμοποιείται από τη προτεινόμενη τεχνική για την επιλογή μεγέθους μετασχηματιστή που θα εξυπηρετήσει φορτίο τύπου 5.	220
Σχήμα 6.8	Καμπύλες συνολικού κόστους απωλειών ενέργειας για τους έξι μετασχηματιστές διανομής που εξυπηρετούν το φορτίο του υποσταθμού Τύπου 5.	221
Σχήμα A.1	Η δομή και τα χαρακτηριστικά του λογισμικού TDO.	234
Σχήμα A.2	Γραφικό περιβάλλον του προγράμματος TDO.	235
Σχήμα A.3	Μενού με τις προδιαγραφές (Specifications), οι οποίες αφορούν τα δεδομένα εισόδου που εισάγονται αυτόματα από το λογισμικό και που μπορούν επίσης να τροποποιηθούν από το χρήστη.	237
Σχήμα A.4	Δεδομένα για διάφορες μεταβλητές (Miscellaneous variables) που εισάγονται αυτόματα από το λογισμικό. Τα δεδομένα αυτά μπορούν επίσης να τροποποιηθούν από το χρήστη.	238
Σχήμα A.5	Κόστη υλικών.	238
Σχήμα A.6	Ανοχές απωλειών και τάσης βραχυκύκλωσης.	239
Σχήμα A.7	Παράμετροι εισόδου που αφορούν τη μέθοδο βελτιστοποίησης.	240
Σχήμα A.8	Επιλογή αντικειμενικής συνάρτησης.	240
Σχήμα A.9	Οι τρεις διαφορετικές τεχνικές υπολογισμού των διατομών των πηνίων της χαμηλής και υψηλής τάσης κάνοντας χρήση της πυκνότητας ρεύματος.	241
Σχήμα A.10	Η πυκνότητα ρεύματος για τον υπολογισμό της διατομής των πηνίων της χαμηλής και υψηλής τάσης ως παράμετρος σχεδίασης στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.	242
Σχήμα A.11	Εργαλεία ανάλυσης τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων.	244
Σχήμα A.12	Απεικόνιση πλέγματος και αποτελεσμάτων ανάλυσης τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων (α) πλέγμα (β) κατανομή πεδίου σκέδασης.	244
Σχήμα A.13	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και διακριτοποίηση διδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων το οποίο μπορεί να κατασκευαστεί με το λογισμικό FEMM [A.3] με τη χρήση των αντίστοιχων αρχείων που παράγονται από το πρόγραμμα TDO.	245
Σχήμα A.14	Εργαλεία οικονομικής αξιολόγησης μετασχηματιστών.	246
Σχήμα A.15	Υπολογισμός συντελεστών A και B μέσω προτύπου IEEE.	246
Σχήμα A.16	Οικονομική αξιολόγηση μετασχηματιστών.	247
Σχήμα A.17	Εργαλεία διαχείρισης δεδομένων εισόδου και αποτελεσμάτων.	247
Σχήμα A.18	Απεικόνιση σύγκλισης αλγορίθμου σε πραγματικό χρόνο από το λογισμικό TDO.	248
Σχήμα A.19	Σχεδίαση του μετασχηματιστή και του ενεργού μέρους από το λογισμικό TDO.	249
Σχήμα A.20	Η γραφική απεικόνιση της μεταβολής της (α) απόδοσης του μετασχηματιστή συναρτήσει του φορτίου και (β) απωλειών του μετασχηματιστή συναρτήσει του φορτίου από το λογισμικό TDO.	249
Σχήμα A.21	Γραφική απεικόνιση απωλειών και τάσης βραχυκύκλωσης σε ονομαστική λειτουργία του μετασχηματιστή από το λογισμικό TDO.	250
Σχήμα A.22	Μέση διαφορά κόστους μεταξύ της βέλτιστης σχεδίασης του MAIN-TDO ανά ισχύ.	251

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1	Προδιαγραφές μετασχηματιστών κατά IEC.	44
Πίνακας 2.2	Ανοχές σύμφωνα με το IEC 60076 – 1.	44
Πίνακας 2.3	Εναλλακτικές τεχνικές μείωσης απωλειών.	48
Πίνακας 3.1	Κανόνες του δέντρου απόφασης που αφορούν το Σχήμα 3.1.	77
Πίνακας 3.2	Ιδιότητες εισόδου της βάσης γνώσης.	88
Πίνακας 3.3	Απόδοση (ποσοστό επιτυχίας ταξινόμησης) του νευρωνικού δικτύου με 13 νευρώνες εισόδου, 1 νευρώνα εξόδου και διαφορετικό πλήθος νευρώνων στο πρώτο κρυφό επίπεδο για την επιλογή υλικού τυλιγμάτων μετασχηματιστή.	89
Πίνακας 3.4	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της έρευνας για την επιλογή του υλικού των τυλιγμάτων.	93
Πίνακας 4.1	Αριθμός σχεδιάσεων (ανά ισχύ) που βελτιστοποιήθηκαν και μέση μείωση κόστους των οκτώ κύριων υλικών της προτεινόμενης μεθόδου σε σχέση με την υφιστάμενη μέθοδο σχεδίασης.	127
Πίνακας 4.2	Μοναδιαία κόστη των οκτώ κύριων υλικών του μετασχηματιστή που χρησιμοποιήθηκαν για τις 188 σχεδιάσεις που παρουσιάζει ο Πίνακας 4.1.	128
Πίνακας 4.3	Τεχνικά χαρακτηριστικά μετασχηματιστή 400 kVA.	128
Πίνακας 4.4	Συνολικά κόστη υλικών για το μετασχηματιστή 400 kVA (Πίνακας 4.3) όπως υπολογίστηκαν από την προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης.	128
Πίνακας 4.5	Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για το μετασχηματιστή ισχύος 400 kVA (Πίνακας 4.3) χρησιμοποιώντας τις τρεις καινοτομικές προσεγγίσεις υπολογισμού της πυκνότητας ρεύματος.	130
Πίνακας 4.6	Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για το μετασχηματιστή ισχύος 400 kVA (Πίνακας 4.3), ελαχιστοποιώντας (α) το κόστος των οκτώ κύριων υλικών (β) το συνολικό κόστος κατοχής.	140
Πίνακας 4.7	Τεχνικά χαρακτηριστικά μετασχηματιστή 250 kVA.	141
Πίνακας 4.8	Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για το μετασχηματιστή ισχύος 250 kVA χρησιμοποιώντας ως αντικειμενικές συναρτήσεις τις (4.34) και (4.36).	142
Πίνακας 5.1	Απώλειες φορτίου σύμφωνα με το πρότυπο CENELEC.	151
Πίνακας 5.2	Απώλειες κενού φορτίου σύμφωνα με το πρότυπο CENELEC.	152
Πίνακας 5.3	Οι μετασχηματιστές διανομής στην Ελλάδα.	157
Πίνακας 5.4	Νέοι μετασχηματιστές διανομής για τη Δ.Ε.Η.	158
Πίνακας 5.5	Νέοι μετασχηματιστές διανομής για ιδιώτες.	158
Πίνακας 5.6	Παραδείγματα GWP με βάση αναφοράς το CO ₂ .	159
Πίνακας 5.7	Τρεις διαφορετικές προσφορές μετασχηματιστών με ισχύ 1000 kVA.	183
Πίνακας 5.8	Δεδομένα εισόδου για τον υπολογισμό των συντελεστών απωλειών A και B , για την καμπύλη φόρτισης του οικιακού καταναλωτή στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα.	185
Πίνακας 5.9	Υπολογισμός του συνολικού κόστους κατοχής χωρίς θεώρηση περιβαλλοντικού κόστους για τις τρεις προσφορές των μετασχηματιστών (Μ/Σ) (Πίνακας 5.7) βάσει της καμπύλης φορτίου του οικιακού καταναλωτή στο Ελληνικό διασυνδεδεμένου σύστημα ($A = 8583 \text{ €/kW}$ και $B = 1341.7 \text{ €/kW}$ (Πίνακας 5.8)).	185
Πίνακας 5.10	Συνολική παραγωγή ρύπων ανά MWh για το διασυνδεδεμένο σύστημα της Ελλάδας.	187

Πίνακας 5.11	Συνολική παραγωγή ρύπων ανά MWh για αυτόνομο νησιωτικό σύστημα της Ελλάδας.	187
Πίνακας 5.12	Δεδομένα εισόδου προκειμένου να υπολογιστούν οι συντελεστές περιβαλλοντικού κόστους A_e και B_e , για τον οικιακό καταναλωτή στο διασυνδεδεμένο σύστημα ($C=89.4$ €/MWh).	187
Πίνακας 5.13	Υπολογισμός του TOC_e για τις τρεις προσφορές των μετασχηματιστών (Πίνακας 5.7), για την καμπύλη φόρτισης του οικιακού καταναλωτή στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα. Οι συντελεστές περιβαλλοντικού κόστους είναι $A_e=12522.6$ €/kW και $B_e=2288.6$ €/kW (Πίνακας 5.12) και οι συντελεστές κόστους απωλειών είναι $A=8583$ €/kW και $B=1341.7$ €/kW (Πίνακας 5.8). Ο μετασχηματιστής αναφοράς έχει $NLL_r=1.1$ kW και $LL_r=10.5$ kW.	188
Πίνακας 5.14	Ανάλυση ευαισθησίας: αποκλίσεις TOC_e (% του TOC_e της βάσης μελέτης) βασισμένες στη διαφοροποίηση των τιμών των έξι παραμέτρων.	190
Πίνακας 5.15	Δεδομένα εισόδου για τον υπολογισμό των συντελεστών A , B , A_e και B_e , για την καμπύλη φόρτισης του βιομηχανικού, αγροτικού και τουριστικού καταναλωτή.	192
Πίνακας 5.16	Αποτελέσματα του TOC_e για κάθε είδος φορτίου για τους τρεις μετασχηματιστές προσφοράς.	193
Πίνακας 6.1	Τεχνικές παράμετροι και έτη θερμικής αντοχής μετασχηματιστών που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστης επιλογής μεγέθους.	218
Πίνακας 6.2	Κόστη επιλεγμένων τόξων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.7.	220
Πίνακας 6.3	Αποτελέσματα της προτεινόμενης τεχνικής EAS για την επιτυχή επίλυση του προβλήματος επιλογής μεγέθους μετασχηματιστή το οποίο αφορά το Σχήμα 6.7.	221

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Βασικός στόχος της διδακτορικής διατριβής είναι η εξοικονόμηση ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία θα επιτευχθεί με την προδιαγραφή, την επιλογή και την εγκατάσταση στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας των πλέον οικονομικών και ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών, χρησιμοποιώντας τα ενιαία μοντέλα εκτίμησης κόστους κατασκευής και λειτουργίας μετασχηματιστών, που αναπτύσσονται στα πλαίσια της συγκεκριμένης διατριβής.

1.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ – ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

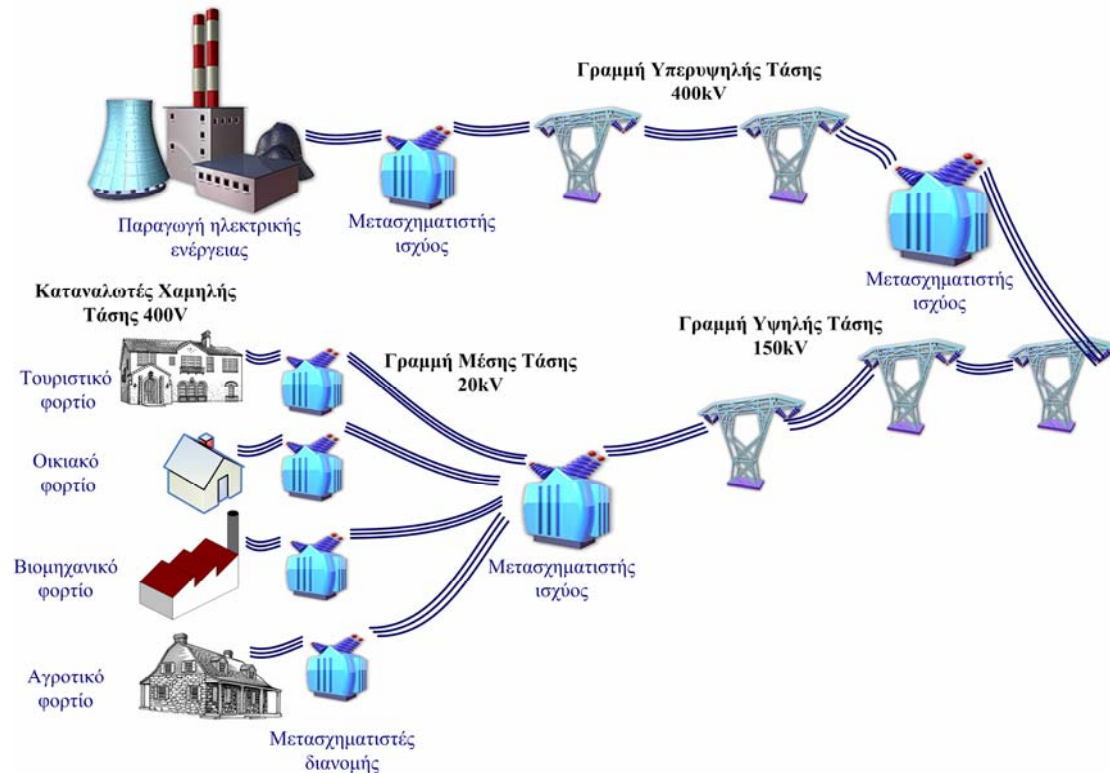
Το μέλλον βασίζεται όλο και περισσότερο στον ηλεκτρισμό, υποκινούμενο από την αυξανόμενη ζήτηση, τις νέες μορφές παραγωγής ενέργειας, τις νέες εφαρμογές και τα συστήματα που συνεχώς ολοκληρώνονται και αναπτύσσονται. Ζούμε την αυγή μιας νέας εποχής, όπου η ηλεκτρική ενέργεια και ο αυτοματισμός συγκλίνουν.

Οι μετασχηματιστές συνιστούν μια τέτοια τεχνολογία που έχει βρει πολλαπλές και ποικίλες εφαρμογές εδώ και πολλές δεκαετίες. Καλύπτουν ανάγκες μιας ευρείας κατηγορίας εγκαταστάσεων, από τις πλέον μεγάλες, όπως ηλεκτρικοί υποσταθμοί, και από τις πλέον μικρές όπως οι οικιακές ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές. Καθοριστική είναι η ύπαρξη των μετασχηματιστών στην ανύψωση και στον υποβιβασμό της τάσης για τα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία ως γνωστό, είναι εξαιρετικά εκτεταμένα και καλύπτουν τα κέντρα κατανάλωσης του ηλεκτρικού δικτύου διανομής (Σχήμα 1.1).

Αναλυτικότερα, ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) αποτελείται από ένα σύνολο εγκαταστάσεων και μέσων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας στις περιοχές κατανάλωσης. Η τελική τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει την ύπαρξη τριών λειτουργιών του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας: την Παραγωγή, τη Μεταφορά και τη Διανομή. Το σύστημα παραγωγής περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής, και τους υποσταθμούς ανύψωσης της τάσης, για τη μεταφορά της ισχύος υπό υψηλή τάση. Η ηλεκτρική ενέργεια, από την παραγωγή της μέχρι την κατανάλωσή της, βρίσκεται σε συνεχή ροή και, στο βαθμό που δεν μπορεί να αποθηκευτεί, πρέπει να παράγεται ακριβώς όποτε χρειάζεται η κατανάλωση. Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων, τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων τάσεων του δικτύου, και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης σε μέση τάση, για την τροφοδότηση των δικτύων διανομής. Το σύστημα διανομής περιλαμβάνει τα δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης, στα οποία υπάγονται και οι υποσταθμοί διανομής μέσω των οποίων γίνεται ο υποβιβασμός της μέσης τάσης σε χαμηλή.

Βάσει των παραπάνω γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η ηλεκτρική ενέργεια περνάει από διάφορα στάδια πριν καταναλωθεί, με τους μετασχηματιστές να αποτελούν ένα αναπόσπαστο τμήμα των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, ένας μεγάλος αριθμός μετασχηματιστών διαφορετικών κατηγοριών και μεγεθών απαιτούνται στα δίκτυα μεταφοράς

και διανομής, με ένα ευρύ φάσμα τάσεων λειτουργίας. Οι μεγάλοι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται για τις υψηλές τάσεις ονομάζονται μετασχηματιστές συστήματος ή ισχύος (*power/system transformers*), ενώ η τελική μετατροπή στη βασική τάση των καταναλωτών χαμηλής τάσης γίνεται μέσω των μετασχηματιστών διανομής (*distribution transformers*).



Σχήμα 1.1 Γενική επισκόπηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Παράλληλα, η διαδικασία απελευθέρωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και ιδιωτικοποίησης των ηλεκτρικών εταιρειών έχει δημιουργήσει ένα νέο, ανταγωνιστικό περιβάλλον στην παγκόσμια αγορά ενέργειας. Σε αυτό το νέο και ενδιαφέρον περιβάλλον, εμφανίζεται στη βιομηχανία παραγωγής μετασχηματιστών η ανάγκη βελτίωσης της απόδοσης και αξιοπιστίας των μετασχηματιστών τους και μείωσης του κόστους τους.

Η μείωση του κόστους των μετασχηματιστών επιτυγχάνεται κυρίως με την τεχνική και οικονομική βελτιστοποίηση της σχεδιάσής τους. Συγκεκριμένα, ο κύριος στόχος του σχεδιαστή μετασχηματιστών είναι να καθορίσει όλες τις διαστάσεις του μετασχηματιστή, βασιζόμενος σε προκαθορισμένα χαρακτηριστικά (προδιαγραφή μετασχηματιστή), χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα υλικά που του εξασφαλίζουν μικρότερο κόστος, λιγότερο βάρος, μικρότερο μέγεθος και πολύ καλές επιδόσεις λειτουργίας.

Παράλληλα, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι σημερινές ανάγκες της βιομηχανίας επιτάσσουν την κατασκευή μεγάλης ποικιλίας τύπων μετασχηματιστών, οι οποίοι δεν εντάσσονται σε τυποποιημένες κατασκευές μεγάλης κλίμακας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι εμπειρικοί τρόποι υπολογισμού των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών τους δεν παρέχουν ικανοποιητική ακρίβεια, καθώς αφορούν σε συγκεκριμένες γεωμετρίες. Επιπλέον, ο περιορισμένος χρόνος παράδοσης των παραγγελιών καθιστά δύσκολη την πειραματική επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών των παραγόμενων μετασχηματιστών, με αποτέλεσμα την αύξηση της πιθανότητας υπέρβασης των προδιαγεγραμμένων ορίων σε πολύ σημαντικές παραμέτρους όπως για παράδειγμα η τιμή της αυτεπαγωγής σκέδασης και της αντίστοιχης τάσης βραχυκύκλωσης. Δεδομένου ότι οι παράμετροι αυτές είναι μείζονος σημασίας για την αξιοπιστία και τη λειτουργία του μετασχηματιστή, στα πλαίσια των διεθνών κανονισμών, είναι επιτακτική η ανάγκη βελτίωσης της ακρίβειας της χρησιμοποιούμενης μεθοδολογίας σχεδιάσής τους.

Ταυτόχρονα, η κλιματική αλλαγή, ως αποτέλεσμα της αύξησης των αερίων του θερμοκηπίου, απειλεί την ευστάθεια του παγκόσμιου κλίματος, της οικονομίας και των κοινωνιών. Περισσότερο από τα δύο τρίτα των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα προέρχονται από τον τρόπο που ο άνθρωπος χρησιμοποιεί την ενέργεια. Στα πλαίσια του πρωτοκόλλου του Κυότο, βάσει του οποίου έχουν επιβληθεί μέτρα περιορισμού των εκπομπών για τα αέρια που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου σε διεθνές επίπεδο, η ανάγκη για μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι επιτακτική. Η χρησιμοποίηση μετασχηματιστών χαμηλών απωλειών βοηθάει στη προστασία του περιβάλλοντος, ενώ παράλληλα μπορεί να είναι και οικονομικά αποδοτικότεροι, αν ποσοτικοποιηθεί το περιβαλλοντικό κόστος των απωλειών τους.

Υπό την πίεση των αυξανόμενων ενεργειακών απαιτήσεων και των κλιματικών αλλαγών, το θέμα της βέλτιστης σχεδίασης των μετασχηματιστών καθώς και τις οικονομικές τους αξιολόγησης είναι αντικείμενα συνεχούς μελέτης και έχουν απασχολήσει πολλούς ερευνητές στην ελληνική και ξένη βιβλιογραφία. Τα συγκεκριμένα προβλήματα αποτελούν και το κύριο αντικείμενο έρευνας της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής.

1.2 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Η πολυπλοκότητα της σχεδίασης του μετασχηματιστή απαιτεί αξιόπιστες και ακριβείς μεθόδους επίλυσης, ενώ εξαρτάται από πληθώρα παραμέτρων οι οποίες σχετίζονται τόσο με τα εγγενή χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή όσο και με τα χαρακτηριστικά του σημείου στο οποίο εγκαθίσταται και των φορτίων που θα εξυπηρετήσει. Στην παρούσα ενότητα διεξάγεται βιβλιογραφική ανασκόπηση [1.1], η έκταση της οποίας αναδεικνύει το αμείωτο ενδιαφέρον των ερευνητών στην εφαρμογή προηγμένων τεχνικών για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης των μετασχηματιστών, είτε μέσω μελέτης συγκεκριμένων χαρακτηριστικών τους είτε μέσω της συνολικής αντιμετώπισης του προβλήματος της σχεδίασης. Το ενδιαφέρον της έρευνας στρέφεται επίσης και στη βελτιστοποίηση του λειτουργικού κόστους των μετασχηματιστών, δηλαδή του κόστους απωλειών κατά τη διάρκεια ζωής τους, το οποίο επηρεάζει τόσο τη βέλτιστη σχεδίασή τους όσο και τη βέλτιστη επιλογή του ονομαστικού μεγέθους των μετασχηματιστών προς εγκατάσταση σε ένα δίκτυο. Με βάση τα παραπάνω κριτήρια, η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας διαιρείται σε τρεις κατηγορίες:

- τον υπολογισμό των κύριων τεχνικών χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή
- τη βελτιστοποίηση της συνολικής σχεδίασης των μετασχηματιστών με χρήση μοντέλων κόστους κατασκευής και κόστους λειτουργίας και
- τη βέλτιστη επιλογή μεγέθους μετασχηματιστών.

1.2.1 Υπολογισμός Κύριων Τεχνικών Χαρακτηριστικών Μετασχηματιστή

Η κατασκευή του μετασχηματιστή αποτελεί πολύπλοκη διαδικασία κατά την οποία οι μηχανικοί καλούνται να διασφαλίσουν υψηλή απόδοση και συμβατότητα με τα διεθνή πρότυπα, διατηρώντας παράλληλα χαμηλό κατασκευαστικό κόστος. Συνεπώς, κατά τη σχεδίαση του μετασχηματιστή πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ένα σύνολο παραμέτρων και τεχνικών περιορισμών που διαμορφώνουν την απόδοσή του. Στη συνέχεια, περιγράφεται η έρευνα που αφορά στον υπολογισμό και τη βελτιστοποίηση των κύριων τεχνικών χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή.

1.2.1.1 Απώλειες Κενού Φορτίου

Αναμφισβήτητα, οι απώλειες κενού φορτίου αποτελούν ένα από τα δυσκολότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι σχεδιαστές μετασχηματιστών. Οι συγκεκριμένες απώλειες, οι οποίες λαμβάνουν χώρα στο υλικό του πυρήνα (για το λόγο αυτό αποκαλούνται και απώλειες πυρήνα ή απώλειες σιδήρου) διακρίνονται σε απώλειες υστέρησης (*hysteresis losses*) και απώλειες δινωρρευμάτων (*eddy current losses*). Οι απώλειες υστέρησης οφείλονται στην τάση του υλικού να συγκρατήσει το μαγνητισμό, φαινόμενο το οποίο

ονομάζεται μαγνητική υστέρηση. Εξαιτίας της χρονικά μεταβαλλόμενης ροής αναπτύσσονται τάσεις από επαγωγή (νόμος *Faraday*), οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα την κυκλοφορία ρευμάτων (δινორρευμάτων) στο εσωτερικό του υλικού. Τα ρεύματα αυτά προκαλούν απώλειες Joule, υπό μορφή θερμότητας, που ονομάζονται απώλειες δινორρευμάτων. Οι συνολικές απώλειες πυρήνα είναι ίσες με το άθροισμα των απωλειών υστέρησης και δινორρευμάτων. Οι συγκεκριμένες απώλειες είναι σταθερές και ανεξάρτητες του φορτίου αλλά εξαρτημένες από ένα μεγάλο σύνολο σημαντικών παραμέτρων όπως για παράδειγμα από τον τύπο του μαγνητικού υλικού, το πάχος και το βάρος του μαγνητικού υλικού, τη συχνότητα και τη μαγνητική επαγωγή. Φυσικά υπάρχουν και άλλοι παράγοντες μικρότερης σημασίας που επηρεάζουν τις απώλειες κενού φορτίου όπως για παράδειγμα το είδος της μόνωσης των ελασμάτων, η ανόπτηση, η κατασκευή του πυρήνα και η ποιότητα συναρμολόγησής του. Οι απώλειες πυρήνα εμφανίζονται όταν ο μετασχηματιστής είναι υπό τάση. Κατά συνέπεια αντιπροσωπεύουν μια σταθερή και επομένως σημαντική απώλεια ενέργειας για το ηλεκτρικό σύστημα. Συνεπώς, για ένα μετασχηματιστή που είναι καθημερινά υπό τάση (ενεργοποιημένος), οι απώλειες κενού φορτίου είναι σταθερές και καταναλώνονται καθημερινά, 24 ώρες το 24ωρο, 365 μέρες το χρόνο. Από τη στιγμή που οι απώλειες κενού φορτίου είναι σταθερές για ολόκληρη τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή, συνήθως 25-30 χρόνια, οι απώλειες κενού φορτίου προκαλούν το ειδικό ενδιαφέρον των ηλεκτρικών εταιριών, οι οποίες συνεχώς αναζητούν τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας. Για παράδειγμα, αναφέρεται ότι στο ελληνικό σύστημα, η ΔΕΗ διαθέτει περί τους 140000 μετασχηματιστές διανομής, που με ένα μέσο ύψος απωλειών κενού φορτίου 400 W/μετασχηματιστή ισοδυναμούν με απαιτήσεις ισχύος 56 MW ή απαιτήσεις ενέργειας περίπου 490 GWh/έτος. Από το παράδειγμα αυτό, καθίσταται προφανές ότι μία οποιαδήποτε προσπάθεια μείωσης των απωλειών αυτών αξίζει ιδιαίτερης προσοχής.

Οι μέθοδοι που προτείνονται στη βιβλιογραφία για τον ακριβή προσδιορισμό των απωλειών κενού φορτίου ανήκουν στις ακόλουθες κατηγορίες: i) αριθμητικές μέθοδοι, ii) μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης, iii) κυκλωματικά μοντέλα, τα οποία αποτελούν επεκτάσεις ή βελτιώσεις του κλασικού ισοδυνάμου κυκλώματος του μετασχηματιστή και iv) μέθοδοι οι οποίες στηρίζονται στην αξιοποίηση πειραματικών δεδομένων.

Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) αποτελεί μια από της δημοφιλέστερες τεχνικές που έχουν εφαρμοστεί για την πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου. Η εφαρμογή της δισδιάστατης ΜΠΣ στον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα του μετασχηματιστή περιγράφεται στις [1.2][1.3], όπου αναπτύσσονται κατάλληλα εργαλεία υπολογισμού των απωλειών λόγω δινორρευμάτων και υστέρησης. Επίσης, αναλυτικά μοντέλα ΜΠΣ των μαγνητικών ιδιοτήτων του πυρήνα βάσει δεδομένων μετρήσεων παρουσιάζονται στις [1.4]-[1.8]. Για την επίτευξη λεπτομερέστερων αναλύσεων και ακριβέστερου υπολογισμού του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή, η ανάπτυξη τρισδιάστατης ΜΠΣ μπορεί να κριθεί απαραίτητη, όπως προτείνεται στην [1.9]. Συνδυασμοί της ΜΠΣ με άλλες μεθόδους για την ανάλυση απωλειών κενού φορτίου έχουν προταθεί από διάφορους ερευνητές, όπως από τον Korpicar [1.10], ο οποίος περιγράφει με λεπτομέρεια στατιστική ανάλυση σε συνδυασμό με δισδιάστατα μοντέλα ΜΠΣ για την ποσοτικοποίηση της επίδρασης διάφορων παραγόντων οι οποίοι επηρεάζουν τις απώλειες στα ελάσματα στήριξης που τοποθετούνται στο εξωτερικό μέρος των πυρήνων σε μετασχηματιστές ισχύος (*flitch plates*) καθώς και τα αποτελέσματα προσομοίωσης τρισδιάστατης ΜΠΣ σε διάφορες γεωμετρίες τέτοιων ελασμάτων. Επίσης, αρκετοί συγγραφείς στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν διεξάγει αναλυτική μελέτη χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου με στόχο τη κατανόηση του ρόλου των ενώσεων στον πυρήνα, ο οποίος καθορίζει την απόδοση των μετασχηματιστών ισχύος και διανομής [1.11], καθώς επίσης και για τον ακριβή υπολογισμό της τρισδιάστατης κατανομής απωλειών, των επιμέρους συνιστωσών και των συνολικών απωλειών κενού φορτίου στους μετασχηματιστές ισχύος τύπου στοιβαχτού πυρήνα [1.12][1.13].

Επιπροσθέτως, αρκετές εργασίες [1.14]-[1.21] διερεύνησαν την τοπική κατανομή της μαγνητικής ροής στους πυρήνες των μετασχηματιστών ως συνάρτηση της σχεδίασης των ενώσεων του πυρήνα και της συμπεριφοράς του στις απώλειες ισχύος και στο θόρυβο. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρά το γεγονός ότι τα διάκενα (*air gaps*) μεταξύ των πυρήνων έχουν

αναλυθεί αρκετά χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, σπάνια λαμβάνονται υπόψη σε κυκλωματικά μοντέλα [1.22], γεγονός που καταδεικνύει ένα βασικό πλεονέκτημα των αριθμητικών μεθόδων, δηλαδή τη δυνατότητα λεπτομερούς αναπαράστασης των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών του πυρήνα.

Η εφαρμογή μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης στην εκτίμηση των απωλειών κενού φορτίου περιγράφεται στις [1.23][1.24], όπου υλοποιείται πρόβλεψη των συγκεκριμένων απωλειών ως συνάρτηση των κατασκευαστικών παραμέτρων του πυρήνα χρησιμοποιώντας Τεχνητά Νευρωνικά δίκτυα. Στις εργασίες [1.25][1.26] χρησιμοποιήθηκε η συγκεκριμένη τεχνική για να μειωθούν οι απώλειες του πυρήνα κατά τη συναρμολόγηση των μετασχηματιστών ενώ παράλληλα πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας των ατομικών πυρήνων χρησιμοποιώντας μεθόδους Taguchi. Ακόμη, στην εργασία [1.27] παρουσιάζεται συνδυασμός τριών μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης, δηλαδή τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, δέντρα απόφασης, και γενετικοί αλγόριθμοι, για να ελαχιστοποιήσουν τις απώλειες πυρήνα κατά την κατασκευή των μετασχηματιστών διανομής τύπου τυλιγμένου πυρήνα.

Οι Elleuch και Poloujadoff [1.28] αναπτύσσουν προηγμένα ισοδύναμα κυκλωματικά μοντέλα προκειμένου να υπολογίσουν με ακρίβεια τις απώλειες. Επίσης, οι συγγραφείς της [1.29] προτείνουν ένα ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο επαρκούς ακρίβειας, συνδυάζοντας τις κατανομές των απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων. Επιπροσθέτως, ο Adly [1.30] παρουσιάζει μια αναλυτική έρευνα που αφορά διάφορες απώλειες μετασχηματιστών, οι οποίες προέρχονται από ημι-περιστροφικές συνιστώσες της ροής διέγερσης (*semi-rotating flux excitation*). Στόχος της έρευνας αυτής είναι η ακριβής αναπαράσταση και προσομοίωση των μαγνητικών ιδιοτήτων του πυρήνα με χρήση των μοντέλων υστέρησης Preisach.

Για την ακριβή αναπαράσταση των απωλειών υστέρησης και των απωλειών ισχύος στις λαμαρίνες των μετασχηματιστών προτείνονται κατάλληλα μοντέλα χρησιμοποιώντας πειραματικές μεθόδους, οι οποίες συνδυάζουν δεδομένα τα οποία προέρχονται από αναλυτικές μετρήσεις [1.31][1.32]. Ειδικότερα, ο Moses [1.33] κατέγραψε πειραματικά αποτελέσματα της πυκνότητας του πεδίου και των απωλειών σε μοντέλα πυρήνων και τα σύγκρινε με δεδομένα τα οποία προερχόντουσαν από ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στους ίδιους πυρήνες. Οι Girgis et al. [1.34] διεξήγαγαν αναλυτική πειραματική μελέτη σε μια προσπάθεια να καταγράψουν την επιρροή ορισμένων ιδιοτήτων του πυρήνα κατά τη διαδικασία παραγωγής του. Οι Albach et al. [1.35] παρουσίασαν μια πρακτική μέθοδο πρόβλεψης των απωλειών πυρήνα για τυχαία κυματομορφή ρεύματος μαγνήτισης. Επίσης, ο Dolinar [1.36] καθόρισε ένα μη γραμμικό μαγνητικό μοντέλο πυρήνα ενός τριφασικού τρίποδου μετασχηματιστή και τον σύγκρινε με τον κλασσικό σιδηρομαγνητικό πυρήνα [1.37].

Στα πλαίσια της πειραματικής διερεύνησης των απωλειών σιδήρου, πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει τις περιστροφικές συνιστώσες των απωλειών σιδήρου (*rotational iron losses*) και αρκετές μέθοδοι έχουν περιγραφεί που καταγράφουν και αξιοποιούν τα σχετικά δεδομένα μετρήσεων. Οι Stranges και Findlay [1.38] περιέγραψαν ένα μηχανισμό προσδιορισμού των απωλειών κενού φορτίου εξαιτίας της περιστροφικής συνιστώσας της ροής (*rotational flux*). Επίσης, οι Findlay et al. [1.39] και οι Davies και Moses [1.40] έχουν διεξάγει πειράματα σε διάφορα δοκίμια με στόχο τον έλεγχο της υπόθεσης ότι διαφορετικοί τρόποι στοίβαξης (*stacking patterns*) των ελασμάτων των πυρήνων κατευθυνόμενων κόκκων μπορούν να μειώσουν τις απώλειες σιδήρου σε μετασχηματιστές ισχύος. Επιπλέον, οι Marketos και Meydan [1.41] εισήγαγαν μία καινοτομική μέθοδο στοίβαξης μαγνητικής λαμαρίνας σε πυρήνες μονοφασικών μετασχηματιστών, η οποία μέθοδος μπορεί να βελτιώσει σημαντικά το χρόνο παραγωγής τους και να μειώσει το ποσοστό της ροής η οποία διαφεύγει από την κατεύθυνση τύλιξης (*rolling direction*) στις γωνίες των πυρήνων.

1.2.1.2 Απώλειες Φορτίου

Οι απώλειες φορτίου των μετασχηματιστών, είναι το μέρος εκείνο των απωλειών που παράγονται από το ρεύμα του φορτίου και μεταβάλλονται με το τετράγωνο του ρεύματος αυτού. Χωρίζονται σε 3 κατηγορίες: 1) απώλειες αντίστασης στα τυλίγματα των αγωγών, 2) απώλειες δινορρευμάτων στα τυλίγματα των αγωγών, 3) απώλειες δινορρευμάτων στα

δομικά μέρη του μετασχηματιστή (δοχείο, τοιχώματα κ.τ.λ.). Δεδομένου ότι τα τυλίγματα των μετασχηματιστών κατασκευάζονται κατά κανόνα από χαλκό, οι απώλειες αυτές αναφέρονται και ως απώλειες χαλκού.

Οι Kulkarni και Kharparde [1.42] έχουν διεξάγει βιβλιογραφική ανασκόπηση περίπου 50 εργασιών. Η συγκεκριμένη ανασκόπηση επικεντρώνεται στις απώλειες δινορρευμάτων σε ένα ή περισσότερα εξαρτήματα του μετασχηματιστή, έχοντας ως στόχο την αξιολόγηση και μείωση τους. Σε αυτήν την περίπτωση, οι απώλειες δινορρευμάτων αφορούν απώλειες Joule στα τυλίγματα των αγωγών, απώλειες στις ακμές του πυρήνα, απώλειες εξαιτίας υψηλού μαγνητικού πεδίου, απώλειες στα τοιχώματα και το δοχείο του μετασχηματιστή. Επίσης, οι Krawczyk και Turowski [1.43] πραγματοποίησαν μια μικρής έκτασης μεθοδολογική ανασκόπηση υπογραμμίζοντας την ανάγκη για λεπτομερή ανάλυση των δινορρευμάτων στις ηλεκτρικές μηχανές.

Επίσης, όπως και στην περίπτωση απωλειών κενού φορτίου, η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μια συνηθισμένη μέθοδο για υπολογισμό των δινορρευμάτων [1.44][1.45]. Οι Pern και Yeh [1.46] ασχολήθηκαν με τη διατύπωση μιας μεθοδολογίας πεπερασμένων στοιχείων βασισμένης σε διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό (A-V) για την προσομοίωση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και την κατανομή του ρεύματος στα τυλίγματα των μετασχηματιστών ισχύος με μη αμελητέο ρεύμα κυκλοφορίας. Επίσης, ο Ram [1.47] αξιολόγησε τις απώλειες δινορρευμάτων σε τυλίγματα τύπου ταινίας (*foil windings*). Ακόμη, στην αναφορά [1.48] αναλύεται το πεδίο δινορρευμάτων τόσο λόγω των τυλιγμάτων όσο και των μπαρών υψηλού ρεύματος στους μετασχηματιστές ισχύος χρησιμοποιώντας βελτιωμένη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων με βάση το βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό (T-Ω). Τέλος, όταν ένας τριφασικός τρίποδος μετασχηματιστής υπόκειται σε δοκιμή μέτρησης απωλειών φορτίου, βρίσκεται ότι οι απώλειες και τα ρεύματα των φάσεων είναι ασύμμετρα (και άνισα). Η αναφορά [1.49] προσπαθεί να δώσει μια κατανοητή εξήγηση για την προαναφερθείσα ασυμμετρία των τιμών των απωλειών στις τρεις φάσεις κατά τη διάρκεια της δοκιμής φορτίου. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα αναλύεται ένα τριφασικός μετασχηματιστής χρησιμοποιώντας τρισδιάστατη ανάλυση βάσει των πεπερασμένων στοιχείων.

1.2.1.3 Πεδίο Σκέδασης και Τάση βραχυκύκλωσης

Ο υπολογισμός του πεδίου σκέδασης αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για τον προσδιορισμό της επαγωγικής αντίδρασης, της τάσης βραχυκύκλωσης, των δυνάμεων που ασκούνται κατά το βραχυκύκλωμα και των απωλειών λόγω δινορρευμάτων.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων έχει χρησιμοποιηθεί κατά κόρον για την αξιολόγηση του πεδίου σκέδασης. Οι πρώτες ερευνητικές προσπάθειες παρουσιάστηκαν πριν περίπου τρεις δεκαετίες [1.50] και εστιάζονταν σε δισδιάστατη μοντελοποίηση εξαιτίας των περιορισμένων επιδόσεων των υπολογιστών εκείνης της εποχής. Η δισδιάστατη μοντελοποίηση χρησιμοποιώντας την τεχνική των πεπερασμένων στοιχείων παρέμεινε ένα αποτελεσματικό και αξιόπιστο εργαλείο για την αξιολόγηση του πεδίου σκέδασης και της τάσης βραχυκύκλωσης και σε πιο πρόσφατες ανακαλύψεις στη πρόβλεψη των συγκεκριμένων παραμέτρων [1.51]. Παρόλα αυτά, αν και η δισδιάστατη μοντελοποίηση είναι χρήσιμη και εύκολα υλοποιήσιμη σε ορισμένα προβλήματα σχεδίασης, παρουσιάζει αδυναμίες στη λεπτομερή ανάλυση και υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου του μετασχηματιστή, με αποτέλεσμα η τρισδιάστατη μοντελοποίηση να αποτελεί μονόδρομο [1.52]-[1.56]. Η μέθοδος των οριακών στοιχείων αποτελεί μια ακόμη αριθμητική μέθοδο η οποία είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη στα ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα [1.57]. Το κύριο πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθοδολογίας είναι η υψηλή ακρίβεια καθώς επίσης και η ευκολία ορισμού των αναγκαίων δεδομένων για την επίλυση ενός προβλήματος. Επιπροσθέτως, ο συνδυασμός των πεπερασμένων στοιχείων με τη μέθοδο των οριακών στοιχείων αποτελεί μια ακόμη πολύ γνωστή και ταυτόχρονα ευρέως χρησιμοποιημένη τεχνική αριθμητικής ανάλυσης παρουσιάζοντας σπουδαία πλεονεκτήματα στο χώρο της μοντελοποίησης του πεδίου σκέδασης του μετασχηματιστή [1.58][1.59].

Για την αποφυγή των κύριων μειονεκτημάτων των αριθμητικών μεθόδων, δηλαδή την πολυπλοκότητα στην απόκτηση του απαιτούμενου πλέγματος, ειδικά στις τρισδιάστατες γεωμετρίες, έχουν προταθεί εναλλακτικά μοντέλα αξιολόγησης του πεδίου σκέδασης κάνοντας χρήση ενός τρισδιάστατου δικτύου μαγνητικών αντιστάσεων (*reluctance network*) [1.60], το οποίο ανήκει στην κατηγορία των ισοδύναμων κυκλωμάτων. Μια εναλλακτική μέθοδος υπολογισμού του πεδίου σκέδασης βασίζεται σε απλοποιημένες αναλυτικές εξισώσεις [1.61][1.62], η οποία συχνά εφαρμόζεται από τους κατασκευαστές μετασχηματιστών ώστε να απλοποιήσουν την πολυπλοκότητα αλλά και να ελαχιστοποιήσουν το χρόνο τον υπολογισμών που απαιτούνται σε μια αυτοματοποιημένη διαδικασία σχεδίασης.

Τέλος, εφαρμόζονται και στοχαστικές μέθοδοι για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων, όπως αναφέρουν οι Thilagar και Rao [1.63] οι οποίοι προτείνουν ένα συγκεκριμένο ισοδύναμο κυκλωματικό μοντέλο για την αξιολόγηση όλων των παραμέτρων που εμπλέκονται στη τάση βραχυκύκλωσης χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των γενετικών αλγορίθμων. Επιπλέον, η προτεινόμενη μέθοδος εκτιμά γεωμετρικά μία ακόμη σύνθετη παράμετρο, την αμοιβαία επαγωγή μεταξύ των δευτερευόντων και τριτευόντων τυλιγμάτων.

1.2.1.4 Καταπόνηση και Δυναμική Συμπεριφορά υπό Βραχυκύκλωμα

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης στο μετασχηματιστή δημιουργεί τεράστιες δυνάμεις στις σπείρες των τυλιγμάτων. Σε ένα μετασχηματιστή ισχύος το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι περίπου 8 με 10 φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό και σε ένα μετασχηματιστή διανομής είναι περίπου 20 με 25 φορές μεγαλύτερο από το ονομαστικό. Οι δυνάμεις στα τυλίγματα εξαιτίας του ρεύματος βραχυκύκλωσης μεταβάλλονται με το τετράγωνο του ρεύματος, επομένως, ενώ οι δυνάμεις που ασκούνται στο ονομαστικό ρεύμα μπορεί να είναι μόλις μερικά Newton, κάτω από συνθήκες βραχυκυκλώματος αυτές οι δυνάμεις μπορεί να είναι δεκάδες χιλιάδες Newton. Αυτές οι μηχανικές και θερμικές καταπονήσεις στα τυλίγματα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διάρκεια σχεδίασης του μετασχηματιστή. Η συμπεριφορά του μετασχηματιστή κάτω από συνθήκες βραχυκυκλώματος αποτελεί ένα από τα κυριότερα προβλήματα κατά τη διάρκεια της σχεδίασής του, δεδομένου ότι η ικανότητα να ξεπεράσει τις επικείμενες καταπονήσεις και ρεύματα για εξωτερικά και εσωτερικά σφάλματα για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο χωρίς να υποστεί σοβαρές επιπτώσεις κατά τη λειτουργία του συχνά αποτελεί απαίτηση διεθνών τεχνικών προτύπων. Η ακριβής αναπαράσταση της συγκεκριμένης συμπεριφοράς επιτυγχάνεται κυρίως μέσω αριθμητικών μεθόδων, εξαιτίας της υπεροχής τους στο λεπτομερή υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου [1.64]-[1.69]. Επίσης, χρησιμοποιούνται ισοδύναμα κυκλώματα, παρόλο που η εφαρμογή τους γίνεται συνήθως μαζί με αριθμητικές μεθόδους [1.70], ώστε να διασφαλιστεί καλύτερη αναπαράσταση των φαινομένων που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων.

1.2.1.5 Θόρυβος Μετασχηματιστή

Οι μετασχηματιστές που βρίσκονται κοντά σε κατοικημένες περιοχές πρέπει να έχουν επίπεδα θορύβου όσο το δυνατόν χαμηλότερα. Η σχεδίαση και η κατασκευή ενός μετασχηματιστή με χαμηλό επίπεδο θορύβου απαιτεί ανάλυση σε βάθος όλων των πηγών θορύβου. Οι κύριοι παράγοντες που προκαλούν θόρυβο είναι οι πυρήνες, τα τυλίγματα και ο εξοπλισμός ψύξης του μετασχηματιστή, με τους πυρήνες να αποτελούν και τη σημαντικότερη πηγή θορύβου. Για τον καθορισμό μιας μεθόδου βέλτιστης σχεδίασης μετασχηματιστή χαμηλού θορύβου, οι αναφορές [1.71][1.72] αναλύουν ποσοτικά την εξασθένηση θορύβου ενός πρωτότυπου μετασχηματιστή ο οποίος χρησιμοποιεί πυρήνες τύπου C (δηλαδή τυλιγμένους πυρήνες, σε αντιπαράθεση με τους στοιβαχτούς πυρήνες τύπου EI) βάσει ισοδύναμων κυκλωμάτων ανάλυσης. Παρόμοια μελέτη παρουσιάζεται και στην [1.73]. Τέλος, μια πρόσφατη ιδέα αναπτύσσεται στην αναφορά [1.74], βάσει της οποίας μοντελοποιείται στον υπολογιστή ο έλεγχος του φορτίου και κατά επέκταση του θορύβου που δημιουργείται εξαιτίας του χρησιμοποιώντας ένα τριφασικό μετασχηματιστή ο οποίος διαθέτει ως μονωτικό ορυκτό λάδι. Οι εξισώσεις επιλύονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και της τεχνικής των οριακών στοιχείων.

1.2.1.6 Μόνωση Μετασχηματιστή

Η μόνωση του μετασχηματιστή συνδέεται με την ικανότητα να αντέχει μεταβατικά φαινόμενα και υπερτάσεις που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Για το σκοπό αυτό, η σχετική έρευνα προσπαθεί να αντιμετωπίσει με επιτυχία την ανάλυση τέτοιων φαινομένων, έτσι ώστε να σχεδιαστεί ένας μετασχηματιστής με επαρκή μόνωση. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν τη γήρανση των μονωτικών είναι οι δονήσεις ή οι μηχανικές καταπονήσεις, επαναλαμβανόμενη θλίψη και εφελκυσμός, έκθεση σε υγρασία, ηλεκτρικές και μηχανικές καταπονήσεις λόγω υπέρτασης και ρεύμα βραχυκύκλωσης.

Οι αριθμητικές μέθοδοι είναι αυτές που εφαρμόζονται πιο σπάνια για την προσομοίωση των παραπάνω φαινομένων και οι οποίες χρησιμοποιούνται κυρίως για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου του μετασχηματιστή [1.75]. Από την άλλη μεριά, η πλειοψηφία των ερευνών για την ανάλυση των μετασχηματιστών υπό βραχυκύκλωμα βασίζεται στην αναπαράσταση με ισοδύναμα κυκλώματα, ανάλογα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους [1.76], τη δυναμική τους συμπεριφορά [1.77], τα χαρακτηριστικά απόκρισης της συχνότητας [1.78] ή τα χαρακτηριστικά του δικτύου στο οποίο συνδέονται [1.79]. Στις αναφορές [1.80][1.81] πραγματοποιούνται περαιτέρω προσπάθειες για να μοντελοποιηθεί η δομή των μονώσεων των μετασχηματιστών και να γίνει ποσοτική ανάλυση των διηλεκτρικών αντοχών τους. Τέλος, μια ακόμη μέθοδος για τη σωστή σχεδίαση των μονωτικών και την πρόβλεψη της αντοχής τους σε κάθε μεταβατικό φαινόμενο κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή αποτελεί η αξιοποίηση των μετρήσεων και της εμπειρικής καταγραφής της επίδρασης των λειτουργικών χαρακτηριστικών κατά τον προσδιορισμό των διαστάσεων και του είδους των μονωτικών υλικών [1.82].

1.2.1.7 Ψύξη Μετασχηματιστή

Μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους για την επέκταση του χρόνου ζωής του μετασχηματιστή είναι αναμφισβήτητο ο τρόπος ψύξης του. Η συνολική θερμοκρασία του είναι το άθροισμα της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και της ανύψωσης θερμοκρασίας στο μονωτικό λάδι και τα τυλίγματα. Η ανύψωση θερμοκρασίας σε ένα μετασχηματιστή είναι εγγενές χαρακτηριστικό του υπό σταθερό και δεδομένο φορτίο. Η σχεδίαση του συστήματος ψύξης του μετασχηματιστή πραγματοποιείται με βάση την ανώτατη τιμή θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στα τυλίγματα (*hot-spot temperature*), για την πρόβλεψη της οποίας προτείνονται διάφορες μέθοδοι στη διεθνή βιβλιογραφία καθώς επίσης και τη συνολική κατανομή θερμοκρασίας, ανάλογα με τη μέθοδο ψύξης του μετασχηματιστή.

Για του μετασχηματιστές ξηρού τύπου, ο Pierce [1.83] προτείνει τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών προκειμένου να προβλεφθεί η ανώτατη τιμή θερμοκρασίας τους. Επίσης, για την πρόβλεψη της ανώτατης θερμοκρασίας του πυρήνα στους μετασχηματιστές ισχύος και διανομής χρησιμοποιείται δισδιάστατο θερμικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων [1.84]. Πρόσφατες τάσεις παρουσιάζουν το συνδυασμό ηλεκτρομαγνητικών-θερμικών μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων [1.85][1.86] προκειμένου να πραγματοποιηθεί θερμική μοντελοποίηση του μετασχηματιστή.

Κατάλληλα ισοδύναμα κυκλώματα παρουσιάζονται στην αναφορά [1.87] για τον υπολογισμό της ανύψωσης της θερμοκρασίας του πυρήνα και τη θερμική κατανομή στους μετασχηματιστές ισχύος [1.88]-[1.90]. Στις αναφορές [1.91] και [1.92] οι παράμετροι του προτεινόμενου θερμικού μοντέλου, για ένα μετασχηματιστή λαδιού, προκύπτουν από τη χρήση ενός γενετικού αλγορίθμου. Επίσης, στη διεθνή βιβλιογραφία προτείνονται δυναμικά θερμικά μοντέλα [1.93]-[1.95], λαμβάνοντας υπόψη της αλλαγές του ιξώδους του λαδιού και τις μεταβολές απωλειών με τη θερμοκρασία.

Ακόμη προτείνεται η μέθοδος του σμήνους σωματιδίων (*Particle Swarm*) και των νευρωνικών δικτύων για τη μελέτη της ψύξης του μετασχηματιστή [1.96][1.97].

Πειραματική έρευνα της θερμικής κατανομής για μετασχηματιστές λαδιού και μετασχηματιστές ρητίνης (*cast-resin*) παρουσιάζονται στις αναφορές [1.98] και [1.99], αντίστοιχα. Για τη βελτίωση των αναλυτικών εξισώσεων οι οποίες προβλέπουν τη θερμική κατανομή για μετασχηματιστές λαδιού χρησιμοποιούνται πειραματικά δεδομένα στην αναφορά [1.100].

Τέλος, προκειμένου να βελτιωθεί η αξιοπιστία των μετασχηματιστών ισχύος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει παρατηρηθεί στα μονωμένα υλικά και στα μονωτικά λάδια. Η πλειοψηφία των μετασχηματιστών χρησιμοποιούν ως μονωτικό ορυκτό λάδι εξαιτίας της χαμηλής του τιμής και των καλών ιδιοτήτων του [1.101]. Παρόλα αυτά, η απόδοση του ορυκτού λαδιού αρχίζει να μην καλύπτει πλέον τις σύγχρονες ανάγκες των μετασχηματιστών. Για αυτό το λόγο, μια σειρά από πειράματα ξεκίνησαν να εκτελούνται προκειμένου να βελτιώσουν την απόδοση του ορυκτού ελαίου ή να το αντικαταστήσουν με άλλα υποκατάστατα, όπως είναι οι φυσικοί εστέρες ή φυτικά λάδια [1.102]-[1.106]. Οι φυσικοί εστέρες, ή φυτικά λάδια, χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια με επιτυχία ως διηλεκτρικά μετασχηματιστών στη θέση των συμβατικών ορυκτελαίων. Η χρήση των φυτικών ελαίων συνεπάγεται ορισμένα πλεονεκτήματα, όπως ασφάλεια ενάντια σε συμβάντα πυρκαγιάς, φιλικότητα προς το περιβάλλον και βελτίωση της απόδοσης του μετασχηματιστή. Στα πλαίσια αυτά παρουσιάζονται και αναλύονται διεξοδικά τα αποτελέσματα πειράματος γήρανσης, που καταδεικνύουν ότι τα φυτικά έλαια επιδρούν βελτιωτικά στην κατάσταση του μονωτικού χαρτιού του μετασχηματιστή προστατεύοντάς το από τη θερμική αποσύνθεση. Επίσης, οι αναφορές [1.107][1.108] μελετούν την ανάμειξη του ορυκτού λαδιού με δύο ακόμη μονωτικά ρευστά (σιλικόνη και συνθετικούς εστέρες). Τέλος, η εφαρμογή αντικατάστασης ορυκτελαίου με φυτικό έλαιο σε εν χρήσει μετασχηματιστές (*retrofilling*) [1.109], αποτελεί άλλη μια μέθοδο παράτασης της θερμικής ζωής ενός παλαιού μετασχηματιστή.

1.2.1.8 Η Τάση της Νέας Τεχνολογίας στους Μετασχηματιστές

Την τελευταία δεκαετία έχουν πραγματοποιηθεί ραγδαίες εξελίξεις στο χώρο της σχεδίασης των μετασχηματιστών.

Τα τελευταία χρόνια κατασκευάστηκαν αρκετοί μετασχηματιστές με πυρήνα από άμορφο σίδηρο. Το υλικό του πυρήνα κατασκευάζεται από μη κρυσταλλική μορφή χύνοντας το ρευστό μέταλλο μέσω μιας σχισμής σε ένα γρήγορα κινούμενο ψυγμένο υπόστρωμα. Η προκύπτουσα άμορφη δομή εξασφαλίζει ικανοποιητική μείωση των απωλειών σιδήρου των μετασχηματιστών σε σύγκριση με τους μετασχηματιστές με πυρήνα από χάλυβα πυριτίου προσανατολισμένων κόκκων [1.110][1.111]. Ωστόσο, το υλικό είναι περισσότερο εύθραυστο από τα υλικά των συμβατικών πυρήνων πυριτίου και έχει αρκετά υψηλότερο κόστος κατασκευής. Οι απώλειες πυρήνα μπορούν επίσης να μειωθούν με τη χρήση μονωτικών επικαλύψεων των ελασμάτων του (*insulating coatings*) [1.112], και διάφοροι τύποι τέτοιων επικαλύψεων έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιηθεί τόσο σε πλήρως κατεργασμένες όσο και σε μερικώς κατεργασμένες ηλεκτρικές λαμαρίνες. Επιπλέον, οι Matsuura et al. [1.113] παρουσίασαν μελέτες σε άμορφα κράματα σιδήρου με μακροπρόθεσμα αξιόπιστες ιδιότητες για χρήση σε μετασχηματιστές λαδιού.

Εκτός από τους συμβατικούς μετασχηματιστές υπάρχουν και οι λεγόμενοι υπεραγώγιμοι μετασχηματιστές υψηλής θερμοκρασίας, οι οποίοι υπόσχονται σημαντικές βελτιώσεις της ενεργειακής απόδοσης. Σε ένα υπεραγώγιμο μετασχηματιστή υψηλής θερμοκρασίας (*High Temperature Superconducting - HTS*) τα συμβατικά πηνία αντικαθίστανται με αγωγούς από υπεραγώγιμα υλικά¹ και για την ψύξη αντί για λάδι χρησιμοποιείται υγρό άζωτο. Οι μετασχηματιστές HTS προσφέρουν βελτιωμένες ενεργειακές αποδόσεις, μειωμένα περιβαλλοντικά προβλήματα και σημαντικά πλεονεκτήματα στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, τα πλεονεκτήματα των μετασχηματιστών HTS είναι: 1) μείωση των απωλειών σε σχέση με τους συμβατικούς μετασχηματιστές, εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση λειτουργικού κόστους, 2) μείωση των διαστάσεων και του βάρους κατά 50% λόγω της υψηλότερης ικανότητας των υπεραγώγιμων αγωγών, 3) απαίτηση λιγότερης ποσότητας αγωγού και μαγνητικού υλικού, διότι τα τυλίγματα υπεραγωγών έχουν υψηλότερη πυκνότητα ρεύματος από ότι τα τυλίγματα χαλκού και 4) χρησιμοποίηση περιβαλλοντικά φιλικού και άκαυστου υγρού αζώτου ως ψυκτικού και διηλεκτρικού μέσου. Ανάλυση στον τρόπο

¹ Η υπεραγωγιμότητα χαρακτηρίζεται από δύο γνωρίσματα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους [1.114]: 1) κάτω από μια συγκεκριμένη θερμοκρασία που ονομάζεται σημείο άλματος, μπορεί να ρέει ρεύμα χωρίς να υπάρχει τάση στα άκρα του αγωγού και 2) κάτω από το σημείο άλματος στο εσωτερικό υπεραγώγιμων αγωγών, δεν μπορεί να υπάρχει μαγνητικό πεδίο.

σχεδίασης των μετασχηματιστών HTS παρουσιάζεται στις [1.115][1.116], ενώ στην [1.117] αναφέρονται νέες προοπτικές για τους συγκεκριμένους μετασχηματιστές. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας η οποία βασίζεται στο υγρό άζωτο θερμοκρασίας πάνω από 79°K έχει μειώσει την πολυπλοκότητα και το κόστος των μετασχηματιστών HTS [1.118][1.119]. Η κατασκευή ενός υπεραγωγίμου τριφασικού μετασχηματιστή 100 kVA με άμορφο σίδηρο αναφέρεται στην [1.120]. Στις [1.121][1.122] παρουσιάζεται υπεραγωγίμο πηνίο για το εσωτερικό δευτερεύον τύλιγμα ενός μετασχηματιστή σε εφαρμογή ηλεκτροκίνησης (*traction transformer*). Επίσης, στην αναφορά [1.123] αναλύεται η απώλεια της μαγνήτισης των υπεραγωγίων τυλιγμάτων ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας του μετασχηματιστή.

Τέλος, την τελευταία δεκαετία έχει σημειωθεί αξιοπρόσεκτη πρόοδος στην τεχνολογία των μετασχηματιστών που χρησιμοποιούν ως ψυκτικό μέσω αέριο αντί λάδι (*gas immersed transformers*). Οι συγκεκριμένοι μετασχηματιστές διαθέτουν το αέριο εξαφθοριούχο θείο (SF_6) για μονωτικούς και ψυκτικούς σκοπούς [1.124][1.125]. Το SF_6 ως αέριο υπό πίεση χρησιμοποιείται ως μονωτικό στους μετασχηματιστές με μόνωση αερίου διότι έχει αρκετά μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά από τον αέρα, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη διάσπασή του υπό την επίδραση ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου και επομένως την έναρξη ηλεκτρικού τόξου. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει τη μείωση του μεγέθους του μετασχηματιστή, αφού δεν απαιτούνται μεγαλύτερες αποστάσεις για να αποφευχθεί η δημιουργία ηλεκτρικών τόξων.

1.2.2 Μεθοδολογία Βέλτιστης Σχεδίασης Μετασχηματιστών

Μία από τις δυσκολότερες απαιτήσεις στη σχεδίαση του μετασχηματιστή είναι να επιτευχθεί η ισορροπία μεταξύ του κόστους του και της απόδοσής του, με χρήση τεχνικών και μεθοδολογιών ικανών να αντεπεξέλθουν στις σχεδιαστικές απαιτήσεις των υποενοτήτων 1.2.1.1 έως 1.2.1.8. Η βελτιστοποίηση της συνολικής σχεδίασης είναι μια σύνθετη διαδικασία, η οποία προϋποθέτει την επίτευξη ικανοποιητικής ακρίβειας στην πρόβλεψη των διάφορων τεχνικών χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή, χωρίς τη σημαντική υπολογιστική επιβάρυνση των μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του κόστους του. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση που αφορά τη βέλτιστη συνολική σχεδίαση του μετασχηματιστή είναι περιορισμένη σε έκταση, λόγω κυρίως της εξαιρετικής πολυπλοκότητας του προβλήματος που απαιτεί σφαιρική γνώση καθώς επίσης και του γεγονότος ότι η βελτιστοποίηση της σχεδίασης αποτελεί μυστικό για τη βιομηχανία. Η βελτιστοποίηση της σχεδίασης μπορεί να στοχεύει είτε στην ελαχιστοποίηση του κατασκευαστικού κόστους του μετασχηματιστή ή στο συνολικό του κόστος, συμπεριλαμβανομένου και του κόστους απωλειών κατά τη διάρκεια ζωής του, όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια.

1.2.2.1 Μοντέλα Ελαχιστοποίησης Κόστους Κατασκευής Μετασχηματιστών

Προκειμένου να μπορέσουν να σχεδιάσουν ανταγωνιστικά προϊόντα, οι κατασκευαστές μετασχηματιστών πρέπει να διαθέτουν λογισμικά σχεδίασης ικανά να παράγουν υλοποιήσιμα κατασκευαστικά προϊόντα και βέλτιστες σχεδιάσεις στον ελάχιστο δυνατό χρόνο. Παραδοσιακά, το πρόβλημα της σχεδίασης του μετασχηματιστή αντιμετωπίζεται εδώ και δεκαετίες σε καθημερινή βάση από τους σχεδιαστές της βιομηχανίας μετασχηματιστών. Ο κύριος στόχος των σχεδιαστών και ερευνητών της εποχής της πρώιμης ανάπτυξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών ήταν να καταφέρουν να αποδώσουν σε γλώσσα μηχανής την εμπειρία των μηχανικών σχεδίασης μετασχηματιστών. Το 1955 πραγματοποιήθηκε το πρώτο λογισμικό σχεδίασης μετασχηματιστή [1.126]. Μετά τη συγκεκριμένη πρώτη απόπειρα λογισμικού σχεδίασης του μετασχηματιστή, ακολούθησαν μια σειρά δημοσιεύσεων στη σχεδίαση κυρίως του μετασχηματιστή ισχύος χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικό υπολογιστή [1.127]-[1.132]. Στη συνέχεια, οι Judd και Kressler [1.133] παρουσίασαν μια τεχνική η οποία ξεκινάει τη σχεδίαση του μετασχηματιστή μικρής ισχύος με μια γεωμετρία πυρήνα και κατόπιν εντοπίζει τις τιμές των ηλεκτρικών και μαγνητικών παραμέτρων οι οποίες μεγιστοποιούν την ισχύ εξόδου ή ελαχιστοποιούν τις απώλειες. Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιεί αναλυτικές εξισώσεις για να περιγράψει το μετασχηματιστή και βελτιστοποιεί το συγκεκριμένο πρόβλημα με γραφική απεικόνιση των λύσεων. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι να κατασκευαστεί ο μικρότερος δυνατός μετασχηματιστής για δεδομένη ισχύ

ικανοποιώντας παράλληλα ορισμένους περιορισμούς. Μια βελτιωμένη μοντελοποίηση του συγκεκριμένου προβλήματος παρουσιάστηκε στην [1.134] έχοντας καλύτερη λύση στο πρόβλημα της ελαχιστοποίησης των απωλειών. Οι Poloujadoff et al. [1.135] το 1986 ανέπτυξαν μια τεχνική βάσει της οποίας παρατηρούσαν πώς επηρεάζουν οι μεταβολές ορισμένων σχεδιαστικών παραμέτρων τη σχεδίαση του ενεργού μέρους του μετασχηματιστή, επιτυγχάνοντας το ελάχιστο κόστος παραγωγής στην κατασκευή των μετασχηματιστών. Η συγκεκριμένη διαδικασία είχε προγραμματιστεί σε ένα μικρο-υπολογιστή. Έπειτα, το 1990 ο Jeweel [1.136] σχεδίασε και κατασκεύασε ένα μετασχηματιστή ισχύος 10 VA για εκπαιδευτικούς σκοπούς χρησιμοποιώντας θεμελιώδεις εξισώσεις σχεδίασης του μετασχηματιστή. Το 1992 οι Grady et al. [1.137] δημιούργησαν σχεδιαστικό πακέτο μετασχηματιστών ξηρού τύπου, επίσης για εκπαιδευτικούς και κατασκευαστικούς σκοπούς, το οποίο βασιζόταν στη δοκιμή και σφάλμα των παραμέτρων σχεδίασης, ενώ το 1994 ο Rubaai [1.138] ανέπτυξε παρόμοιο σχεδιαστικό λογισμικό κυρίως για εκπαιδευτικούς σκοπούς προκειμένου να αποδώσει με αυτό τον τρόπο την κατασκευή του μετασχηματιστή χρησιμοποιώντας αναλυτικές μαθηματικές εξισώσεις. Το 1991, ο Andersen [1.139] παρουσίασε μια ρουτίνα βελτιστοποίησης, η οποία ήταν βασισμένη στην προσομοίωση Monte Carlo. Αναλυτικότερα, η ρουτίνα του χρησιμοποιούσε τυχαίους αριθμούς για να παράγει εφικτές σχεδιάσεις μετασχηματιστών, από τις οποίες επιλέγονταν εκείνη με το μικρότερο σχεδιαστικό κόστος. Μια παρεμφερής μεθοδολογία με αυτή του Andersen [1.139] χρησιμοποιήθηκε στην [1.140], με τη μόνη διαφορά ότι η βέλτιστη λύση προέκυπτε χρησιμοποιώντας την κλασσική θεωρία βελτιστοποίησης των συνεχών μεταβλητών. Ακόμη και σήμερα, οι τεχνικές που περιλαμβάνουν μαθηματικά μοντέλα χρησιμοποιώντας αναλυτικές εξισώσεις και προσεγγίσεις για τον υπολογισμό των παραμέτρων του μετασχηματιστή, αποτελούν συχνά τη βάση της σχεδίασης η οποία υιοθετείται από τους κατασκευαστές. Οι Lazaris et al. [1.141] ανέπτυξαν ένα πλήρες λογισμικό σχεδίασης μετασχηματιστών ισχύος τύπου στοιβαχτού πυρήνα, το οποίο βασίζεται σε αναλυτικές εξισώσεις με στόχο την εύρεση του φθηνότερου μετασχηματιστή. Επίσης, οι Georgilakis et al. [1.142] εφαρμόζουν ένα ευρετικό αλγόριθμο χρησιμοποιώντας αναλυτικές εξισώσεις, προκειμένου να εντοπίσουν τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων σχεδίασης στους τριφασικούς μετασχηματιστές διανομής τύπου τυλιγμένου πυρήνα. Ο Jabr [1.143] χρησιμοποιεί τη μέθοδο του γεωμετρικού προγραμματισμού προκειμένου να επιλύσει το συγκεκριμένο πρόβλημα σχεδίασης σε μετασχηματιστές υψηλής και χαμηλής συχνότητας, λαμβάνοντας υπόψη μαθηματικές εξισώσεις. Επιπροσθέτως, στο βιβλίο των Vecchio et al. [1.144] πραγματοποιείται εκτενής αναφορά για την ελαχιστοποίηση του κόστους του μετασχηματιστή ενσωματώνοντας το κόστος των υλικών, τα εργατικά κόστη καθώς επίσης και τις απώλειες, συνθέτοντας την αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης. Η συγκεκριμένη συνάρτηση επιλύεται με γεωμετρικό προγραμματισμό ικανοποιώντας ένα σύνολο περιορισμών για μετασχηματιστές ισχύος τύπου στοιβαχτού πυρήνα.

Εκτός από ευρετικές μεθόδους για την επιτυχή επίλυση της βέλτιστης σχεδίασης του μετασχηματιστή, στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν χρησιμοποιηθεί μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης. Συγκεκριμένα, έχει χρησιμοποιηθεί η τεχνική των νευρωνικών δικτύων για το πρόβλημα της βέλτιστης σχεδίασης σε μετασχηματιστές ισχύος τύπου στοιβαχτού πυρήνα στις αναφορές [1.145] και [1.146], όπου χρησιμοποιείται ως εργαλείο υπολογισμού του βέλτιστου υλικού των τυλιγμάτων και της πρόβλεψης των απωλειών, αντίστοιχα. Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης του κόστους του μετασχηματιστή ισχύος [1.147], τη βελτιστοποίηση απόδοσης του μετασχηματιστή ρητίνης (*cast-resin*) τύπου στοιβαχτού πυρήνα [1.148] ή του μετασχηματιστή με τοροειδή πυρήνα (*toroidal core transformer*) [1.149].

1.2.2.2 Μοντέλα Ελαχιστοποίησης Κόστους Λειτουργίας Μετασχηματιστών

Στα μοντέλα εκτίμησης κόστους λειτουργίας των μετασχηματιστών γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στο ζήτημα της εξοικονόμησης ενέργειας, το οποίο αντιμετωπίζεται με όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον τις τελευταίες δεκαετίες σε παγκόσμιο επίπεδο. Η χρήση ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών είναι ζωτικής σημασίας για τη κοινωνία, δεδομένου ότι οι πηγές

ενέργειας είναι ακριβές και εξαντλήσιμες. Η έρευνα του συγκεκριμένου χώρου κρίθηκε αναγκαία, δεδομένου ότι το ζήτημα αυτό συνδέεται άμεσα με τις απώλειες των μετασχηματιστών, οι οποίοι αποτελούν μία από τις ζωτικότερες συνιστώσες των ηλεκτρικών δικτύων. Συνεπώς, καταδεικνύεται άμεσα η χρησιμότητα της μείωσης των απωλειών και της αύξησης της ενεργειακής τους απόδοσης, μέσω μοντέλων κόστους λειτουργίας μετασχηματιστών.

Μια από τις δημοφιλέστερες μεθοδολογίες αξιολόγησης των μετασχηματιστών είναι η μέθοδος του συνολικού κόστους κατοχής (*Total Owning Cost – TOC*). Η συγκεκριμένη τεχνική λαμβάνει υπόψη το κόστος αγοράς του μετασχηματιστή όπως παράλληλα και το κόστος των απωλειών κατά τη συνολική διάρκεια λειτουργίας του, αξιολογώντας την ενεργειακή απόδοση του μετασχηματιστή [1.150].

Οι απώλειες ενέργειας του μετασχηματιστή κατά τη διάρκεια της χρήσης του, αυξάνουν σημαντικά τα λειτουργικά του κόστη, έχοντας ως αποτέλεσμα οι τιμές του κόστους των απωλειών να είναι αρκετά υψηλότερες από την τιμή αγοράς του μετασχηματιστή. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που πρέπει ο αγοραστής μετασχηματιστών να μη λαμβάνει αποφάσεις με βάση το αρχικό κόστος αγοράς του μετασχηματιστή. Γενικά, οι μετασχηματιστές με το μικρότερο κόστος αγοράς (φθηνότερος μετασχηματιστής) διαθέτουν και το υψηλότερο συνολικό κόστος κατοχής. Επομένως, μακροπρόθεσμα, προκειμένου να επιλεγεί ο αποδοτικότερος και οικονομικότερος μετασχηματιστής πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η τιμή *TOC* [1.150]-[1.152]. Επίσης, ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι το περιβαλλοντικό κόστος [1.153], δηλαδή το κόστος το οποίο συνδέεται με διάφορα είδη εκπομπών τα οποία προέρχονται από την καύση συμβατικών καυσίμων ώστε να παραχθεί η ενέργεια που χάνεται λόγω των απωλειών του μετασχηματιστή.

Η αξιολόγηση των μετασχηματιστών μέσω της τεχνικής του *TOC* έχει αναπτυχθεί ως ένα εύχρηστο εργαλείο το οποίο χρησιμοποιεί σχεδόν κάθε ηλεκτρική εταιρία όταν αγοράζει μετασχηματιστές. Το κόστος των απωλειών υπολογίζεται με τη βοήθεια δύο συντελεστών αξιολόγησης με βάση το πρότυπο IEEE [1.154] και το πρότυπο NEMA [1.155]: το συντελεστή *A* ο οποίος εκφράζει το συντελεστή κόστους των απωλειών κενού φορτίου και το συντελεστή *B* ο οποίος εκφράζει το συντελεστή κόστους των απωλειών φορτίου. Η μέθοδος προσδιορισμού των δύο αυτών συντελεστών ποικίλει ανάλογα με τον τύπο αγοραστή του μετασχηματιστή στην αγορά ενέργειας (θεωρούνται δυο βασικές κατηγορίες: οι ηλεκτρικές εταιρίες και οι βιομηχανικοί χρήστες) και την ακρίβεια της ανάλυσης (εξαρτάται από τα δεδομένα των χαρακτηριστικών καμπυλών φόρτισης). Οι υποψήφιοι βιομηχανικοί αγοραστές μετασχηματιστών διανομής και η μεθοδολογία προσδιορισμού των συντελεστών *A* και *B* και κατά επέκταση του *TOC*, παρουσιάζονται στις [1.156]-[1.161], ενώ η εφαρμογή της απλοποιημένης εκδοχής του πρότυπου IEEE από τη σκοπιά των ηλεκτρικών εταιρειών αναλύεται εκτενώς από την αναφορά [1.150]. Δεδομένου ότι οι απώλειες φορτίου είναι άμεσα συνδεδεμένες με το είδος του φορτίου που πρόκειται να εξυπηρετήσει ο μετασχηματιστής καθώς επίσης και τα χαρακτηριστικά του δικτύου στο σημείο εγκατάστασής του, πρέπει παράλληλα να ενσωματωθούν ένα σύνολο από ευμετάβλητες παραμέτρους στον υπολογισμό του συντελεστή *B*. Μια τέτοια ανάλυση πραγματοποιείται σε βάθος στις αναφορές [1.162] και [1.163]. Συγκεκριμένα πραγματοποιείται βελτιστοποίηση του συνολικού κόστους κατοχής *TOC* με τους συγγραφείς να προτείνουν αρκετές αναλυτικές σχέσεις για την οικονομική αξιολόγηση των μετασχηματιστών διανομής, ενσωματώνοντας λεπτομέρειες των καμπυλών φόρτισης ανάλογα με τον είδος φορτίου που πρόκειται να εξυπηρετήσουν οι μετασχηματιστές. Πρόσφατα, διερευνήθηκε η περιβαλλοντική επιρροή και η συμβολή των απωλειών του μετασχηματιστή στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου [1.152][1.164]. Επίσης, οι Frau et al. [1.165] εξέτασαν την επίπτωση της εμπορίας ρύπων στην οικονομική αξιολόγηση μετασχηματιστών (*emissions credits*). Συγκεκριμένα, μελέτησαν δύο μετασχηματιστές διανομής 400 kVA με απώλειες κατηγορίας AA' (ως μη ενεργειακά αποδοτικό μετασχηματιστή) και με απώλειες κατηγορίας CC' (ως ενεργειακά αποδοτικό μετασχηματιστή) σύμφωνα με το πρότυπο της CENELEC [1.166]. Ως αποτέλεσμα της συγκεκριμένης έρευνας ήταν να προταθούν τρόποι προώθησης της χρήσης των ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών στην Ισπανική αγορά, όπως για παράδειγμα παροχή κινήτρων στους χρήστες και τις ηλεκτρικές εταιρίες, τροποποίηση του Ισπανικού

κανονισμού που αφορά τις απώλειες και συμμετοχή των εταιριών στην εμπορία ρύπων CO₂. Ωστόσο, πρέπει να επισημανθεί ότι η διεθνής βιβλιογραφία και κατά μεγάλο ποσοστό οι εταιρίες δεν έχουν ποσοτικοποιήσει την επιρροή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην ανάλυση του συνολικού κόστους κατοχής του μετασχηματιστή.

1.2.3 Βέλτιστη Επιλογή Μεγέθους Μετασχηματιστή

Η επιλογή της ονομαστικής ισχύος των μετασχηματιστών που εγκαθίστανται στο δίκτυο επηρεάζει την απόδοση και τη λειτουργικότητά τους. Η κατάλληλη επιλογή μετασχηματιστή, βάσει του φορτίου που πρόκειται να εξυπηρετηθεί, έχει ως έμμεση ωφέλεια τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση απωλειών ενέργειας. Ειδικότερα, μετασχηματιστής ονομαστικής ισχύος αρκετά μεγαλύτερης από τη βέλτιστη επιλογή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών κενού φορτίου, ενώ μετασχηματιστής ονομαστικής ισχύος αρκετά μικρότερης από τη βέλτιστη επιλογή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών φορτίου. Συνεπώς, η βέλτιστη επιλογή μεγέθους του μετασχηματιστή εξαρτάται από μια σειρά από οικονομικούς παράγοντες καθώς επίσης και από τις απώλειές του.

Η βέλτιστη επιλογή μεγέθους μετασχηματιστή δεν είναι μια προφανής ή άμεση διαδικασία, εγκαθιστώντας απλά ένα επαρκές μέγεθος μετασχηματιστή, ο οποίος καλύπτει τις απαιτήσεις φορτίου στο τελικό έτος μελέτης, (τακτική, η οποία συνήθως ακολουθείται από τις ηλεκτρικές εταιρίες). Αντίθετα, το συγκεκριμένο πρόβλημα πρέπει να αντιμετωπισθεί ως ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης υπό περιορισμούς, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις πιθανές στρατηγικές επιλογής μεγέθους [1.167]. Στη διεθνή βιβλιογραφία, το συγκεκριμένο πρόβλημα έχει αντιμετωπισθεί με αιτιοκρατικής φύσης μεθόδους, όπως ο δυναμικός προγραμματισμός [1.168], ο ακέραιος προγραμματισμός [1.169] και ο μεικτός ακέραιος προγραμματισμός [1.170]. Παρόλα αυτά, ένα ευρύ φάσμα από μεγέθη μετασχηματιστών και διαφορετικά είδη φορτίου καθιστούν το συγκεκριμένο πρόβλημα ένα δύσκολο συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, λόγω του μεγάλου χώρου αναζήτησης των υποψηφίων λύσεων. Για αυτό το λόγο, οι στοχαστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης έχουν τη δυνατότητα να αποδειχθούν πιο αποτελεσματικές σε σχέση με τις αιτιοκρατικές για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση τέτοιων μεθόδων δεν συναντάται στη διεθνή βιβλιογραφία ή περιλαμβάνεται μερικώς σε αναλύσεις όπως για παράδειγμα ως εργαλείο για την πρόβλεψη φορτίου [1.171].

Το πρόβλημα διαστασιολόγησης μετασχηματιστών (προς τοποθέτηση σε δεδομένη τοπολογία δικτύου διανομής) αποτελεί υποπρόβλημα του γενικότερου προβλήματος προγραμματισμού των δικτύων διανομής. Πρόκειται για ένα ιδιαίτερα περίπλοκο πρόβλημα, δεδομένου του μεγάλου αριθμού των παραμέτρων από τις οποίες εξαρτάται και των υποψηφίων πιθανών διαμορφώσεων δικτύου, ανάλογα με τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης περιοχής και τα εξυπηρετούμενα φορτία της. Για την απλοποίησή του χρησιμοποιούνται συνήθως γραμμικοποιημένες συναρτήσεις κόστους, καθιστώντας δυνατή την αντιμετώπισή του με τη χρήση ντετερμινιστικών μεθόδων, όπως ο μικτός ακέραιος προγραμματισμός [1.172], ο γραμμικός προγραμματισμός [1.173], ο συνδυασμός ακέραιου και γραμμικού προγραμματισμού [1.174] ή ο δυναμικός προγραμματισμός [1.175]. Ωστόσο, όσο πιο ρεαλιστική γίνεται η αναπαράσταση των δεδομένων του δικτύου τόσο αυξάνεται και η πολυπλοκότητα του προβλήματος, καθιστώντας αναγκαία την εφαρμογή στοχαστικών μεθόδων. Για το σκοπό αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί έμπειρα συστήματα βάσης γνώσης [1.176], γενετικοί αλγόριθμοι [1.177] ή η μέθοδος της προσομοιωμένης απόπτησης [1.178]. Επιπλέον, σύμφωνα με άλλες προσεγγίσεις, προτείνεται η χρήση ευρετικών κανόνων για την εξαγωγή της αρχικής λύσης και τη βελτίωση των επόμενων λύσεων [1.179]. Αναμφίβολα, το πρόβλημα σχεδίασης, προγραμματισμού και βελτιστοποίησης των δικτύων διανομής αποτελεί ευρύ πεδίο έρευνας και εφαρμογών, η πλήρης βιβλιογραφική ανασκόπηση του οποίου ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

1.3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

1.3.1 *Ανάπτυξη Μεθόδων Τεχνητής Νοημοσύνης για την Επιλογή του Υλικού των Τυλιγμάτων*

Ένας από τους βασικούς στόχους της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η ενσωμάτωση μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης στη βελτιστοποίηση της σχεδίασης μετασχηματιστών, για την επίλυση υποπροβλήματος της βέλτιστης σχεδίασης, και ειδικότερα της επιλογής του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών. Για το σκοπό αυτό αναπτύσσονται και συγκρίνονται διάφορα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης, με σημείο εκκίνησης την τεχνική των νευρωνικών δικτύων, αναπτύσσοντας ένα πλήθος από διαφορετικές τοπολογίες νευρωνικών δικτύων, και αναζητώντας εκείνη με το μεγαλύτερο βαθμό επιτυχίας ταξινόμησης στο σύνολο ελέγχου. Στη συνέχεια, εξετάζεται η ανάπτυξη καινοτομικού μοντέλου επιλογής του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών, το οποίο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα δύο μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης, των δέντρων απόφασης και των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Τα δέντρα απόφασης επιλέγουν αυτόματα τις πιο σημαντικές παραμέτρους εισόδου που επηρεάζουν τον προσδιορισμό του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων, ενώ τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για την επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών με βάση όχι μόνο τις συνολικές υποψήφιες παραμέτρους εισόδου αλλά και τις επιλεγμένες παραμέτρους από τα δένδρα απόφασης. Συνεπώς, αποφεύγεται η ανάγκη του κατασκευαστή να εξετάσει για κάθε σχεδίαση ενός μετασχηματιστή ποιο υλικό τυλιγμάτων είναι το οικονομικότερο, ο χαλκός ή το αλουμίνιο, οπότε μειώνεται σημαντικά ο χρόνος που απαιτείται για τη βελτιστοποίησή της. Επιπλέον, αναπτύσσεται μία υβριδική τεχνική τεχνητής νοημοσύνης-αριθμητικής μεθόδου για την επιβεβαίωση της προτεινόμενης μεθόδου επιλογής του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών, χρησιμοποιώντας τα δέντρα απόφασης για την επιλογή των παραμέτρων εισόδου, την υβριδική τεχνική πεπερασμένων στοιχείων-οριακών στοιχείων για τον υπολογισμό των τεχνικών χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή και τα νευρωνικά δίκτυα για την επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών.

1.3.2 *Ανάπτυξη Μεθόδου Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού σε Συνδυασμό με την Τεχνική Διακλάδωσης και Φράγματος για τη Βέλτιστη Σχεδίαση Μετασχηματιστών*

Ένα από τα κύρια, αν όχι το κυριότερο, τμήμα της διατριβής είναι η ανάπτυξη κατάλληλης μεθόδου για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης των μετασχηματιστών διανομής τύπου τυλιγμένου πυρήνα. Για την επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου, αναπτύσσονται μεθοδολογίες επίλυσης του προβλήματος της βέλτιστης σχεδίασης του μετασχηματιστή με εφαρμογή του μικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού, καταλήγοντας σε μία καινοτομική υβριδική τεχνική ικανή να εξασφαλίσει ολική βέλτιστη λύση.

Η μέθοδος μικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού επιλέχθηκε λόγω της ικανότητάς της να εξασφαλίζει τη σωστή πορεία εύρεσης της βέλτιστης σχεδίασης, ακολουθώντας τμηματική βελτιστοποίηση και λόγω της καταλληλότητάς της για το πρόβλημα της σχεδίασης μετασχηματιστή, το οποίο εμπλέκει τόσο συνεχείς όσο και διακριτές μεταβλητές σχεδίασης. Αρχικά η συγκεκριμένη τεχνική εφαρμόζεται στη βελτιστοποίηση του κόστους του ενεργού μέρους του μετασχηματιστή, το οποίο αποτελεί και την καρδιά της σχεδίασης, ενώ στη συνέχεια επεκτείνεται με παράλληλες υλοποιήσεις του μικτού ακέραιου προγραμματισμού ενσωματώνοντας την τεχνική των πεπερασμένων στοιχείων, επιλύοντας ταυτόχρονα ένα πλήθος υποπροβλημάτων του κύριου προβλήματος, ανάλογα με τις αρχικές συνθήκες που έχει ορίσει ο χρήστης. Στη συνέχεια, βελτιστοποιείται ολόκληρη η σχεδίαση, ενσωματώνοντας στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης όχι μόνο το ενεργό μέρος αλλά και το μηχανικό μέρος του μετασχηματιστή. Η εφαρμογή του μικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού συνδυάζεται με κατάλληλο ορισμό των διαστημάτων και του τρόπου μεταβολής σημαντικών παραμέτρων της σχεδίασης (όπως είναι η πυκνότητα

ρεύματος των πηνίων) και την τεχνική των πεπερασμένων στοιχείων, καταλήγοντας σε μία καινοτομική υβριδική τεχνική ικανή να εξασφαλίσει ολική βέλτιστη λύση.

Στόχος της έρευνας είναι να ξεπεραστεί ένα από τα βασικά προβλήματα της υφιστάμενης μεθοδολογίας σχεδίασης που χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία, η οποία, λόγω της ευρετικής φύσης του αλγόριθμου βελτιστοποίησης, δεν έχει την ικανότητα να υπολογίσει το ολικό βέλτιστο μιας σχεδίασης, παρά μόνο να προσεγγίσει τη βέλτιστη λύση, αδυνατώντας να μειώσει περαιτέρω το κόστος κατασκευής των μετασχηματιστών.

1.3.3 Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Ενσωμάτωσης Περιβαλλοντικού Κόστους στην Οικονομική Αξιολόγηση Μετασχηματιστών

Με δεδομένη την πρόσφατη έντονη ευαισθητοποίηση της παγκόσμιας κοινότητας στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των εκπομπών αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου λόγω της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικά καύσιμα, είναι πλέον αναγκαίο να ληφθεί υπόψη και το περιβαλλοντικό κόστος κατά την οικονομική αξιολόγηση των μετασχηματιστών. Στα πλαίσια της διατριβής αναπτύσσεται μεθοδολογία οικονομικής αξιολόγησης μετασχηματιστών μέσω επέκτασης του μοντέλου κόστους λειτουργίας που περιγράφεται στο διεθνές πρότυπο C57.120 του Ινστιτούτου των ηλεκτρολόγων και ηλεκτρονικών μηχανικών (IEEE) με εισαγωγή συντελεστή περιβαλλοντικού κόστους. Κατά την ανάπτυξη του μοντέλου λαμβάνονται υπόψη όλα τα χαρακτηριστικά τόσο του φορτίου που εξυπηρετείται από τους μετασχηματιστές όσο και του δικτύου στο οποίο εγκαθίστανται, δίνοντας με αυτό τον τρόπο ρεαλιστική αποτύπωση των συνθηκών λειτουργίας τους κατά τη διάρκεια ζωής τους, και καταλήγοντας σε αξιόπιστα αποτελέσματα.

1.3.4 Ανάπτυξη Μεθόδου Βελτιστοποίησης Αποικίας Μυρμηγκιών για την Επιλογή Μεγέθους Μετασχηματιστή

Η βέλτιστη επιλογή μεγέθους (ονομαστικής ισχύος) μετασχηματιστή δεν αποτελεί μια τετριμμένη διαδικασία, η οποία συνίσταται στην εγκατάσταση ενός μεγέθους μετασχηματιστή, ο οποίος καλύπτει τις απαιτήσεις φορτίου για μια δεδομένη χρονική διάρκεια. Αντίθετα, το συγκεκριμένο πρόβλημα πρέπει να αντιμετωπισθεί ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις πιθανές στρατηγικές επιλογής μεγέθους. Λόγω των χαρακτηριστικών του προβλήματος, επιλέχθηκε για την επίλυσή του μέθοδος βασισμένη στον ελιτιστικό αλγόριθμο αποικίας μυρμηγκιών (EAS). Η μέθοδος προσαρμόζεται στην αντιμετώπιση ρεαλιστικών προβλημάτων επιλογής της ονομαστικής ισχύος ενός πλήθους μετασχηματιστών προς εγκατάσταση σε ένα πραγματικό δίκτυο διανομής, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις μεταβολές οικονομικών και τεχνικών παραγόντων κατά τη διάρκεια της θεωρούμενης μελέτης. Η προτεινόμενη τεχνική είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την επίλυση του προβλήματος της επιλογής μεγέθους μετασχηματιστή, λόγω της δυνατότητας να αξιολογήσει σωστά και με μικρό υπολογιστικό κόστος το πλήθος των πιθανών στρατηγικών διαστασιολόγησης των μετασχηματιστών σε ένα δίκτυο. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της καταδεικνύουν τη χρησιμότητά της σε σύνθετα προβλήματα τα οποία συναντώνται κατά τον προγραμματισμό των δικτύων διανομής.

1.4 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η δομή της εργασίας είναι η ακόλουθη:

Στο παρόν **1^ο Κεφάλαιο** παρουσιάστηκε το αντικείμενο και ο στόχος της εργασίας παράλληλα με βιβλιογραφική ανασκόπηση η οποία περιλάμβανε παράθεση και ανάλυση των σημαντικότερων εργασιών που έχουν ασχοληθεί τόσο με τα υποπροβλήματα της σχεδίασης όσο και με το πρόβλημα της βέλτιστης συνολικής σχεδίασης του μετασχηματιστή διανομής και της κοστολόγησης των απωλειών του, καθώς και τη βέλτιστη επιλογή μεγέθους μετασχηματιστών στα δίκτυα διανομής. Από την ανάλυση αυτή διαπιστώνονται τα κενά που υπάρχουν στο αντικείμενο της συνολικής βελτιστοποίησης μετασχηματιστών, ενώ υπογραμμίζονται προβλήματα όπως η μη ενσωμάτωση του περιβαλλοντικού κόστους, τα

οποία αποτελούν και τους βασικούς άξονες έρευνας που οδήγησαν στην εκπόνηση της διατριβής και αποτέλεσαν τους βασικούς στόχους τους οποίους κλήθηκε να υλοποιήσει.

Στο **2^ο Κεφάλαιο** διατυπώνεται το πρόβλημα της βέλτιστης σχεδίασης για τριφασικούς μετασχηματιστές διανομής με τυλιγμένους πυρήνες χρησιμοποιώντας ως μονωτικό ορυκτό λάδι, κύριος στόχος του οποίου είναι η εύρεση των βέλτιστων τιμών των κατασκευαστικών παραμέτρων, βάσει των οποίων εξασφαλίζεται σχεδίαση με το ελάχιστο δυνατό κόστος (κατασκευής ή συνολικό κόστος κατοχής) ενώ παράλληλα ικανοποιούνται οι περιορισμοί σχεδίασης. Η βέλτιστη σχεδίαση συνίσταται στον υπολογισμό των ηλεκτρικών και μηχανολογικών χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή, μέσω αναλυτικών σχέσεων και εμπειρικών συντελεστών, ακολουθώντας μια αλληλουχία υπολογισμών οι οποίοι εμπλέκουν μια σειρά από μεταβλητές σχεδίασης. Η μη γραμμική μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης βελτιστοποίησης, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι μεταβλητές σχεδίασης μπορεί να λαμβάνουν συνεχείς ή διακριτές τιμές καθιστούν τη βελτιστοποίηση ένα δύσκολο πρόβλημα μη γραμμικού μικτού ακέραιου προγραμματισμού με μη γραμμικούς περιορισμούς.

Στο **3^ο Κεφάλαιο** αναπτύσσονται καινοτομικές μεθοδολογίες τεχνητής νοημοσύνης, ικανές να επιλέγουν αυτόματα το υλικό των τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές, το οποίο αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο για τη μείωση του κατασκευαστικού κόστους, χωρίς να χρειάζεται να γίνει δύο φορές η βελτιστοποίηση της σχεδίασης: μία με τυλίγματα χαλκού και μία φορά με τυλίγματα αλουμινίου. Η έρευνα επεκτείνεται με την ανάπτυξη ενός καινοτομικού μοντέλου επιλογής του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών, το οποίο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα δύο μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης, των δέντρων απόφασης και των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Οι συγκεκριμένες μεθοδολογίες αποτελούν αποτελεσματικά εργαλεία επιλογής του υλικού των τυλιγμάτων στη βιομηχανία κατασκευής μετασχηματιστών εξαιτίας των υψηλών βαθμών επιτυχίας ταξινόμησης, παρέχοντας ευέλικτη και αξιόπιστη μεθοδολογία επίλυσης του συγκεκριμένου υποπροβλήματος της σχεδίασης.

Στο **4^ο Κεφάλαιο** αναπτύσσονται υβριδικές τεχνικές μικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού σε συνδυασμό με πεπερασμένα στοιχεία για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης σχεδίασης των μετασχηματιστών.

Στο **5^ο Κεφάλαιο** αρχικά παρουσιάζεται το μοντέλο του συνολικού κόστους κατοχής, σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο C57.120 του Ινστιτούτου των ηλεκτρολόγων και ηλεκτρονικών μηχανικών (IEEE), με βάση το οποίο γίνεται η οικονομική αξιολόγηση των μετασχηματιστών. Στη συνέχεια, προτείνεται μοντέλο οικονομικής αξιολόγησης μετασχηματιστών, το οποίο ενσωματώνει το περιβαλλοντικό κόστος στο συνολικό κόστος κατοχής, οπότε και επεκτείνεται το διεθνές πρότυπο C57.120 του IEEE. Το προτεινόμενο μοντέλο οικονομικής αξιολόγησης των μετασχηματιστών που συμπεριλαμβάνει το περιβαλλοντικό κόστος, αναδεικνύει τα οφέλη που προκύπτουν για τις ηλεκτρικές εταιρίες από την εγκατάσταση μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης στα δίκτυά τους.

Στο **6^ο Κεφάλαιο** προτείνεται μια καινοτομική τεχνική βασισμένη στη μέθοδο της βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών για τη διαστασιολόγηση των μετασχηματιστών, δηλαδή την επιλογή από μία ηλεκτρική εταιρία των ονομαστικών μεγεθών των μετασχηματιστών καθώς και των χρονικών στιγμών (ετών) που οι διάφοροι μετασχηματιστές θα εγκατασταθούν στο δίκτυο. Ταυτόχρονα, λαμβάνονται υπόψη όλοι οι περιορισμοί του προβλήματος, δηλαδή το φορτίο που πρόκειται να εξυπηρετηθεί καθώς επίσης και τα θερμικά όρια φόρτισης. Η συγκεκριμένη καινοτομική τεχνική εφαρμόζεται για την επιλογή του βέλτιστου μεγέθους μετασχηματιστών διανομής σε ένα πραγματικό δίκτυο.

Στο **7^ο Κεφάλαιο** πραγματοποιείται ανασκόπηση των μεθόδων που αναπτύχθηκαν, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και η συμβολή της διατριβής. Επίσης, προτείνονται νέα πεδία έρευνας και μελέτης σαν συνέχεια της παρούσας διατριβής.

Στο **Παράρτημα** περιγράφεται το λογισμικό το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής, εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4 για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης μετασχηματιστών (*Transformer Design Optimization-TDO*). Το *TDO* είναι μια συλλογή από εργαλεία βελτιστοποίησης, ανάλυσης και απεικόνισης, η οποία παρέχει τη δυνατότητα της διεπιδραστικής κατασκευής και ανάλυσης

μετασχηματιστών διανομής. Στο παράρτημα περιγράφονται αναλυτικά οι δυνατότητες και ο τρόπος αξιοποίησης του λογισμικού κατά τη διαδικασία σχεδίασης μετασχηματιστών.

1.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] E. I. Amoiralis, M. Tsili, P. S. Georgilakis, "The state of the art in engineering methods for transformer design and optimization: a survey," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 10, no. 5, pp. 1149-1158, 2008.
- [1.2] D. Pavlik, D. C. Johnson, R. S. Girgis, "Calculation and reduction of stray and eddy losses in core-form transformers using a highly accurate finite element modelling technique," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 1, pp. 239-244, Jan. 1993.
- [1.3] S. A. Holland, G. P. O'Connell, L. Haydock, "Calculating stray losses in power transformers using surface impedance with finite elements," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 28, no. 2, pp. 1355-1358, Mar. 1992.
- [1.4] M. Enokizono, N. Soda, "Core loss analysis of transformer by improved FEM," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 196, pp. 910-912, 1999.
- [1.5] M. Enokizono, T. Todaka, K. Nakamura, "Flux distribution in a wound core of a single-phase transformer," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 160, pp. 61-62, 1996.
- [1.6] C. H. Yu, A. Basak, "Optimum design of transformer cores by analyzing flux and iron loss with the aid of a novel software," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 29, no. 2, pp. 1446-1449, Mar. 1993.
- [1.7] A. Basak, C.-H. Yu, G. Lloyd, "Efficient transformer design by computing core loss using a novel approach," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 30, no. 5, pp. 3725-3728, Sep. 1994.
- [1.8] M. Enokizono, N. Soda, "Finite element analysis of transformer model core with measured reluctivity tensor," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 33, no. 5, pp. 4110-4112, Sep. 1997.
- [1.9] C. Lin, C. Xiang, Z. Yanlu, C. Zhingwang, Z. Guoqiang, Z. Yinhan, "Losses calculation in transformer tie plate using the finite element method," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, no. 5, pp. 3644-3647, 1998.
- [1.10] D. A. Koppikar, S. V. Kulkarni, P. N. Srinivas, S. A. Khaparde, R. Jain, "Evaluation of flitch plate losses in power transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 3, pp. 996-1001, Jul. 1999.
- [1.11] G. F. Mechler, R. S. Girgis, "Magnetic flux distributions in transformer core joints," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 1, pp. 198-203, Jan. 2000.
- [1.12] Ed. G. teNyenhuys, G. F. Mechler, R. S. Girgis, "Flux distribution and core loss calculation for single phase and five limb three phase transformer core designs," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 1, pp. 204-209, Jan. 2000.
- [1.13] G. F. Mechler, R. S. Girgis, "Calculation of spatial loss distribution in stacked power and distribution transformer cores," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 2, pp. 532-537, Apr. 1998.
- [1.14] G. W. Swift, "Excitation current and power loss characteristics for mitred joint power transformer cores," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. MAG-11, no. 1, pp. 61-64, Jun. 1975.
- [1.15] S. Charap, F. Judd, "A core loss model for laminated transformers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 10, no. 3, pp. 678-681, Sep. 1974.
- [1.16] Z. Valkovic, "Influence of transformer core design on power losses," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. MAG-18, no. 2, pp. 801-804, Mar. 1982.

- [1.17] F. Löffler, T. Booth, H. Pfützner, C. Bengtsson, K. Gramm, "Relevance of step-lap joints for magnetic characteristics of transformer cores," in *IEEE Proc., Electric Power Applications*, vol. 142, no. 6, pp. 371-378, Nov. 1995.
- [1.18] Ed G. teNyenhuys, R. S. Girgis, G. F. Mechler, "Other factors contributing to the core loss performance of power and distribution transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 4, pp. 648-653, Oct. 2001.
- [1.19] A. Ilo, "Behavior of transformer cores with multistep-lap joints," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 22, no. 3, pp. 43-47, Mar. 2002.
- [1.20] A. Mae, K. Harada, Y. Ishihara, T. Todaka, "A study of characteristic analysis of the three-phase transformer with step-lap wound-core," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 2, pp. 829-832, Mar. 2002.
- [1.21] A. J. Moses, B Thomas, "Problems in the design of power transformers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 10, no. 2, pp. 148-150, Jun. 1974.
- [1.22] M. Elleuch, M. Poloujadoff, "New transformer model including joint air gaps and lamination anisotropy," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, no. 5, pp. 3701-3711, Sep. 1998.
- [1.23] C. Nussbaum, H. Pfützner, T. Booth, N. Baumgartinger, A. Ilo, M. Clabian, "Neural networks for the prediction of magnetic transformer core characteristics," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, no.1, pp. 313-329, 2000.
- [1.24] P. S. Georgilakis, N. D. Hatzigargyriou, N. D. Doulamis, A. D. Doulamis, S. D. Kollias, "Prediction of iron losses of wound core distribution transformers based on artificial neural networks," *Neurocomputing*, vol. 23, pp. 15-29, 1998.
- [1.25] P. Georgilakis, N. Hatzigargyriou, D. Paparigas, S. Elefsiniotis, "Effective use of magnetic materials in transformer manufacturing," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 108, pp. 209-212, 2001.
- [1.26] P. S. Georgilakis, N. D. Hatzigargyriou, A. D. Doulamis, N. D. Doulamis, S. D. Kollias, "A neural network framework for predicting transformer core losses," in *Proc. of the 21st 1999 IEEE International Conference on Power Industry Computer Applications*, pp. 301-308, May 1999.
- [1.27] P. Georgilakis, N. Hatzigargyriou, D. Paparigas, "AI helps reduce transformer iron losses," *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 12, no. 4, pp. 41-46, 1999.
- [1.28] M. Elleuch, M. Poloujadoff, "Analytical model of iron losses in power transformers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 39, no. 2, pp. 973-980, Mar. 2003.
- [1.29] J. Prousalidis, N. Hatzigargyriou, A. Kladas, "Iron lamination efficient representation in power transformers," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 108, pp. 217-220, 2001.
- [1.30] A. A. Adly, "Determination of total transformer losses resulting from semirotating flux excitation," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 31, no. 6, pp. 4253-4255, Nov. 1995.
- [1.31] H. Akçay, D. Gökhan Ece, "Modeling of hysteresis and power losses in transformer laminations," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 2, pp. 487-492, Apr. 2003.
- [1.32] R. Arseneau, E. So, E. Hanique, "Measurements and correction of no-load losses of power transformers," *IEEE Transactions on Instrument and Measurement*, vol. 54, no. 2, pp. 503-506, Apr. 2005.
- [1.33] A. J. Moses, "Comparison of transformer loss prediction from computed and measured flux density distribution," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, no. 4, pp. 1186-1188, Jul. 1998.
- [1.34] R. S. Girgis, Ed G. teNijenhuis, K. Gramm, J.-E. Wrethag, "Experimental investigations on effect of core production attributes on transformer core loss

- performance,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 2, pp. 526-531, Apr. 1998.
- [1.35] M. Albach, T. Durbaum, A. Brockmeyer, “Calculating core losses in transformers for arbitrary magnetizing currents: a comparison of different approaches,” in *Proc. of 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, vol. 2, no. 23-27, pp. 1463-1468, Jun. 1996.
 - [1.36] M. Dolinar, D. Dolinar, G. Stumberger, B. Polajzer, J. Ritonja, “A three-phase core-type transformer iron core model with included magnetic cross saturation,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 10, pp. 2849-2851, Oct. 2006.
 - [1.37] J. Pedra, L. Sainz, F. Córcoles, R. Lopez, M. Salichs, “PSPICE computer model of a nonlinear three-phase three-legged transformer,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 200-207, Jun. 2004.
 - [1.38] N. Stranges, R. D. Findlay, “Measurement of rotational iron losses in electrical sheet,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, no. 5, pp. 3457-3459, Sep. 2000.
 - [1.39] R. Findlay, R. Belmans, D. Mayo, “Influence of the stacking method on the iron losses in power transformer cores,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 26, no. 5, pp. 1990-1992, Sep. 1990.
 - [1.40] D. Davies, A. J. Moses, “A novel method of reducing iron losses in power transformer cores,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 20, no. 4, pp. 559-562, Jul. 1984.
 - [1.41] P. Marketos, T. Meydan, “Novel transformer core design using consolidated stacks of electrical steel,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 10, pp. 2821-2823, Oct. 2006.
 - [1.42] S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde, “Stray loss evaluation in power transformers - a review,” in *Proc. of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 3, pp. 2269-2274, Jan. 2000.
 - [1.43] A. Krawczyk, J. Turowski, “Recent development in eddy current analysis,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 23, no. 5, pp. 3032-3037, Sep. 1987.
 - [1.44] S. Wang, S-C. Ji, Y. Li, “The study of eddy current losses in coaxially insulated windings of power transformer,” in *Proc. of International Conference on Power System Technology*, vol. 3, pp. 1392-1395, Oct. 2002.
 - [1.45] D. A. Koppikar, S. V. Kulkarni, G. Ghosh, S. M. Ainapure, J. S. Bhavsar, “Circulating-current loss in transformer windings,” in *IEE Proc. Science, Measurement & Technology*, vol. 145, no. 4, pp. 136-140, Jul. 1998.
 - [1.46] J.-F. Pern, S.-N. Yeh, “Calculating the current distribution in power transformer windings using finite element analysis with circuit constraints,” in *IEE Proc. Science, Measurement and Technology*, vol. 142, no. 3, pp. 231-236, May 1995.
 - [1.47] B. S. Ram, “Loss and current distribution in foil windings of transformers,” in *Proc. IEE Generation, Transmission and Distribution*, vol. 145, no. 6, pp. 709-716, Nov. 1998.
 - [1.48] T. Renyuan, L. Yan, L. Feng, T. Lijian, “Resultant magnetic fields due to both windings and heavy current leads in large power transformers,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 32, no. 3, pp. 1641-1644, May 1996.
 - [1.49] R. Escarela-Perez, S. V. Kulkarni, N. K. Kodela, J. C. Olivares-Galvan, “Asymmetry during load-loss measurement of three-phase three-limb transformers,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 3, pp. 1566-1574, Jul. 2007.
 - [1.50] O. W. Andersen, “Transformer leakage flux program based on the finite element method,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-92, no. 2, pp. 682-689, Mar. 1973.

- [1.51] X. Cui, G. Zhang, "Automatic design of impedance in shell-form power transformer," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, no. 4, pp. 1822-1825, Jul. 2000.
- [1.52] A. G. Kladas, M. P. Papadopoulos, J. A. Tegopoulos, "Leakage flux and force calculation on power transformer windings under short-circuit: 2D and 3D models based on the theory of images and the finite element method compared to measurements," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 30, No. 5/2, pp. 3487-3490, Sept. 1994.
- [1.53] M. Djurovic, C. J. Carpenter, "3-dimensional computation of transformer leakage fields and associated losses," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 11, no. 5, pp. 1535-1537, Sep. 1975.
- [1.54] K. Zakrewski, M. Kukaniszyn, "Three-dimensional model of one- and three-phase transformer for leakage field calculation," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 28, no. 2, pp. 1344-1347, Mar. 1992.
- [1.55] M. A. Tsili, A. G. Kladas, P. S. Georgilakis, A. T. Souflaris, D. G. Paparigas, "Advanced design methodology for single and dual voltage wound core power transformers based on a particular finite element model," *Electric Power Systems Research*, vol. 76, pp. 729-741, 2006.
- [1.56] K. Zakrewski, B. Tomczuk, "Magnetic field analysis and leakage inductance calculation in current transformers by means of 3-D integral methods," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 32, no. 3, pp. 1637-1640, May 1996.
- [1.57] C. A. Brebbia and R. Magureanu, "The boundary element method for electromagnetic problems," *Engineering Analysis*, vol. 4, no. 4, pp. 178-185, 1987.
- [1.58] M. A. Tsili, A. G. Kladas, P. S. Georgilakis, A. T. Souflaris, C. P. Pitsilis, J. A. Bakopoulos, D. G. Paparigas, "Hybrid numerical techniques for power transformer modeling: A comparative analysis validated by measurements," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 40, no. 2, pp. 842-845, Mar. 2004.
- [1.59] M. Tsili, A. Kladas, P. Georgilakis, A. Souflaris, D. Paparigas, "Numerical techniques for design and modeling of distribution transformers," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 161, pp. 320-326, 2005.
- [1.60] J. Turowski, M. Turowski, M. Kopec, "Method of three-dimensional network solution of leakage field of three-phase transformers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 26, no. 5, pp. 2911-2919, Sep. 1990.
- [1.61] D. J. Wilcox, W. G. Hurley, M. Conlon, "Calculation of self and mutual impedances between sections of transformer windings," in *IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution*, vol. 136, no. 5, pp. 308-314, Sep. 1989.
- [1.62] P. Raitsios, "Leakage field of a transformer under conventional and superconducting condition," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 108, pp. 246-252, 2001.
- [1.63] S. H. Thilagar, G. S. Rao, "Parameter estimation of three-winding transformers using genetic algorithm," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 15, no. 5, pp. 429-437, Sept. 2002.
- [1.64] S. Salon, B. LaMattina, K. Sivasubramaniam, "Comparison of assumptions in computation of short circuit forces in transformers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, no. 5, pp. 3521-3523, Sep. 2000.
- [1.65] H. Wang, K. L. Butler, "Modeling transformers with internal incipient faults," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 2, pp. 500-509, Apr. 2002.
- [1.66] T. Renyuan, L. Yan, L. Dake, T. Lijian, "Numerical calculation of 3D transient eddy current field and short circuit electromagnetic force in large transformers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 28, no. 2, pp. 1418-1421, Mar. 1992.

- [1.67] S. L. Ho, Y. Li, H. C. Wong, S. H. Wang, R. Y. Tang, "Numerical simulation of transient force and eddy current loss in a 720-MVA power transformer," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 40, no. 2, pp. 687-690, Mar. 2004.
- [1.68] N. Y. Abed, O. A. Mohammed, "Modeling and characterization of transformers internal faults using finite element and discrete wavelet transforms," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 4, pp. 1425-1428, Apr. 2007.
- [1.69] K. Zakrzewski, B. Tomczuk, D. Koteras, "Simulation of forces and 3-D field arising during power autotransformer fault due to electric arc in HV winding," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 2, pp. 1153-1156, Mar. 2002.
- [1.70] G. B. Kumbhar, S. V. Kulkarni, "Analysis of short-circuit performance of split-winding transformer using coupled field-circuit approach," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 2, pp. 936-943, Apr. 2007.
- [1.71] T. Yanada, S. Minowa, O. Ichinokura, S. Kikuchi, "Design and analysis of noise-reduction transformer based on equivalent circuit," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, no. 4, pp. 1351-1353, Jul. 1998.
- [1.72] W. W. L. Keerthipala, Z. RuJing, T. Eu, L. Chionh, C. Jinn, "Electronic circuits for active control of acoustic noise generated by high voltage transformers," in *Proc. Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth*, vol.1, pp. 243-248, 1998.
- [1.73] C. Teoh, K. Soh, R. Zhou, D. Tien, V. Chan, "Active noise control of transformer noise," in *Proc. International Conference on Energy Management and Power Delivery*, vol. 2, pp. 747-753, Mar. 1998.
- [1.74] M. Rausch, M. Kaltenbacher, H. Landes, R. Lerch, J. Anger, J. Gerth, "Combination of finite and boundary element methods in investigation and prediction of load-controlled noise of power transformers," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 250, no. 2, pp. 323-338, 2002.
- [1.75] E. Lesniewska, "The use of 3-D electric field analysis and the analytical approach for improvement of a combined instrument transformer insulation system," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 2, pp. 1233-1236, Mar. 2002.
- [1.76] D. D. Mairs, D. L. Stuehm, B. A. Mork, "Overvoltages on five-legged core transformers on rural electric systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 25, no. 2, pp. 366-370, Mar. 1989.
- [1.77] M. Hori, M. Nishioka, Y. Ikeda, K. Noguchi, K. Kajimura, H. Motoyama, T. Kawamura, "Internal winding failure due to resonance overvoltage in distribution transformer caused by winter lightning," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1600-1606, Jul. 2006.
- [1.78] M. Hori, M. Mitani, H. Sakurano, H. Motoyama, T. Kawamura, "Observation and analysis of incident surge voltage waveforms in substations by winter lightning," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 316-322, Jun. 2007.
- [1.79] M. Popov, L. van der Sluis, "Improved calculations for no-load transformer switching surges," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 3, pp. 401-408, Jul. 2001.
- [1.80] T. K. Saha, P. Purkait, F. Müller, "Deriving an equivalent circuit of transformers insulation for understanding the dielectric response measurements," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 149-157, Jun. 2005.
- [1.81] T. K. Saha, "Review of time-domain polarization measurements for assessing insulation condition in aged transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 4, pp. 1293-1301, Oct. 2003.
- [1.82] P. M. Balma, R. C. Degeneff, H. R. Moore, L. B. Wagenaar, "The effects of long term operation and system conditions on the dielectric capability and insulation

- coordination of large power transformers,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 3, pp. 960-971, Jul. 1999.
- [1.83] L. Pierce, “Predicting hottest spot temperatures in ventilated dry type transformer windings,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 2, pp. 1160-1172, Apr. 1994.
- [1.84] Ed G. teNyenhuys, R. S. Girgis, G. F. Mechler, G. Zhou, “Calculation of core hot-spot temperature in power and distribution transformers,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 4, pp. 991-995, Oct. 2002.
- [1.85] K. Preis, O. Biró, G. Buchgraber, I. Ticar, “Thermal-electromagnetic coupling in the finite-element simulation of power transformers,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 4, pp. 999-1002, Apr. 2006.
- [1.86] C. C. Hwang, P. H. Tang, Y. H. Jiang, “Thermal analysis of high-frequency transformers using finite elements coupled with temperature rise method,” in *IEE Proc. Electric Power Applications*, vol. 152, no. 4, pp. 832-836, Jul. 2005.
- [1.87] S. A. Ryder, I. J. Vaughan, “A simple method for calculating core temperature rise in power transformers,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 637-642, Apr. 2004.
- [1.88] G. Swift, T. S. Molinski, W. Lehn, “A fundamental approach to transformer thermal modeling-Part I: Theory and equivalent Circuit,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 2, pp. 171-175, Apr. 2001.
- [1.89] G. Swift, T. S. Molinski, R. Bray, R. Menzies, “A fundamental approach to transformer thermal modeling-Part II: field verification,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 2, pp. 176-180, Apr. 2001.
- [1.90] Z. Radakovic, K. Feser, “A new method for the calculation of the hot-spot temperature in power transformers with ONAN cooling,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 4, pp. 1284-1292, Oct. 2003.
- [1.91] W. H. Tang, Q. H. Wu, Z. J. Richardson, “A simplified transformer thermal model based on thermal-electric analogy,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 3, pp. 1112-1119, Jul. 2004.
- [1.92] V. Galdi, L. Ippolito, A. Piccolo, A. Vaccaro, “Parameter identification of power transformers thermal model via genetic algorithms,” *Electric Power Systems Research*, vol. 60, pp. 107-113, 2001.
- [1.93] D. Susa, M. Lehtonen, H. Nordman, “Dynamic thermal modelling of power transformers,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 197-204, Jun. 2005.
- [1.94] D. Susa, M. Lehtonen, “Dynamic thermal modeling of power transformers: Further development-part I,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 4, pp. 1961-1970, Oct. 2006.
- [1.95] D. Susa, M. Lehtonen, “Dynamic thermal modeling of power transformers: Further development-part II,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 4, pp. 1971-1980, Oct. 2006.
- [1.96] W. H. Tang, E. Prempan, Q. H. Wu, J. Fitch, “A particle swarm optimizer with passive congregation approach to thermal modelling for power transformers,” in *Proc. IEEE Congress on Evolutionary Computation*, vol. 3, pp. 2745-2751, Sep. 2005.
- [1.97] Q. He, J. Si, D. J. Tylavsky, “Prediction of top-oil temperature for transformers using neural networks,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 4, pp. 1205-1211, Oct. 2000.
- [1.98] L. Pierce, “An investigation of the temperature distribution in cast-resin transformer windings,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 2, pp. 920-926, Apr. 1992.

- [1.99] L. Pierce, "An investigation of the thermal performance of an oil filled transformer," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 3, pp. 1347-1358, Jul. 1992.
- [1.100] L. Pierce, "Predicting liquid filled transformer loading capability," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, no. 1, pp. 170-178, Jan. 1994.
- [1.101] T. O. Rouse, "Mineral insulating oil in transformers," *IEEE Electrical Insulation*, vol. 14, no. 3, pp. 6-16, May/Jun 1998.
- [1.102] Y. Bertrand, L.C. Hoang, "Vegetal oils as substitute for mineral oils," in *Proc. International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, vol. 2, pp. 491-494, Jun. 2003.
- [1.103] Caixin Sun, Jian Li, Xiaohu Li, S. Grzybowski, "Electric properties of vegetable oil-based dielectric liquid and lifetime estimation of the oil-paper insulation," *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 680 – 683, Oct. 2006.
- [1.104] D. Martin, Z. D. Wang, A. W. Darwin, I. James, "A comparative study of the chemical stability of esters for use in large power transformers," in *Proc. IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 493-496, Oct. 2006.
- [1.105] C. P. McShane, "Vegetable-oil-based dielectric coolants," *IEEE Industry Applications*, vol. 8, no. 3, pp. 34-41, May-Jun. 2002.
- [1.106] T. V. Oommen, "Vegetable oils for liquid-filled transformers," *IEEE Electrical Insulation*, vol. 8, no. 1, pp. 6-11, Jan.-Feb. 2002.
- [1.107] C. Perrier, A. Beroual, J.-L. Bessede, "Improvement of power transformers by using mixtures of mineral oil with synthetic esters," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 13, no. 3, pp. 556 – 564, Jun. 2006.
- [1.108] C. Perrier, A. Beroual, J.-L. Bessede, "Experimental investigations on different insulating liquids and mixtures for power transformers," *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 237-240, Sept. 2004.
- [1.109] C. P. McShane, J. Luksich, K. J. Rapp, "Retrofilling aging transformers with natural ester based dielectric coolant for safety and life extension," in *Proc. IEEE Cement Industry Technical Conference*, pp. 141-147, May 2003.
- [1.110] S. Sieradzki, R. Rygal, M. Soinski, "Apparent core losses and core losses in five-limb amorphous transformer of 160 kVA," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, no. 4, pp. 1189-1191, Jul. 1998.
- [1.111] M. Yamamoto, T. Mori, T. Kawasaki, K. Tsutsui, T. Itoh, T. Yasigawa, "A design study of amorphous core transformer" *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 20, no. 5, pp. 1771-1773, Sep. 1984.
- [1.112] A. Coombs, M. Lindenmo, D. Snell, D. Power, "Review of the types, properties, advantages, and latest developments in insulating coatings on non-oriented electrical steels," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 37, no. 1, pp. 544-557, Jun. 2001.
- [1.113] T. Matsuura, K. Naqayama, S. Hagiwara, M. Higaki, "Long-term reliability of iron-based amorphous alloy cores for oil-immersed transformers," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 26, no 5, pp. 1993-1995, Sep. 1990.
- [1.114] Π. Ραϊτσίου, *Μελέτη Μετασχηματιστών*, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα, 2000.
- [1.115] T. Nitta, K. Misawa, H. Nomura, "Some considerations on superconducting transformers from a design-point of view," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 32, no. 4, pp. 2381-2384, Jul. 1996.
- [1.116] E. N. Andreev, Li. I. Chubraeva, "Investigation of a model HTSC transformer with amorphous alloy cores," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 181, no. 1-3, pp. 25-30, January 2007.

- [1.117] M. Ariante, A. Formisano, F. Marignetti, R. Martone, G. Masullo, A. Matrone, R. Quarantiello, G. Rubinacci, F. Sangiorgi, M. Scarano, S. Silvestri, F. Villone, M. Zigon, "New perspectives in HTS transformer design," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 43, pp. 845-848, 2006.
- [1.118] J. K. Sykulski, C. Beduz, R. L. Stoll, M. R. Harris, K. F. Goddard, Y. Yang, "Prospects for large high-temperature superconducting power transformers: conclusions from a design study," in *IEE Proc. Electric Power Applications*, vol. 146, no. 1, pp. 41-52, 1999.
- [1.119] J.-M. Joungh, S.-M. Baek, S.-H. Kim, "Manufacturing and test of model double-pancake coils of HTS transformer for cryogenic insulation design," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 14, no. 2, pp. 928-931, Jun. 2004.
- [1.120] J.-K. Lee, W.-S. Kim, S.-Y. Hahn, "Development of a three phase 100 kVA superconducting power transformer with amorphous cores," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 9, no. 2, pp. 1293-1296, Jun. 1999.
- [1.121] H. Kamijo, H. Hata, H. Fujimoto, K. Ikeda, T. Herai, K. Sakaki, H. Yamada, Y. Sanuki, S. Yoshida, Y. Kamioka, M. Iwakuma, K. Funaki, "Fabrication of inner secondary winding of high-TC superconducting traction transformer for railway rolling stock," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 15, no. 2, pp. 1875-1878, Jun. 2005.
- [1.122] K. Fukuoka, M. Hashimoto, "Proposal of transformer using magnetic shielding with bulk high Tc Superconductors," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 14, no. 2, pp. 1126-1129, Jun. 2004.
- [1.123] J.-T. Kim, W.-S. Kim, S.-H. Kim, K.-D. Choi, J.-H. Han, G.-W. Hong, S.-Y. Hahn, "Analysis of AC losses in HTS pancake windings for transformer according to the operating temperature," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 5, pp. 1888-1891, May 2005.
- [1.124] A. Takizawa, Y. Ono, S. Inaka, K. Konno, Y. Nozaki, T. Suzuki, S. Yamazaki, S. Saito, T. Shirone, "Development of large capacity low-noise gas-insulated transformer," *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 2, pp. 1036-1041, 1999.
- [1.125] S. Trabulus, "Design criteria for SF6 gas insulated power transformers up to 2500 kVA," in *Proc. Annual Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, vol. 1, pp. 321-326, 1999.
- [1.126] S. B. Williams, P. A. Abetti, E. F. Magnusson, "How digital computers aid transformer designer," *General Electric Review*, Schenectady, N.Y., vol. 58, pp. 24-25, May 1955.
- [1.127] S. B. Williams, P. A. Abetti, E. F. Magnusson, "Application of digital computers to transformer design," *AIEE Transactions*, Part III, vol. 75, pp. 728-735, 1956.
- [1.128] W. Sharpley, J. V. Oldfield, "The digital computer applied to the design of large power transformers," in *Proc. IEE*, Part A, vol. 105, pp. 112-125, 1958.
- [1.129] S. B. Williams, P. A. Abetti, H. J. Mason, "Complete design of power transformers with a large size digital computer," *AIEE Transactions*, Part III, vol. 77, pp. 1282-1291, 1959.
- [1.130] O. W. Andersen, "Optimum design of electrical machines," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-86, no. 6, pp. 707-711, 1967.
- [1.131] H. H. Wu, R. Adams, "Transformer design using time-sharing computer," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. MAG-6, no. 1, pp. 67, Mar. 1970.
- [1.132] P. Odessey, "Transformer design by computer," *IEEE Transactions on Manufacturing Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 1- 17, Jun. 1974.

- [1.133] F. F. Judd, D. R. Kressler, "Design optimization of small low-frequency power transformer," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. MAG-13, no. 4, pp. 1058-1069, July 1977.
- [1.134] W. G. Hurley, W. H. Wolfle, J. G. Breslin, "Optimized transformer design: inclusive of high-frequency effects," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 13, no. 4, pp. 651-659, July 1998.
- [1.135] M. Poloujadoff, R. D. Findlay, "A Procedure for illustrating the effect variations of parameters on optimal transformers design," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. PWRS-1, no. 4, November 1986.
- [1.136] W. T. Jewell, "Transformer design in the undergraduate power engineering laboratory," *IEEE Transactions on Power System*, vol. 5, no. 2, pp. 499-505, May 1990.
- [1.137] W. M. Grady, R. Chan, M. J. Samotyj, R. J. Ferraro, J. L. Bierschenk, "A PC-based computer program for teaching the design and analysis of dry-type transformers," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 709-717, May 1992.
- [1.138] A. Rubaai, "Computer aided instruction of power transformer design in the undergraduate power engineering class," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 1174-1181, Aug. 1994.
- [1.139] O. W. Andersen, "Optimized design of electric power equipment," *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 4, no. 1, pp. 11-15, Jan. 1991.
- [1.140] M. P. Saravolac, "Use of advanced software techniques in transformer design," *IEE Colloquium Design Technology of T&D Plant*, (Digest no. 1998/287), pp. 9/1-9/11, June 1998.
- [1.141] V. S. Lazaris, M. A. Tsili, A. G. Kladas, "Fast power transformer design technique validated by measurements," in *Proc. International Conference on Electrical Machines*, Sept. 2004.
- [1.142] P. S. Georgilakis, M. A. Tsili, A. T. Souflaris, "A heuristic solution to the transformer manufacturing cost optimization problem," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 181, pp. 260-266, 2007.
- [1.143] R. A. Jabr, "Application of geometric programming to transformer design," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 11, pp. 4261-4269, Nov. 2005.
- [1.144] R. M. Del Vecchio, B. Poulin, P.T. Feghali, D. M. Shah, R. Ahuja, *Transformer Design Principles - With Application to Core-Form Power Transformers*, Gordon and Breach Science Publishers, Canada, 2001.
- [1.145] L. H. Geromel, C. R. Souza, "Designing the power transformer via the application of intelligent systems," in *Proc. Mediterranean Conference on Control and Automation*, Jul. 2002.
- [1.146] L. H. Geromel, C.R. Souza, "The applications of intelligent systems in power transformer design," *IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, vol. 1, pp. 285-290, 2002.
- [1.147] L. Hui, H. Li, H. Bei, Y. Shunchang, "Application research based on improved genetic algorithm for optimum design of power transformers," in *Proc. International Conference on Electrical Machines and Systems*, ICEMS 2001, vol. 1, pp. 242-245, 2001.
- [1.148] S. Elia, G. Fabbri, E. Nistico, E. Santini, "Design of cast-resin distribution transformers by means of genetic algorithms," *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, pp. 1473-1477, 2006.
- [1.149] N. Tutkun, A. Moses, "Design optimization of a typical strip-wound toroidal core using genetic algorithms," *Journal on Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 277, no. 1-2, pp. 216-220, 2004.
- [1.150] B. Kennedy, *Energy Efficient Transformers*, McGraw-Hill, 1998.

- [1.151] B. W. McConnell, "Increasing distribution transformer efficiency: potential for energy savings," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 18, no 7, pp. 8-10, Jul. 1998.
- [1.152] R. Targosz (ed) et al., *The Potential for Global Energy Savings from High Energy Efficiency Distribution Transformers*, Leonardo Energy, European Copper Institute, Feb. 2005.
- [1.153] European Commission, *External Costs: Research results on socio-environmental damages due to electricity and transport*, Directorate-General for Research, Brussels, Study 20198, 2003.
- [1.154] ANSI/IEEE Standard C57.120, "Loss Evaluation Guide for Power Transformers and Reactors," 1992.
- [1.155] NEMA Standard, "Guide for Determining Energy Efficiency for Distribution Transformers," TP 1-2002.
- [1.156] S. Merritt, S. Chaitkin, "No Load versus Load Loss," *IEEE Industry Applications*, vol. 9, no. 6, pp. 21-28, Nov. 2003.
- [1.157] J. F. Baranowski, T. A. Edison, P. J. Hopkinson, "An alternative evaluation of distribution transformers to achieve the lowest TOC," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 2, pp. 614-619, Apr. 1992.
- [1.158] S. Y. Merritt, S. D. Chaitkin, "One from menu A - One from menu B," *IEEE Industry Applications*, vol. 11, no. 4, pp. 66-71, Jul. 2005.
- [1.159] W. T. J. Hulshorst and J. F. Groeman, *Energy Saving in Industrial Distribution Transformers*, KEMA report, May 2002.
- [1.160] P. R. Barnes, J. W. Van Dyke, B. W. McConnell, S. Das, "Determination analysis of energy conservation standards for distribution transformers," *Oak Ridge National Laboratory*, ORNL-6847, July 1996.
- [1.161] P. S. Georgilakis, "Decision support system for evaluating transformer investments in the industrial sector," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 181, no. 1-3, pp. 307-312, 2007.
- [1.162] D. L. Nickel, H. R. Braunstein, "Distribution transformer loss evaluation: I – Proposed techniques," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 2, pp. 788-797, Feb. 1981.
- [1.163] D. L. Nickel, H. R. Braunstein, "Distribution transformer loss evaluation: II – Load characteristics and system cost parameters," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 2, pp. 798-811, Feb. 1981.
- [1.164] European Copper Institute, *The Scope for Energy Saving in the EU Through the Use of Energy-Efficient Electricity Distribution Transformers*, Dec. 1999.
- [1.165] J. Frau, J. Gutierrez, A. Ramis, "Consider the true cost of transformer losses," *Transmission and Distribution World*, pp. 50-55, Jul. 2007.
- [1.166] CENELEC, Harmonization Document HD428: 1 S1:1992.
- [1.167] K. C. Schneider, R. F. Hoad, "Initial transformer sizing for single-phase residential load," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 4, pp. 2074-2080, 1992.
- [1.168] C.-S. Chen, T.-H. Wu, "Optimal distribution transformer sizing by dynamic programming," *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 20, pp. 161-167, 1998.
- [1.169] D. Jovanovic, "Planning of optimal location and sizes of distribution transformers using integer programming," *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 25, pp. 717-723, 2003.
- [1.170] L. C. Leung, S. K. Khator, "Transformer procurement and relocation at a large electric utility: a mixed 0-1 linear programming model," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 957-963, 1995.

- [1.171] M. Robinson, S. Wallace, D. Woodward, G. Engstrom, "US Navy power transformer sizing requirements using probabilistic analysis," *Journal of Ship Production*, vol. 22, pp. 212-218 2006.
- [1.172] R. N. Adams, M. A. Laughton, "Optimal planning of power networks using mixed integer programming," in *Proc. IEEE*, vol. 121, no. 2, pp. 139-147, Feb. 1974.
- [1.173] D. M. Crawford, S. B. Holt, "A mathematical optimization technique for locating and sizing distribution substations and deriving their optimal service areas," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 94, no. 2, pp. 230-235, Apr. 1975.
- [1.174] E. Masud, "An iterative procedure for sizing and timing distribution substations using optimization techniques," *IEEE PES Winter Meeting*, pp. 1281-1286, Feb. 1974.
- [1.175] J. V. Oldfield, M. A. Lang, "Dynamic programming network flow procedure for distribution system planning," in *Proc. Power Industry Computer Applications*, 1965.
- [1.176] G. Brauner, M. Zobel, "Knowledge based planning of distribution networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 2, 1994.
- [1.177] V. Miranda, J. V. Ranito, L. M. Proenca, "Genetic algorithms in optimal multistage distribution network planning," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 9, no. 4, 1994.
- [1.178] C. W. Hasselfield, P. Wilson, L. Penier, M. Lou, A.M. Gole, "An automated method for least cost distribution planning," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 2, 1990.
- [1.179] V. Glamocanin, V. Filipovic, "Open loop distribution system design," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 4, pp. 1900-1906, Oct. 1993.

ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της σχεδίασης του μετασχηματιστή έχει ως στόχο την εύρεση των βέλτιστων τιμών των μεταβλητών σχεδίασης (κατασκευαστικών παραμέτρων), οι οποίες εξασφαλίζουν σχεδίαση του μετασχηματιστή με το ελάχιστο δυνατό κόστος κατασκευής με ταυτόχρονη ικανοποίηση όλων των περιορισμών σχεδίασης, δηλαδή των τεχνικών προδιαγραφών και των ιδιαίτερων απαιτήσεων του χρήστη του μετασχηματιστή. Στο Κεφάλαιο αυτό διατυπώνεται το πρόβλημα της βέλτιστης σχεδίασης για τριφασικούς μετασχηματιστές διανομής με τυλιγμένους πυρήνες χρησιμοποιώντας ως μονωτικό ορυκτό λάδι. Το συγκεκριμένο πρόβλημα σχεδίασης αποτελεί ένα δύσκολο πρόβλημα μη γραμμικού μικτού ακέραιου προγραμματισμού με μη γραμμικούς περιορισμούς. Η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί αποτελούν σύνθεση γραμμικής και/ή μη γραμμικής συνάρτησης των μεταβλητών σχεδίασης καθώς επίσης και συνεχείς/ασυνεχείς συναρτήσεις των μεταβλητών σχεδίασης.

2.1 ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

2.1.1 Συμβολισμοί Ηλεκτρικών Μεγεθών

Σύμβολο	Μονάδα	Περιγραφή
Add	%	εμπειρικός συντελεστής προσαύξησης της υπολογισμένης τιμής της τάσης βραχυκύκλωσης
B_G	Gauss	ονομαστική μαγνητική επαγωγή λειτουργίας
B_{max}	Gauss	μέγιστη επιτρεπόμενη ονομαστική μαγνητική επαγωγή λειτουργίας
BIL_{HV}	kV	βασική στάθμη μόνωσης του πηνίου υψηλής τάσης
BIL_{LV}	kV	βασική στάθμη μόνωσης του πηνίου χαμηλής τάσης
CuL_{max}	W	μέγιστες επιτρεπόμενες απώλειες φορτίου
LL	W	απώλειες φορτίου
LL_{max}	W	μέγιστες επιτρεπόμενες απώλειες φορτίου
$CuLosses_{HV}$	W	απώλειες φορτίου του πηνίου υψηλής τάσης
$CuLosses_{LV}$	W	απώλειες φορτίου του πηνίου χαμηλής τάσης
E_2	V	επαγόμενη τάση στο πηνίο χαμηλής τάσης
EdL_{HV}	W	απώλειες δινορρευμάτων του πηνίου υψηλής τάσης
EdL_{LV}	W	απώλειες δινορρευμάτων του πηνίου χαμηλής τάσης
f	Hz	ονομαστική συχνότητα λειτουργίας
I_{HV}	A	ονομαστικό ρεύμα του πηνίου υψηλής τάσης
I_{LV}	A	ονομαστικό ρεύμα του πηνίου χαμηλής τάσης
I_m	A	ρεύμα κενού φορτίου ή ρεύμα μαγνήτισης
$I_{m,max}$	A	μέγιστη τιμή ρεύματος κενού φορτίου ή ρεύματος μαγνήτισης
$Impulse_{HV}$	kV	κρουστική τάση του πηνίου της υψηλής τάσης
$Impulse_{HV,max}$	kV	μέγιστη κρουστική τάση του πηνίου υψηλής τάσης
$Impulse_{LV}$	kV	κρουστική τάση του πηνίου χαμηλής τάσης
$Impulse_{LV,max}$	kV	μέγιστη κρουστική τάση του πηνίου χαμηλής τάσης

Σύμβολο	Μονάδα	Περιγραφή
$Induced_{HV}$	kV	επαγόμενη τάση του πηνίου υψηλής τάσης
$Induced_{HV,max}$	kV	μέγιστη επαγόμενη τάση του πηνίου υψηλής τάσης
$Induced_{LV}$	kV	επαγόμενη τάση του πηνίου χαμηλής τάσης
$Induced_{LV,max}$	kV	μέγιστη επαγόμενη τάση του πηνίου χαμηλής τάσης
IR	%	ωμικό μέρος τάσης βραχυκύκλωσης
IX	%	επαγωγικό μέρος τάσης βραχυκύκλωσης
IZ	%	τάση βραχυκύκλωσης
L_s	H	αυτεπαγωγή σκέδασης πηνίων χαμηλής και υψηλής τάσης μίας φάσης
NLL	W	απώλειες κενού φορτίου
NLL_{max}	W	μέγιστες επιτρεπόμενες απώλειες κενού φορτίου
OTL	W	συνολικές απώλειες κενού φορτίου και φορτίου
OTL_{max}	W	μέγιστες επιτρεπόμενες συνολικές απώλειες κενού φορτίου και φορτίου
$RKVA$	kVA	ονομαστική ισχύς μετασχηματιστή
R_{LV}	Ω	αντίσταση ανά φάση του αγωγού του πηνίου χαμηλής τάσης
$TankLoss$	W	απώλειες που απάγονται μέσω ακτινοβολίας από το δοχείο του μετασχηματιστή και των πτυχωτών ελασμάτων του
$TAPS_{HV,max}$	%	μέγιστη λήψη του πηνίου υψηλής τάσης
$TAPS_{LV,max}$	%	μέγιστη λήψη του πηνίου χαμηλής τάσης
TTL	W	συνολικές απώλειες μετασχηματιστή
U_{HV}	V	τάση του πηνίου υψηλής τάσης
U_{LV}	V	τάση του πηνίου χαμηλής τάσης
U_{KN}	%	εγγυημένη τιμή τάσης βραχυκύκλωσης
U_{sc}	%	τελική υπολογισμένη τιμή τάσης βραχυκύκλωσης μετά την προσθήκη του εμπειρικού συντελεστή προσαύξησης <i>Add</i>
$U_{sc,max}$	%	μέγιστη επιτρεπόμενη τάση βραχυκύκλωσης
$U_{sc,min}$	%	ελάχιστη επιτρεπόμενη τάση βραχυκύκλωσης
Vln_{HV}	V	ονομαστική φασική τάση του πηνίου υψηλής τάσης
$Vln_{HV,maxtap}$	V	μέγιστη φασική τάση του πηνίου υψηλής τάσης
$Vln_{HV,mintap}$	V	ελάχιστη φασική τάση του πηνίου υψηλής τάσης
Vln_{LV}	V	ονομαστική φασική του τάση πηνίου χαμηλής τάσης
$Vln_{LV,maxtap}$	V	μέγιστη φασική τάση του πηνίου χαμηλής τάσης
$Vln_{LV,mintap}$	V	ελάχιστη φασική τάση του πηνίου χαμηλής τάσης
VR	V	ρύθμιση τάσης στο μετασχηματιστή
VR_{max}	V	μέγιστη τιμή ρύθμισης τάσης στο μετασχηματιστή
WPK	W/kg	ειδικές απώλειες κενού φορτίου του μετασχηματιστή
VPT	V	τάση ανά σπείρα
ρ_{HV}	$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$	ειδική αντίσταση του αγωγού του πηνίου υψηλής τάσης
ρ_{LV}	$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$	ειδική αντίσταση του αγωγού του πηνίου χαμηλής τάσης
$\Delta\Theta$	$^{\circ}\text{C}$	ανύψωση της θερμοκρασίας του μετασχηματιστή
$\Delta\Theta_{max}$	$^{\circ}\text{C}$	μέγιστη επιτρεπόμενη ανύψωση της θερμοκρασίας του μετασχηματιστή
Φ_{max}	Wb	μέγιστη μαγνητική ροή

2.1.2 Συμβολισμοί Γεωμετρικών Μεγεθών

Σύμβολο	Μονάδα	Περιγραφή	Σχήμα
$A1$	mm	εύρος μικρού πυρήνα	Σχήμα 2.8
$A2$	mm	εύρος μεγάλου πυρήνα	Σχήμα 2.8
A_c	mm^2	διατομή του ενός πυρήνα	Σχήμα 2.1
A_{tot}	mm^2	διατομή των δύο πυρήνων	Σχήμα 2.1
$area_{HV}$	mm^2	διατομή του πηνίου υψηλής τάσης	Σχήμα 2.8
$area_{LV}$	mm^2	διατομή του πηνίου χαμηλής τάσης	Σχήμα 2.8
B_h	mm	ύψος πυρήνα	Σχήμα 2.8
BLD_{HV}	mm	πάχος του πηνίου υψηλής τάσης	Σχήμα 2.8
BLD_{LV}	mm	πάχος του πηνίου χαμηλής τάσης	Σχήμα 2.8

Σύμβολο	Μονάδα	Περιγραφή	Σχήμα
C	mm	εύρος του μικρού, του μεγάλου πυρήνα και της απόστασής τους	Σχήμα 2.8
$CCEE$	mm	απόσταση του άκρου της μόνωσης του πηνίου (χαμηλής και υψηλής τάσης) από τα οριζόντια σκέλη του πυρήνα	Σχήμα 2.8
$CMT1$	mm	μήκος μέσης διαδρομής του μικρού πυρήνα	Σχήμα 2.8
$CMT2$	mm	μήκος μέσης διαδρομής του μεγάλου πυρήνα	Σχήμα 2.8
$ConductorLength_{HV}$	m	συνολικό μήκος του αγωγού των πηνίων υψηλής τάσης των τριών φάσεων	-
$ConductorLength_{LV}$	m	συνολικό μήκος του αγωγού των πηνίων χαμηλής τάσης των τριών φάσεων	-
D	mm	πλάτος σκέλους του πυρήνα	Σχήμα 2.11
d_{LV}	mm	διάμετρος αγωγού κυκλικής διατομής του πηνίου χαμηλής τάσης	Σχήμα 2.9
D_{LV-C}	mm	απόσταση άκρου μόνωσης πηνίου χαμηλής τάσης από το άκρο του πηνίου χαμηλής τάσης	Σχήμα 2.8
d_{HV}	mm	διάμετρος αγωγού κυκλικής διατομής του πηνίου υψηλής τάσης	Σχήμα 2.9
D_{HV-C}	mm	απόσταση άκρου μόνωσης πηνίου υψηλής τάσης από το άκρο του πηνίου υψηλής τάσης	Σχήμα 2.8
E_u	mm	πάχος σκέλους πυρήνα	Σχήμα 2.8
F	mm	θεωρητικό εύρος του παραθύρου πυρήνα	-
$F1$	mm	εύρος παραθύρου μικρού πυρήνα	Σχήμα 2.8
$F2$	mm	εύρος παραθύρου μεγάλου πυρήνα	Σχήμα 2.8
G	mm	ύψος παραθύρου πυρήνα	Σχήμα 2.8
I_{HV-HV}	mm	ημι-διάκενο μεταξύ των πηνίων υψηλής τάσης δύο διαδοχικών φάσεων	Σχήμα 2.8
I_{HVL}	mm	πάχος της μόνωσης μεταξύ των στρώσεων του πηνίου υψηλής τάσης	Σχήμα 2.9
I_{HV-LV}	mm	πάχος της μόνωσης μεταξύ του πηνίου υψηλής και χαμηλής τάσης	Σχήμα 2.8
I_{LV-C}	mm	πάχος της μόνωσης μεταξύ πηνίου χαμηλής τάσης και πυρήνα	Σχήμα 2.8
I_{LVL}	mm	πάχος της μόνωσης μεταξύ των στρώσεων του πηνίου χαμηλής τάσης	Σχήμα 2.9
K	mm	απόσταση μεταξύ μεγάλου και μικρού πυρήνα	Σχήμα 2.8
$L1$	mm	βοηθητική μεταβλητή για τον υπολογισμό των διαστάσεων των πηνίων	-
$L2$	mm	βοηθητική μεταβλητή για τον υπολογισμό των διαστάσεων των πηνίων	-
ML	mm	διάσταση καλουπιού πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης μιας φάσης κατά τη x διεύθυνση	Σχήμα 2.12
MT_{HV}	m	μέση σπείρα του πηνίου υψηλής τάσης	Σχήμα 2.11
MT_{LV}	m	μέση σπείρα του πηνίου χαμηλής τάσης	Σχήμα 2.11
MT_{LV-HV}	mm	μήκος της μέσης σπείρας των πηνίων χαμηλής και υψηλής τάσης	Σχήμα 2.11
MW	mm	διάσταση καλουπιού πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης μιας φάσης κατά την y διεύθυνση	Σχήμα 2.12
P_H	mm	ύψος πτυχωτού ελάσματος	Σχήμα 2.8
s_{HV}	mm	πλάτος ταινίας (φύλλο χαλκού ή αλουμινίου) του πηνίου υψηλής τάσης	Σχήμα 2.9
s_{LV}	mm	πλάτος ταινίας (φύλλο χαλκού ή αλουμινίου) του πηνίου χαμηλής τάσης	Σχήμα 2.9
$SPLD_{HV}$	mm	συνολικό πάχος του πηνίου υψηλής τάσης	Σχήμα 2.8
$SPLD_{LV}$	mm	συνολικό πάχος του πηνίου χαμηλής τάσης	Σχήμα 2.8
TD_{HV}	mm	μήκος στρώσης του πηνίου υψηλής τάσης	Σχήμα 2.8
TD_{LV}	mm	μήκος στρώσης του πηνίου χαμηλής τάσης	Σχήμα 2.8

Σύμβολο	Μονάδα	Περιγραφή	Σχήμα
$ThickDucts$	mm	συνολικό πάχος των καναλιών του πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης μιας φάσης	-
TI_{HV}	mm	πάχος μόνωσης των λήψεων του πηνίου υψηλής τάσης	-
TI_{LV}	mm	πάχος μόνωσης των λήψεων του πηνίου χαμηλής τάσης	-
TL	mm	μήκος δοχείου	Σχήμα 2.8
TL_{max}	mm	μέγιστο μήκος δοχείου	-
t_{LV}	mm	πάχος αγωγού ορθογωνικής διατομής του πηνίου χαμηλής τάσης	Σχήμα 2.9
$TurnThick_{LV}$	mm	πάχος μονωμένου αγωγού του πηνίου χαμηλής τάσης	Σχήμα 2.9
$TurnThick_{HV}$	mm	πάχος μονωμένου αγωγού του πηνίου υψηλής τάσης	Σχήμα 2.9
$TurnWidth_{LV}$	mm	πλάτος μονωμένου αγωγού του πηνίου χαμηλής τάσης	Σχήμα 2.9
$TurnWidth_{HV}$	mm	πλάτος μονωμένου αγωγού του πηνίου υψηλής τάσης	Σχήμα 2.9
TH	mm	ύψος δοχείου	Σχήμα 2.8
TH_{max}	mm	μέγιστο ύψος δοχείου	-
t_{HV}	mm	πάχος αγωγού ορθογωνικής διατομής του πηνίου υψηλής τάσης	Σχήμα 2.9
TW	mm	πλάτος δοχείου	Σχήμα 2.13
TW_{max}	mm	μέγιστο πλάτος δοχείου	-
W_{HV}	mm	πλάτος αγωγού ορθογωνικής διατομής του πηνίου υψηλής τάσης	Σχήμα 2.9
W_{LV}	mm	πλάτος αγωγού ορθογωνικής διατομής του πηνίου χαμηλής τάσης	Σχήμα 2.9
x	-	διεύθυνση κατά μήκος του μετασχηματιστή	Σχήμα 2.2
y	-	διεύθυνση κατά πλάτος του μετασχηματιστή	Σχήμα 2.2
z	-	διεύθυνση κατά ύψος του μετασχηματιστή	Σχήμα 2.2
Δd_{HV}	mm	πάχος μόνωσης αγωγού κυκλικής διατομής του πηνίου υψηλής τάσης	Σχήμα 2.9
Δd_{LV}	mm	πάχος μόνωσης αγωγού κυκλικής διατομής του πηνίου χαμηλής τάσης	Σχήμα 2.9
ΔW_{HV}	mm	πάχος μόνωσης του αγωγού ορθογωνικής διατομής του πηνίου υψηλής τάσης	Σχήμα 2.9
ΔW_{LV}	mm	πάχος μόνωσης του αγωγού ορθογωνικής διατομής του πηνίου χαμηλής τάσης	Σχήμα 2.9

2.1.3 Συμβολισμοί Οικονομικών Μεγεθών

Σύμβολο	Μονάδα	Περιγραφή
A	€/W	συντελεστής απωλειών κενού φορτίου ή η αξία των απωλειών κενού φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή
ACP	€	κόστος ενεργού μέρους μετασχηματιστή
A_e	€/kW	συντελεστής περιβαλλοντικού κόστους λόγω των απωλειών κενού φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή
B	€/W	συντελεστής απωλειών φορτίου ή η αξία των απωλειών φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή
B_e	€/kW	συντελεστής περιβαλλοντικού κόστους λόγω των απωλειών φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή
BP	€	τιμή πώλησης μετασχηματιστή
C_1	€	συνολικό κόστος του αγωγού των πηνίων χαμηλής τάσης των τριών φάσεων
C_2	€	συνολικό κόστος του αγωγού των πηνίων υψηλής τάσης των τριών φάσεων

Σύμβολο	Μονάδα	Περιγραφή
C_3	€	συνολικό κόστος μαγνητικής λαμαρίνας των τεσσάρων πυρήνων του μετασχηματιστή
C_4	€	συνολικό κόστος μονωτικών χαρτιών
C_5	€	συνολικό κόστος καναλιών
C_6	€	συνολικό κόστος λαδιού
C_7	€	συνολικό κόστος ψυκτικών (πτυχωτών) πανέλων
C_8	€	συνολικό κόστος λαμαρίνας δοχείου
CPK_{DS}	€/kg	κόστος των καναλιών ανά κιλό
CPK_{LV}	€/kg	κόστος της μαγνητικής λαμαρίνας ανά κιλό
CPK_{MS}	€/kg	κόστος του λαδιού ανά κιλό
CPK_O	€/kg	κόστος του μονωτικού χαρτιού ανά κιλό
CPK_p	€/kg	κόστος του ψυκτικού πανέλου ανά κιλό
CPK_R	€/kg	κόστος της λαμαρίνας δοχείου ανά κιλό
CPK_S	€/kg	κόστος του αγωγού των πηνίων υψηλής τάσης ανά κιλό
CPK_{HV}	€/kg	κόστος του αγωγού των πηνίων χαμηλής τάσης ανά κιλό
CRM	€	κόστος υπόλοιπων υλικών μετασχηματιστή
LC	€	κόστος εργατικών
MMC	€	κόστος οκτώ κύριων υλικών
SM	€	περιθώριο κέρδους από την πώληση του μετασχηματιστή
TMC	€	κατασκευαστικό κόστος μετασχηματιστή
TOC	€	συνολικό κόστος κατοχής

2.1.4 Συμβολισμοί Διάφορων Μεγεθών

Σύμβολο	Μονάδα	Περιγραφή
CSF	-	συντελεστής πλήρωσης πυρήνα
$ConductorWeight_{LV}$	kg	συνολικό βάρος των πηνίων χαμηλής τάσης των τριών φάσεων
$ConductorWeight_{HV}$	kg	συνολικό βάρος των πηνίων υψηλής τάσης των τριών φάσεων
cs_{HV}	-	αριθμός δοκιμών υπολογισμού διατομής πηνίου υψηλής τάσης
cs_{LV}	-	αριθμός δοκιμών υπολογισμού διατομής πηνίου χαμηλής τάσης
CTW	kg	συνολικό βάρος των τεσσάρων πυρήνων του μετασχηματιστή
$Ducts_{HV}$	-	αριθμός καναλιών του πηνίου υψηλής τάσης
$Ducts_{LV}$	-	αριθμός καναλιών του πηνίου χαμηλής τάσης
g_{LV}	gr/cm ³	πυκνότητα αγωγού του πηνίου χαμηλής τάσης
g_{MS}	gr/cm ³	πυκνότητα της μαγνητικής λαμαρίνας
g_{HV}	gr/cm ⁴	πυκνότητα αγωγού του πηνίου υψηλής τάσης
HV_{IT}	-	είδος μόνωσης αγωγού του πηνίου υψηλής τάσης
$Layers_{LV}$	-	αριθμός στρώσεων του πηνίου χαμηλής τάσης
$LDSP_{HV}$	-	συντελεστής χώρου των στρώσεων του πηνίου υψηλής τάσης
$LDSP_{LV}$	-	συντελεστής χώρου των στρώσεων του πηνίου χαμηλής τάσης
LV_{IT}	-	είδος μόνωσης αγωγού του πηνίου χαμηλής τάσης
n	%	απόδοση του μετασχηματιστή
n_D	-	αριθμός δοκιμών υπολογισμού της διάστασης D του πυρήνα
n_{FD}	-	αριθμός δοκιμών υπολογισμού μαγνητικής επαγωγής
n_G	-	αριθμός δοκιμών υπολογισμού της διάστασης G του πυρήνα
n_{loops}	-	συνολικός αριθμός ανακυκλώσεων υπολογισμών
n_{LV}	-	αριθμός δοκιμών υπολογισμού σπειρών του πηνίου χαμηλής τάσης
n_{min}	%	ελάχιστη απόδοση του μετασχηματιστή
$TDSP_{LV}$	-	συντελεστής στρώσης σπειρών του πηνίου χαμηλής τάσης
$TDSP_{HV}$	-	συντελεστής στρώσης σπειρών του πηνίου υψηλής τάσης
$Turns_{HV,max}$	-	μέγιστος αριθμός σπειρών του πηνίου υψηλής τάσης
$turns_{HV}$	-	αριθμός σπειρών του πηνίου υψηλής τάσης
$turns_{LV}$	-	αριθμός σπειρών του πηνίου χαμηλής τάσης

Σύμβολο	Μονάδα	Περιγραφή
$TurnsMain_{LV}$	-	ονομαστικός αριθμός σπειρών του πηνίου χαμηλής τάσης
$TurnsMain_{HV}$	-	ονομαστικός αριθμός σπειρών του πηνίου υψηλής τάσης
$TurnsPerLayer_{LV}$	-	σπείρες ανά στρώση του πηνίου χαμηλής τάσης
$TurnsPerLayer_{HV}$	-	σπείρες ανά στρώση του πηνίου υψηλής τάσης
M/Σ	-	μετασχηματιστής

2.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Στη σύγχρονη εποχή του έντονου ανταγωνισμού και της παγκοσμιοποίησης της οικονομίας, παρατηρείται η επιτακτική ανάγκη για βελτίωση της απόδοσης των μετασχηματιστών με ταυτόχρονη μείωση του κόστους κατασκευής τους. Στόχος του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι να παρουσιαστεί η μοντελοποίηση του προβλήματος σχεδίασης του μετασχηματιστή καθώς και η υφιστάμενη μέθοδος επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος από τη βιομηχανία. Η υφιστάμενη μεθοδολογία βέλτιστης σχεδίασης βασίζεται σε ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους των οκτώ κύριων υλικών, του μετασχηματιστή, το οποίο δίνεται από την εξίσωση (2.2), με ταυτόχρονη ικανοποίηση όλων των περιορισμών του προβλήματος. Η μοντελοποίηση αφορά τριφασικούς μετασχηματιστές διανομής με τυλιγμένους πυρήνες και ορυκτό λάδι ως μονωτικό.

2.2.1 Μεταβλητές Σχεδίασης

Το πρόβλημα σχεδίασης του μετασχηματιστή περιγράφεται με πλήθος παραμέτρων που καθορίζουν το υλικό και τις μηχανικές του ιδιότητες, τη συνδεσμολογία των πηνίων και τις διατομές των αγωγών, την κατασκευή του πυρήνα, τις φορτίσεις και τους συνδυασμούς φορτίσεων που ορίζουν οι σχετικοί κανονισμοί και τους ελέγχους αντοχής και λειτουργικότητας που εξασφαλίζουν τη συμπεριφορά του.

Αν από το σύνολο των παραμέτρων που ορίζουν το πρόβλημα επιλεγούν ορισμένες ως άγνωστες μεταβλητές που μπορούν να μεταβάλλονται εντός προκαθορισμένων ορίων είναι φανερό ότι ορίζεται μια πολυπαραμετρική οικογένεια σχεδιάσεων που ορίζει το χώρο των λύσεων του προβλήματος. Οι μεταβλητές αυτές καλούνται μεταβλητές σχεδίασης του προβλήματος x_i με $i=1, 2, \dots, n$ οι οποίες ορίζουν το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδίασης x του προβλήματος. Ο καθορισμός των μεταβλητών σχεδίασης αποτελεί το πρώτο βήμα της διατύπωσης του προβλήματος βέλτιστης σχεδίασης. Οι μεταβλητές σχεδίασης θα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν ανεξάρτητες μεταξύ τους ώστε το πρόβλημα να μην περιπλέκεται άσκοπα χρησιμοποιώντας περιττές μεταβλητές οι οποίες εκ των υστέρων θα πρέπει να δεσμεύονται κατάλληλα ώστε να εξασφαλίζεται το φυσικό νόημα της περιγραφής του προβλήματος.

2.2.1.1 Συνεχείς και Διακριτές Μεταβλητές Σχεδίασης

Οι μεταβλητές σχεδίασης διακρίνονται σε συνεχείς (*continuous*) και διακριτές ή ακέραιες (*discrete or integer*), ανάλογα με το πεδίο τιμών στο οποίο μπορεί να μεταβάλλονται. Αν για παράδειγμα η διάμετρος του αγωγού κατασκευής του πηνίου μπορεί να λαμβάνει οποιαδήποτε τιμή στο διάστημα $[0.01 \ 4.25] \text{ mm}$, τότε χαρακτηρίζεται ως συνεχής. Αν όμως είναι επιθυμητό να επιλυθεί το πρόβλημα και να χρησιμοποιηθεί μία από τις πρότυπες διατομές του εμπορίου, τότε η διάμετρος θα πρέπει να λαμβάνει διακριτές τιμές στο ίδιο ή άλλο διάστημα, όπως αυτές ορίζονται από σχετικούς πίνακες. Στη περίπτωση αυτή η μεταβλητή σχεδίασης χαρακτηρίζεται ως διακριτή.

Στην πράξη πολλές φορές ορισμένες μεταβλητές του προβλήματος είναι συνεχείς και ορισμένες διακριτές οπότε το διάνυσμα των μεταβλητών σχεδίασης είναι μικτό. Μικτό είναι επίσης και το διάστημα που χρησιμοποιείται για τη βέλτιστη σχεδίαση των μετασχηματιστών, όπου για παράδειγμα ο αριθμός των σπειρών του πηνίου χαμηλής τάσης ορίζεται ως ακέραια μεταβλητή σχεδίασης, ενώ το πάχος σκέλους του πυρήνα ορίζεται ως συνεχής μεταβλητή σχεδίασης.

2.2.1.2 Όρια των Μεταβλητών Σχεδίασης

Για την αποτελεσματική θεώρηση του προβλήματος, οι μεταβλητές σχεδίασης περιορίζονται σε συγκεκριμένα όρια εντός των οποίων αναζητείται η βέλτιστη λύση. Η επιλογή των ορίων αυτών δεν είναι πάντοτε εύκολη και γίνεται σε συνδυασμό με την επιλογή των μεταβλητών σχεδίασης κατά τρόπο που να εξασφαλίζεται το φυσικό τους νόημα. Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι ο καθορισμός των ορίων των μεταβλητών σχεδίασης απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή.

2.2.2 Αντικειμενική Συνάρτηση

Όλες οι λύσεις στο χώρο των λύσεων ορίζουν επιτρεπτές σχεδιάσεις, δηλαδή σχεδιάσεις που ικανοποιούν τους περιορισμούς του προβλήματος. Για να καθοριστεί μεταξύ αυτών η βέλτιστη σχεδίαση απαιτείται ένα κριτήριο το οποίο να τις ιεραρχήσει. Το κριτήριο αυτό καλείται αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος (*objective function*).

Η αντικειμενική συνάρτηση εξαρτάται από τις μεταβλητές σχεδίασης του προβλήματος. Για κάθε σχεδίαση, που προκύπτει θέτοντας αριθμητικές τιμές στις μεταβλητές σχεδίασης, παίρνουμε μια συγκεκριμένη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Συνεπώς, είναι εύκολο να συγκρίνουμε διάφορες πιθανές σχεδιάσεις, έχοντας ως κριτήριο την αντικειμενική συνάρτηση, διότι η βέλτιστη σχεδίαση είναι εκείνη που ελαχιστοποιεί την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Στο πρόβλημα της βέλτιστης σχεδίασης του μετασχηματιστή χρησιμοποιούνται πέντε διαφορετικά είδη αντικειμενικών συναρτήσεων. Οι διάφοροι κατασκευαστές μετασχηματιστών ανάλογα με τις απαιτήσεις που θέτουν, χρησιμοποιούν τις αντίστοιχες αντικειμενικές συναρτήσεις. Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων είναι η συνάρτηση του κόστους των οκτώ κύριων υλικών.

2.2.2.1 Ελαχιστοποίηση Κόστους Ενεργού Μέρους Μετασχηματιστή

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος της βελτιστοποίησης του κόστους του ενεργού μέρους του μετασχηματιστή αποτελείται από το συνολικό κόστος των τεσσάρων κύριων υλικών του μετασχηματιστή, ACP (σε €):

$$\min ACP = \min \sum_{i=1}^4 C_i \quad (2.1)$$

όπου C_1 είναι το κόστος των τριών πηνίων χαμηλής τάσης (σε €), C_2 είναι το κόστος των τριών πηνίων υψηλής τάσης (σε €), C_3 είναι το κόστος των τεσσάρων πυρήνων του μετασχηματιστή (σε €) και C_4 είναι το κόστος των μονωτικών (σε €).

2.2.2.2 Ελαχιστοποίηση Κόστους Οκτώ Κύριων Υλικών

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος της βελτιστοποίησης του κόστους του ενεργού και μηχανικού μέρους του μετασχηματιστή αποτελείται από το συνολικό κόστος των οκτώ κύριων υλικών του μετασχηματιστή, MMC (σε €):

$$\min MMC = \min \sum_{i=1}^8 C_i \quad (2.2)$$

όπου C_1 είναι το κόστος των τριών πηνίων χαμηλής τάσης (σε €), C_2 είναι το κόστος των τριών πηνίων υψηλής τάσης (σε €), C_3 είναι το κόστος των τεσσάρων πυρήνων του μετασχηματιστή (σε €), C_4 είναι το κόστος των μονωτικών (σε €), C_5 είναι το κόστος των καναλιών ψύξης (σε €), C_6 είναι το κόστος του μονωτικού λαδιού (σε €), C_7 είναι το κόστος των πτυχωτών ελασμάτων (ψυκτικών πανέλων) (σε €), και C_8 είναι το κόστος του δοχείου του μετασχηματιστή (σε €).

2.2.2.3 Ελαχιστοποίηση Κατασκευαστικού Κόστους

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος της βελτιστοποίησης του κατασκευαστικού κόστους του μετασχηματιστή, TMC (σε €), αποτελείται από το παρακάτω άθροισμα:

$$\min TMC = \min(MMC + CRM + LC) \quad (2.3)$$

όπου MMC είναι το κόστος των οκτώ κύριων υλικών (σε €), CRM είναι το κόστος των υπόλοιπων υλικών του μετασχηματιστή (σε €) και LC είναι το κόστος των εργατικών (σε €).

2.2.2.4 Ελαχιστοποίηση Συνολικού Κόστους Κατοχής

Η αντικειμενική συνάρτηση της βελτιστοποίησης του συνολικού κόστους κατοχής του μετασχηματιστή, TOC (σε €), δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\min TOC = \min \left(\underbrace{\left(\frac{TMC}{1 - SM} \right)}_{BP} + A \cdot NLL + B \cdot LL \right) \quad (2.4)$$

όπου TMC είναι το κατασκευαστικό κόστος του μετασχηματιστή (σε €), SM είναι το περιθώριο κέρδους από την πώληση του μετασχηματιστή (σε €), A είναι ο συντελεστής απωλειών κενού φορτίου του μετασχηματιστή (σε €/W), NLL είναι οι απώλειες κενού φορτίου του μετασχηματιστή (σε W), B είναι ο συντελεστής απωλειών φορτίου του μετασχηματιστή (σε €/W), και LL είναι οι απώλειες φορτίου του μετασχηματιστή (σε W). Να επισημανθεί ότι BP είναι η τιμή πώλησης του μετασχηματιστή (σε €).

2.2.2.5 Ελαχιστοποίηση Συνολικού Κόστους Κατοχής με Περιβαλλοντικό κόστος

Η αντικειμενική συνάρτηση του συνολικού κόστους κατοχής του μετασχηματιστή λαμβάνοντας υπόψη το περιβαλλοντικό κόστος, TOC_e (σε €), δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\min TOC_e = \min(TOC + A_e \cdot \Delta P_{NLL} + B_e \cdot \Delta P_{LL}) \quad (2.5)$$

όπου TOC είναι το συνολικό κόστος κατοχής του μετασχηματιστή (σε €), A_e είναι ο συντελεστής περιβαλλοντικού κόστους λόγω των απωλειών κενού φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή (σε €/kW), B_e είναι ο συντελεστής περιβαλλοντικού κόστους λόγω των απωλειών φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή (σε €/kW), ΔP_{NLL} είναι η διαφορά απωλειών κενού φορτίου μεταξύ του αξιολογούμενου μετασχηματιστή και του μετασχηματιστή αναφοράς (σε kW) και ΔP_{LL} είναι η διαφορά απωλειών φορτίου μεταξύ του αξιολογούμενου μετασχηματιστή και του μετασχηματιστή αναφοράς (σε kW).

2.2.3 Περιορισμοί

Για την ορθή διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης σχεδίασης μετασχηματιστή απαιτείται η διατύπωση ενός συνόλου περιορισμών που θα εξασφαλίζει αποδεκτές λύσεις, δηλαδή λύσεις που θα ανταποκρίνονται στο περιγραφόμενο πρόβλημα. Οι περιορισμοί αυτοί αποτελούν εκφράσεις μερικών ή και όλων των μεταβλητών σχεδίασης του προβλήματος σε άμεση ή πεπλεγμένη μορφή. Διατυπώνονται με τη μορφή ανισοτήτων ή ισοτήτων και αφορούν στον περιορισμό της περιγραφής του προβλήματος και στην οριοθέτηση της συμπεριφοράς του. Για παράδειγμα μπορεί να περιγράψουν τον περιορισμό των απωλειών φορτίου ώστε να ικανοποιείται ο σχετικός έλεγχος λειτουργικότητας του μετασχηματιστή, δηλαδή οι απώλειες φορτίου να μην υπερβαίνουν τις μέγιστες επιτρεπόμενες απώλειες φορτίου.

Οι περιορισμοί διακρίνονται σε περιορισμούς ισότητας (*equality constraints*) και ανισοτικούς περιορισμούς (*inequality constraints*). Στο πρόβλημα της σχεδίασης του μετασχηματιστή, συνήθως η πλειονότητα των περιορισμών εκφράζονται ως περιορισμοί ανισοτήτων, όπου αφορούν για παράδειγμα τις απώλειες φορτίου συναρτήσει των

εγγυημένων απωλειών του φορτίου, τις απώλειες κενού φορτίου συναρτήσει των εγγυημένων απωλειών του κενού φορτίου, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή και την ψύξη του μετασχηματιστή.

Το σύνολο των περιορισμών του προβλήματος θα πρέπει να ικανοποιείται ώστε η σχεδίαση να θεωρείται επιτρεπτή. Το σύνολο των ανισοτικών περιορισμών που ικανοποιείται ως ισότητα για συγκεκριμένες τιμές των μεταβλητών σχεδίασης αποτελεί το σύνολο των ενεργών περιορισμών (*active constraints*) για τη συγκεκριμένη σχεδίαση. Είναι φανερό ότι ενδέχεται να μην υπάρχει σχεδίαση για την οποία όλοι οι ανισοτικοί περιορισμοί να είναι ενεργοί. Όπως επίσης το σύνολο των περιορισμών που καθορίζεται για ένα πρόβλημα εάν δε είναι γνωστό εκ των προτέρων ότι αντιστοιχεί σε μη εφικτή σχεδίαση να ορίζει ένα κενό χώρο λύσεων για το πρόβλημα.

Οι περιορισμοί του προβλήματος της βέλτιστης σχεδίασης του μετασχηματιστή είναι οι ακόλουθοι:

2.2.3.1 Περιορισμός Επαγόμενης Τάσης

Ο περιορισμός της επαγόμενης τάσης εκφράζει τη σχέση μεταξύ της επαγόμενης τάσης στο δευτερεύον τύλιγμα (τύλιγμα χαμηλής τάσης) και τη μαγνητική επαγωγή, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$E_2 = 4.44 \cdot f \cdot \text{turns}_{LV} \cdot \Phi_{\max} \quad (2.6)$$

όπου E_2 είναι η επαγόμενη τάση στο πηνίο χαμηλής τάσης (σε V), f είναι η συχνότητα (σε Hz), turns_{LV} είναι ο αριθμός των σπειρών του πηνίου της χαμηλής τάσης και $\Phi_{\max}$ είναι η μέγιστη μαγνητική ροή (σε Wb). Η μέγιστη μαγνητική ροή σε μια συγκεκριμένη περιοχή του πυρήνα δίνεται από την εξίσωση:

$$\Phi_{\max} = \int_{A_{tot}} B_G \cdot dA_{tot} \quad (2.7)$$

όπου dA_{tot} είναι η στοιχειώδης μονάδα επιφάνειας της διατομής του πυρήνα. Αν το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής είναι κάθετο στο επίπεδο της διατομής των δύο πυρήνων A_{tot} (σε mm²) και το μέτρο της είναι σταθερό σε όλη την περιοχή, η εξίσωση (2.7) απλοστεύεται και γίνεται:

$$\Phi_{\max} = B_G \cdot A_{tot} \quad (2.8)$$

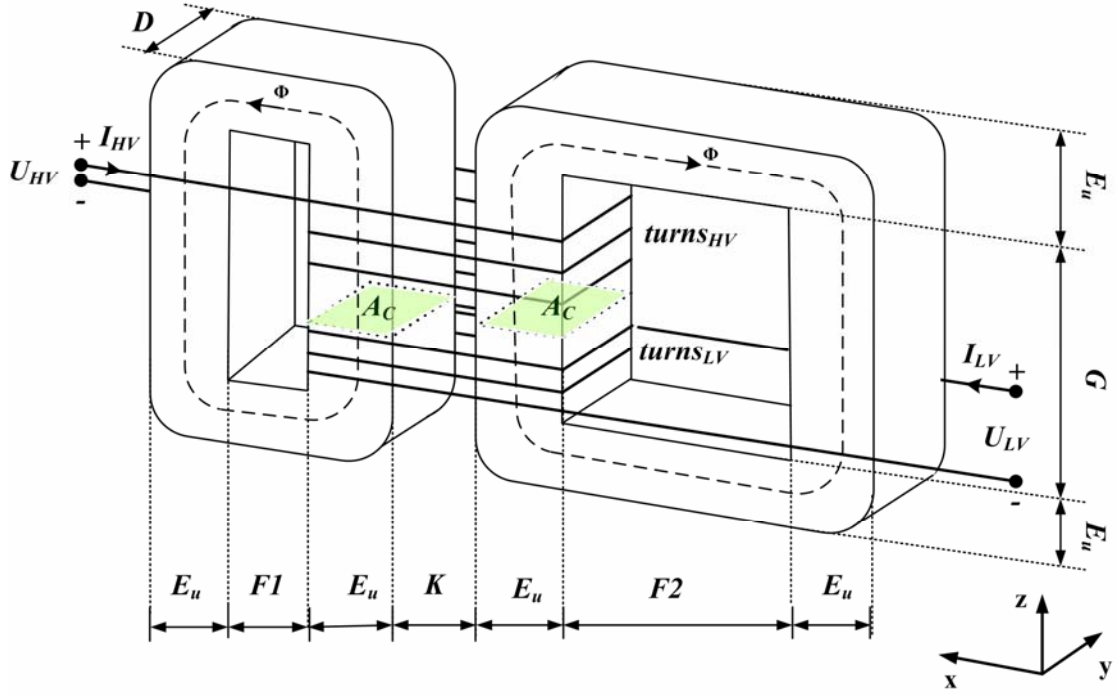
Η διατομή των δύο πυρήνων A_{tot} (σε mm²) ισούται με το διπλάσιο του A_c (σε mm²), όπου A_c η διατομή του ενός πυρήνα. Σύμφωνα με το Σχήμα 2.1, το επίπεδο της διατομής κάθε πυρήνα (A_c) είναι ισοδύναμο, επομένως η μέγιστη μαγνητική ροή (σε Wb) δίνεται από τον τύπο:

$$\Phi_{\max} = B_G \cdot A_{tot} = B_G \cdot 2 \cdot A_c = B_G \cdot 2 \cdot CSF \cdot E_u \cdot D \quad (2.9)$$

όπου CSF είναι ο συντελεστής πλήρωσης χώρου του πυρήνα και ο οποίος λαμβάνεται εμπειρικά ίσος με 0.965. Ο συγκεκριμένος συντελεστής εκφράζει την καθαρή διατομή του μαγνητικού υλικού (αφαιρείται η μόνωση και ενσωματώνεται η χαλαρότητα στο τύλιγμα του πυρήνα).

Σύμφωνα με την (2.9), η επαγόμενη τάση στο πηνίο χαμηλής τάσης που προκύπτει είναι:

$$E_2 = 4.44 \cdot f \cdot \text{turns}_{LV} \cdot B_G \cdot 2 \cdot CSF \cdot E_u \cdot D \quad (2.10)$$



Σχήμα 2.1 Δημιουργία μαγνητικής ροής σε μετασχηματιστές διανομής με τυλιγμένους πυρήνες. Για απλότητα παρουσιάζεται το τύλιγμα της μιας μόνο φάσης.

2.2.3.2 Περιορισμός Λόγου Σπειρών

Ο λόγος των τάσεων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος ισούται με το λόγο του αριθμού των σπειρών των αντίστοιχων τυλιγμάτων (τυλίγματος υψηλής και χαμηλής τάσης), σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{U_{HV}}{U_{LV}} = \frac{turns_{HV}}{turns_{LV}} \quad (2.11)$$

όπου U_{HV} είναι η τάση του πηνίου υψηλής τάσης, U_{LV} είναι η τάση του πηνίου χαμηλής τάσης, $turns_{HV}$ είναι ο αριθμός των σπειρών του πηνίου υψηλής τάσης και $turns_{LV}$ είναι ο αριθμός των σπειρών του πηνίου χαμηλής τάσης.

2.2.3.3 Περιορισμός Απωλειών Κενού Φορτίου

Οι απώλειες κενού φορτίου (NLL) πρέπει να είναι μικρότερες από τις μέγιστες απώλειες κενού φορτίου (NLL_{max}), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$NLL < NLL_{max} \quad (2.12)$$

2.2.3.4 Περιορισμός Απωλειών Φορτίου

Οι απώλειες φορτίου (LL) απαιτείται να είναι μικρότερες από τις μέγιστες απώλειες φορτίου (LL_{max}), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$LL < LL_{max} \quad (2.13)$$

2.2.3.5 Περιορισμός Συνολικών Απωλειών (Κενού Φορτίου και Φορτίου)

Οι συνολικές απώλειες (OTL) (κενού φορτίου και φορτίου) απαιτείται να είναι μικρότερες από τις μέγιστες απώλειες (OTL_{max}), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$OTL < OTL_{max} \quad (2.14)$$

2.2.3.6 Περιορισμός Τάσης Βραχυκύκλωσης

Η σχεδιασμένη τάση βραχυκύκλωσης (U_{sc}) πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ της ελάχιστης ($U_{sc,min}$) και μέγιστης ($U_{sc,max}$) επιτρεπόμενης τάσης βραχυκύκλωσης, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$U_{sc,min} < U_{sc} < U_{sc,max} \quad (2.15)$$

2.2.3.7 Περιορισμός Μαγνητικής Επαγωγής

Ένας ακόμη περιορισμός που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι η σχεδιασμένη μαγνητική επαγωγή (B_G) επιβάλλεται να είναι μικρότερη από τη μαγνητική επαγωγή που αντιστοιχεί σε κορεσμό του υλικού του πυρήνα (B_{max}), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$B_G < B_{max} \quad (2.16)$$

2.2.3.8 Περιορισμός Μετάδοσης Θερμότητας

Οι συνολικές απώλειες του μετασχηματιστή (TTL) απαιτείται να είναι μικρότερες από τις απώλειες που απάγονται μέσω ακτινοβολίας από το δοχείο του μετασχηματιστή και των πτυχωτών ελασμάτων του ($TankLoss$), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$TTL < TankLoss \quad (2.17)$$

2.2.3.9 Περιορισμός Ανύψωσης Θερμοκρασίας

Η ανύψωση της θερμοκρασίας του μετασχηματιστή ($\Delta\Theta$) (εξαιτίας των απωλειών φορτίου και κενού φορτίου) πρέπει να είναι μικρότερη από τη μέγιστη επιτρεπόμενη ανύψωση της θερμοκρασίας του μετασχηματιστή ($\Delta\Theta_{max}$), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\Delta\Theta < \Delta\Theta_{max} \quad (2.18)$$

2.2.3.10 Περιορισμός Απόδοσης Μετασχηματιστή

Η απόδοση του μετασχηματιστή (n) πρέπει να είναι μεγαλύτερη από μια δεδομένη τιμή απόδοσης (n_{min}), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$n > n_{min} \quad (2.19)$$

2.2.3.11 Περιορισμός Ρεύματος Κενού Φορτίου (Ρεύματος Μαγνήτισης¹)

Το ρεύμα κενού φορτίου (I_m)(ρεύμα μαγνήτισης) του μετασχηματιστή πρέπει να είναι μικρότερο από μια μέγιστη τιμή ρεύματος κενού φορτίου ($I_{m,max}$) (ρεύματος μαγνήτισης), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$I_m < I_{m,max} \quad (2.20)$$

2.2.3.12 Περιορισμός Ρύθμισης Τάσης

Η ρύθμιση τάσης (VR) στο μετασχηματιστή πρέπει να είναι μικρότερη από μια μέγιστη τιμή ρύθμισης τάσης (VR_{max}), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$VR < VR_{max} \quad (2.21)$$

¹ Το ρεύμα κενού φορτίου ονομάζεται και ρεύμα μαγνήτισης και εκφράζει το ρεύμα που απορροφά ο μετασχηματιστής όταν δεν έχει φορτίο, είναι πολύ μικρό και είναι τόσο ώστε να μαγνητιστεί ο πυρήνας.

2.2.3.13 Περιορισμός Αντοχής των Μονωτικών

Το πάχος της μόνωσης πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να εξασφαλίζει αντοχή σε δοκιμή επαγόμενης και κρουστικής τάσης. Ειδικότερα η επαγόμενη τάση ($Induced_{LV}$ και $Induced_{HV}$) πρέπει να είναι μικρότερη από τη μέγιστη επαγόμενη τάση που μπορεί να αντέξει η μόνωση ($Induced_{LV,max}$ και $Induced_{HV,max}$), σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned} Induced_{LV} &< Induced_{LV,max} \\ Induced_{HV} &< Induced_{HV,max} \end{aligned} \quad (2.22)$$

και η κρουστική τάση ($Impulse_{LV}$ και $Impulse_{HV}$) πρέπει να είναι μικρότερη από τη μέγιστη κρουστική τάση που μπορεί να αντέξει η μόνωση ($Impulse_{LV,max}$ και $Impulse_{HV,max}$), σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned} Impulse_{LV} &< Impulse_{LV,max} \\ Impulse_{HV} &< Impulse_{HV,max} \end{aligned} \quad (2.23)$$

2.2.3.14 Περιορισμός Διάστασης Δοχείου

Οι διαστάσεις του δοχείου πρέπει να μην υπερβαίνουν τις μέγιστες επιτρεπόμενες διαστάσεις του δοχείου του μετασχηματιστή, σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$TL < TL_{max} \quad (2.24)$$

$$TW < TW_{max} \quad (2.25)$$

$$TH < TH_{max} \quad (2.26)$$

όπου TL , TW και TH είναι η διάσταση μήκους, πλάτους και ύψους του δοχείου, αντίστοιχα, ενώ TL_{max} , TW_{max} και TH_{max} είναι η μέγιστη διάσταση μήκους, πλάτους και ύψους του δοχείου, αντίστοιχα.

2.2.4 Μοντελοποίηση

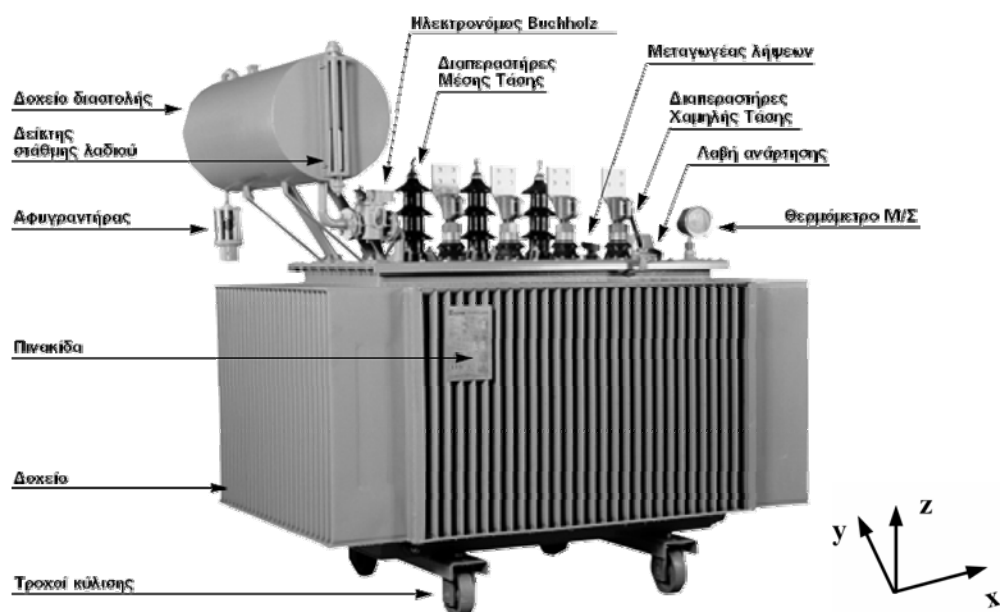
Οι ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζουν με λεπτομέρεια τον τρόπο προσδιορισμού της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών του προβλήματος, ακολουθώντας την απαιτούμενη αλληλουχία υπολογισμών που εμπλέκονται κατά τη σχεδίαση του ενεργού και του μηχανικού μέρους του μετασχηματιστή.

Το συγκεκριμένο πρόβλημα σχεδίασης αποτελεί ένα δύσκολο πρόβλημα μη γραμμικού μικτού ακέραιου προγραμματισμού με μη γραμμικούς περιορισμούς. Η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί αποτελούν σύνθεση γραμμικής και/ή μη γραμμικής συνάρτησης των μεταβλητών σχεδίασης καθώς επίσης και συνεχείς/ασυνεχείς συναρτήσεις των μεταβλητών σχεδίασης.

2.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΖΟΜΕΝΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Ένας τυπικός μετασχηματιστής διανομής λαδιού, με τα εξαρτήματα που τον απαρτίζουν, φαίνεται στο Σχήμα 2.2 [2.1].

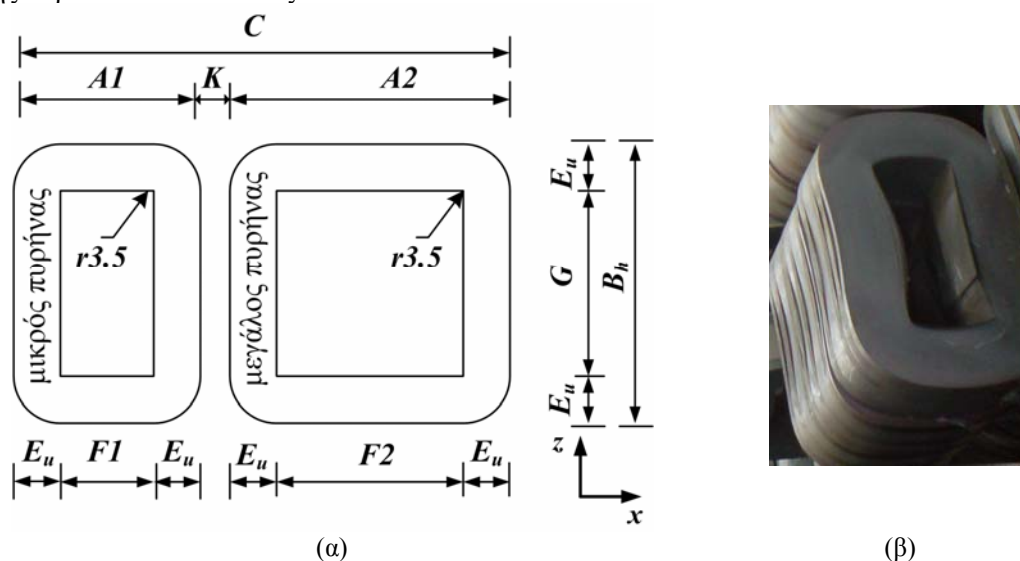
Τα κατασκευαστικά στοιχεία που αποτελούν παραμέτρους ζωτικής σημασίας για τη βέλτιστη τεχνοοικονομικά σχεδίαση είναι: οι πυρήνες, τα πηνία και το δοχείο με το ψυκτικό μέσο. Τα συγκεκριμένα στοιχεία, αναλύονται στη συνέχεια.



Σχήμα 2.2 Μετασχηματιστής διανομής λαδιού [2.1].

2.3.1 Πορήνες

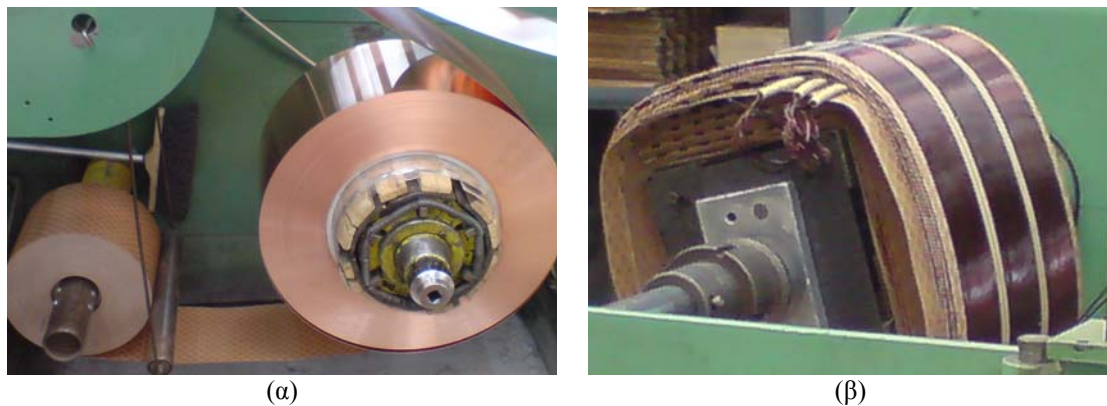
Οι πυρήνες των μετασχηματιστών είναι τεχνολογίας τυλιγμένου πυρήνα (*wound core*) και κατασκευάζονται από μαγνητική λαμαρίνα χαμηλών απωλειών (ελάσματα από πυριτιούχο σίδηρο, δηλαδή κράμα το οποίο αποτελείται από 97% σίδηρο και 3% πυρίτιο). Η διαδικασία παραγωγής τυλιγμένων πυρήνων έχει ως εξής: αρχικά κόβεται η πρώτη ύλη μαγνητικής λαμαρίνας σε λωρίδες τυποποιημένου πλάτους D . Ακολουθεί η κοπή σε προκαθορισμένα μήκη και η περιέλιξη σε στρογγυλό τύμπανο, οπότε προκύπτει ο στρογγυλός πυρήνας. Στη συνέχεια ο στρογγυλός πυρήνας διαμορφώνεται σε ειδική πρέσα και λαμβάνει τη μορφή πυρήνα ορθογωνικής διατομής. Έπειτα, ο τυλιγμένος πυρήνας ανοπτύεται, προκειμένου να ανακτηθούν πλήρως οι ηλεκτρικές και φυσικές ιδιότητες του μαγνητικού υλικού. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πυρήνα του μετασχηματιστή καθώς επίσης και η τελική μορφή ενός πυρήνα μετά το πέρας της παραπάνω διαδικασίας.



Σχήμα 2.3 (α) Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μικρού και του μεγάλου τυλιγμένου πυρήνα. (β) Τελική μορφή τυλιγμένου πυρήνα.

2.3.2 Πηνία

Τα πηνία είναι ορθογωνικής διατομής. Για το πηνίο χαμηλής τάσης, λόγω του μεγάλου ρεύματος που το διαρρέει, χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο φύλλο χαλκού ή αγωγός ορθογωνικής διατομής. Για το πηνίο υψηλής τάσης χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο σύρμα χαλκού ή αγωγός ορθογωνικής διατομής. Ο συνδυασμός αυτός μαζί με το μονωτικό υλικό μεταξύ των στρώσεων, στο οποίο υπάρχουν ρόμβοι εποξικής κόλλας, δίνουν μεγάλη αντοχή στην καταπόνηση βραχυκυκλώματος. Κατά την παραγωγική διαδικασία τα πηνία ξηραίνονται σε φούρνο θερμοκρασίας 100°C με αποτέλεσμα τον πολυμερισμό της εποξικής κόλλας, δίνοντας ένα συμπαγές σύνολο. Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται ο τρόπος κατασκευής των δύο πηνίων (χαμηλής τάσης (Σχήμα 2.4 (α)) και υψηλής τάσης (Σχήμα 2.4 (β))), ενώ στο Σχήμα 2.5 απεικονίζεται η κατασκευαστική δομή του ενεργού μέρους του μετασχηματιστή (πηνία και πυρήνες) λίγο πριν ολοκληρωθεί και ο τελευταίος μικρός πυρήνας.



Σχήμα 2.4 (α) Κατασκευή πηνίου χαμηλής τάσης χρησιμοποιώντας φύλλο χαλκού και το μονωτικό υλικό (β) Κατασκευή πηνίου υψηλής τάσης χρησιμοποιώντας αγωγό κυκλικής διατομής.



Σχήμα 2.5 Συναρμολόγηση ενεργού μέρους μετασχηματιστή.

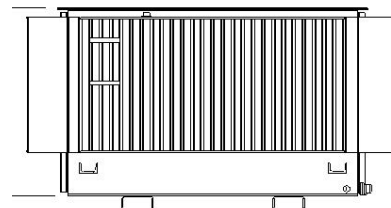
2.3.3 Δοχείο

Το δοχείο του μετασχηματιστή αποτελείται από τον πυθμένα, τη στεφάνη και τα πλευρικά τοιχώματα. Τα πλευρικά τοιχώματα του δοχείου κατασκευάζονται από πτυχωτά ελάσματα με στόχο την αύξηση της επιφάνειας ψύξης. Το δοχείο των μετασχηματιστών κλειστού τύπου (χωρίς δοχείο διαστολής) γεμίζει με μονωτικό λάδι και σφραγίζεται ερμητικά. Τα ελαστικά τοιχώματα του δοχείου δεν επιτρέπουν να δημιουργηθεί μεγάλη αύξηση της πίεσης στο εσωτερικό του, η οποία προκαλείται από την αύξηση της θερμοκρασίας του λαδιού κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή. Στο δοχείο τοποθετούνται δύο αφαλοί γείωσης αντιδιαμετρικά μεταξύ τους, έτσι ώστε να παρέχεται η δυνατότητα γείωσης του δοχείου. Στον πυθμένα του δοχείου είναι συγκολλημένο το σύστημα κύλισης με τροχούς ή η βάση έδρασης. Ως ψυκτικό μέσο χρησιμοποιείται λάδι που πληρεί τις προδιαγραφές IEC 60296 [2.2]. Η αρχική πλήρωση γίνεται σε υψηλό κενό, ώστε να

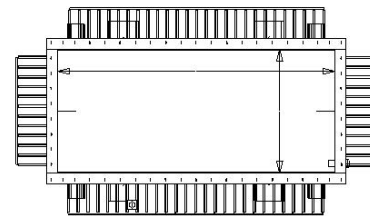
εξασφαλισθεί η διείσδυση του λαδιού παντού και να εξαλειφθεί οποιαδήποτε παρουσία φυσαλίδας αέρα ή υγρασία που θα μπορούσε να προκαλέσει διηλεκτρική αστοχία του πηνίου (ηλεκτρικό τόξο). Μεταγενέστερες συμπληρώσεις επιτρέπονται χωρίς κενό, με την προϋπόθεση ότι η στάθμη του λαδιού δεν έχει αποκαλύψει το ενεργό μέρος και ότι το λάδι έχει υποστεί τη διαδικασία αφύγρανσής του. Η ψύξη των συγκεκριμένων μετασχηματιστών πραγματοποιείται με τη φυσική κυκλοφορία λαδιού μέσα στο οποίο είναι εμβαπτισμένο το ενεργό μέρος του μετασχηματιστή. Το λάδι απορροφά τη θερμότητα των τυλιγμάτων και του πυρήνα, θερμαίνεται, αποκτά μικρότερο ειδικό βάρος και ανέρχεται στο πάνω μέρος του δοχείου, όπου και ψύχεται. Με τον τρόπο αυτό, δημιουργείται μια φυσική κυκλοφορία λαδιού. Μεταξύ των τυλιγμάτων υψηλής και χαμηλής τάσης υπάρχουν διάκενα για την κυκλοφορία του λαδιού, ώστε να επιτυγχάνεται η άριστη ψύξη του μετασχηματιστή.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 2.6 (α) Εσωτερική όψη του δοχείου λαδιού (β) αριστερή πλάγια όψη και (γ) κάτοψη του δοχείου λαδιού.

2.4 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Ο μηχανικός σχεδίασης θα πρέπει, κατά τη φάση της μελέτης, να σχεδιάσει το μετασχηματιστή έτσι ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του χρήστη (πελάτη) και τις διεθνείς τεχνικές προδιαγραφές [2.3].

Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει τις προδιαγραφές που σχετίζονται με την κατασκευή μετασχηματιστών. Οι προδιαγραφές αυτές σχετίζονται με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και τα εξαρτήματα μετασχηματιστών. Η προδιαγραφή IEC 60076 (1–2–3–5) περιγράφει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και τις δοκιμές που σχετίζονται με δυναμική, θερμική και ηλεκτρική καταπόνηση των μετασχηματιστών. Η προδιαγραφή DIN προσδιορίζει τις απώλειες και τα εξαρτήματα των μετασχηματιστών, ενώ η προδιαγραφή CENELEC συνδυάζει δεδομένα διαφόρων προδιαγραφών [2.4].

Ο (Πίνακας 2.2) παρουσιάζει τις ανοχές κατά IEC 60076-1 που εφαρμόζονται σε διάφορα ονομαστικά μεγέθη όταν υπόκεινται σε εγγυήσεις του κατασκευαστή. Οι συγκεκριμένες ανοχές αποτελούν και τους κύριους περιορισμούς στην εύρεση του βέλτιστου τεχνοοικονομικά μετασχηματιστή.

Πίνακας 2.1 Προδιαγραφές μετασχηματιστών κατά IEC.

A/A	Προδιαγραφή	Περιγραφή
1	IEC 60076 – 1	Μετασχηματιστής (Μ/Σ) ισχύος – γενικά
2	IEC 60076 – 2	Μ/Σ ισχύος – Μέρος 2: Ανύψωση θερμοκρασίας
3	IEC 60076 – 3	Μ/Σ ισχύος – Μέρος 3: Επίπεδα μόνωσης – διηλεκτρικές δοκιμές
4	IEC 60076 – 4	Μ/Σ ισχύος – Μέρος 4: Λήψεις – συνδεσμολογίες
5	IEC 60076 – 5	Μ/Σ ισχύος – Μέρος 5: Δυνατότητα αντοχής στο βραχυκύκλωμα
6	IEC 60137: 2003	Διαπεραστήρες για εναλλασσόμενες τάσεις πάνω από 1000 V
7	IEC 60354: 1991	Οδηγός φόρτισης Μ/Σ λαδιού
8	IEC 60076 – 11	Μ/Σ ισχύος ξηρού τύπου
9	IEC 60905: 1987	Οδηγός φόρτισης Μ/Σ ξηρού τύπου

Πίνακας 2.2 Ανοχές σύμφωνα με το IEC 60076 – 1.

Μέγεθος	Επιτρεπόμενη απόκλιση
α) Απώλειες	
α ₁) Συνολικές απώλειες (κενού φορτίου και φορτίου)	+10% των εγγυημένων συνολικών απωλειών (κενού φορτίου και φορτίου)
α ₂) Απώλειες κενού φορτίου (απώλειες φορτίου)	+15% των απωλειών κενού φορτίου (απωλειών φορτίου) με την προϋπόθεση ότι δεν θα παραβιαστεί η ανοχή για τις συνολικές απώλειες
β) Λόγος μετασχηματισμού	
β ₁) Λόγος μετασχηματισμού κατά την ονομαστική λήψη	Η μικρότερη από τις παρακάτω τιμές: α) ±0.5% του εγγυημένου λόγου μετασχηματισμού β) ±1/10 της μετρημένης ονομαστικής τάσης βραχυκύκλωσης (υκ%)
β ₂) Λόγος μετασχηματισμού των τάσεων των άλλων λήψεων	συμφωνείται με τον πελάτη
γ) Τάση βραχυκύκλωσης (Μ/Σ δύο τυλιγμάτων)	
γ ₁) Ονομαστική λήψη	±7.5% της εγγυημένης τάσης βραχυκύκλωσης, όταν η τάση βραχυκύκλωσης είναι $\geq 10\%$ ±10% της εγγυημένης τάσης βραχυκύκλωσης, όταν η τάση βραχυκύκλωσης είναι $< 10\%$
γ ₂) Σε άλλες λήψεις	±10% της εγγυημένης τάσης βραχυκύκλωσης, όταν η τάση βραχυκύκλωσης είναι $\geq 10\%$ ±15% της εγγυημένης τάσης βραχυκύκλωσης, όταν η τάση βραχυκύκλωσης είναι $< 10\%$
δ) Ρεύμα κενού φορτίου	+30% του εγγυημένου ρεύματος κενού φορτίου

2.5 ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

2.5.1 Συνοπτική Περιγραφή

Για τη σχεδίαση των μετασχηματιστών διανομής τύπου τυλιγμένου πυρήνα, χρησιμοποιείται κατάλληλο λογισμικό σχεδίασης [2.3][2.5]. Αναλυτικότερα, ο μηχανικός σχεδίασης εισάγει τα δεδομένα στο λογισμικό σχεδίασης, το οποίο υπολογίζει εάν μπορούν να προκύψουν αποδεκτές λύσεις από τα προδιαγραφόμενα δεδομένα, χρησιμοποιώντας έναν ευρετικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

2.5.2 Δεδομένα Εισόδου

Η υφιστάμενη μεθοδολογία σχεδίασης [2.5] δίνει ιδιαίτερη έμφαση στη διαδικασία εισαγωγής των δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν οκτώ ομάδες μεταβλητών σχεδίασης:

1. *Περιγραφικές μεταβλητές*, όπως για παράδειγμα η ονομαστική ισχύς, η ονομαστική τάση πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος, η συχνότητα, το υλικό πηνίου υψηλής τάσης και χαμηλής τάσης, η συνδεσμολογία υψηλής τάσης και χαμηλής τάσης, κτλ.
2. *Μεταβλητές δύσκολα μεταβαλλόμενες*, όπως για παράδειγμα τα επίπεδα μόνωσης χαμηλής τάσης και υψηλής τάσης, ο συντελεστής βραχυκύκλωσης, κτλ.
3. *Μεταβλητές με προκαθορισμένες τιμές*, όπως για παράδειγμα οι λήψεις χαμηλής τάσης και υψηλής τάσης, οι εγγυημένες τιμές και οι ανοχές των απωλειών φορτίου, απωλειών κενού φορτίου, της τάσης βραχυκύκλωσης, κτλ.
4. *Μεταβλητές κόστους*, όπως για παράδειγμα το κόστος ανά μονάδα βάρους για τον αγωγό χαμηλής τάσης, τον αγωγό υψηλής τάσης, τη μαγνητική λαμαρίνα, το λάδι, το μονωτικό χαρτί, τα ψυκτικά πανέλα, κτλ.
5. *Προαιρετικές μεταβλητές*, οι οποίες είναι οι μεταβλητές που μπορούν είτε να υπολογιστούν από το λογισμικό ή να προσδιοριστούν από το χρήστη.
6. *Διάφορες μεταβλητές*, όπως για παράδειγμα το είδος αγωγού χαμηλής τάσης και υψηλής τάσης, ο αριθμός καναλιών ψύξης χαμηλής τάσης και υψηλής τάσης, το μέγιστο διαφορικό θερμοκρασίας λαδιού και αγωγών χαμηλής τάσης και υψηλής τάσης, η μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, η μέγιστη θερμοκρασία τυλιγμάτων, κτλ.
7. *Μεταβλητές για τον υπολογισμό της διατομής αγωγών*: οι διατομές των αγωγών χαμηλής τάσης και υψηλής τάσης μπορούν να προσδιοριστούν είτε από το χρήστη ή να υπολογιστούν με τη χρήση της πυκνότητας ρεύματος ή τη θερμική δοκιμή βραχυκύκλωσης.
8. *Μεταβλητές σχεδίασης*, α) οι σπείρες του τυλίγματος χαμηλής τάσης, β) οι διαστάσεις του πυρήνα (πλάτος σκέλους πυρήνα D και ύψος παραθύρου πυρήνα G), γ) η μαγνητική επαγωγή καθώς επίσης και δ) η διατομή του αγωγού χαμηλής τάσης και υψηλής τάσης.

2.5.3 Αλγόριθμος Εύρεσης της Βέλτιστης Λύσης

Με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού [2.5] και επιλέγοντας αρκετές εναλλακτικές τιμές για τις μεταβλητές σχεδίασης, προκύπτουν αρκετές υποψήφιες λύσεις. Για κάθε μία από τις υποψήφιες λύσεις, ελέγχεται εάν πληρούνται οι περιορισμοί του προβλήματος και, εφόσον πληρούνται, υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και η λύση χαρακτηρίζεται ως αποδεκτή. Από την άλλη πλευρά, οι υποψήφιες λύσεις που παραβιάζουν τους περιορισμούς χαρακτηρίζονται ως μη αποδεκτές λύσεις. Τελικά, μεταξύ των αποδεκτών λύσεων, επιλέγεται ο μετασχηματιστής με το ελάχιστο κόστος των οκτώ κύριων υλικών, ο οποίος είναι ο τεχνικά και οικονομικά βέλτιστος μετασχηματιστής.

Δίνοντας n_{LV} διαφορετικές τιμές για τον αριθμό των σπειρών του τυλίγματος χαμηλής τάσης, n_D τιμές για τη διάσταση D του πυρήνα (πλάτος σκέλους πυρήνα), n_{FD} δοκιμές για τη

μαγνητική επαγωγή, n_G διαφορετικές τιμές για τη διάσταση G του πυρήνα (ύψος παραθύρου πυρήνα), cs_{LV} διαφορετικές τιμές για τον υπολογισμό της διατομής του πηνίου χαμηλής τάσης και cs_{HV} διαφορετικές τιμές για τον υπολογισμό της διατομής του πηνίου υψηλής τάσης, το σύνολο των υποψήφιων λύσεων (επαναλήψεων για το πρόγραμμα), n_{loops} , υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

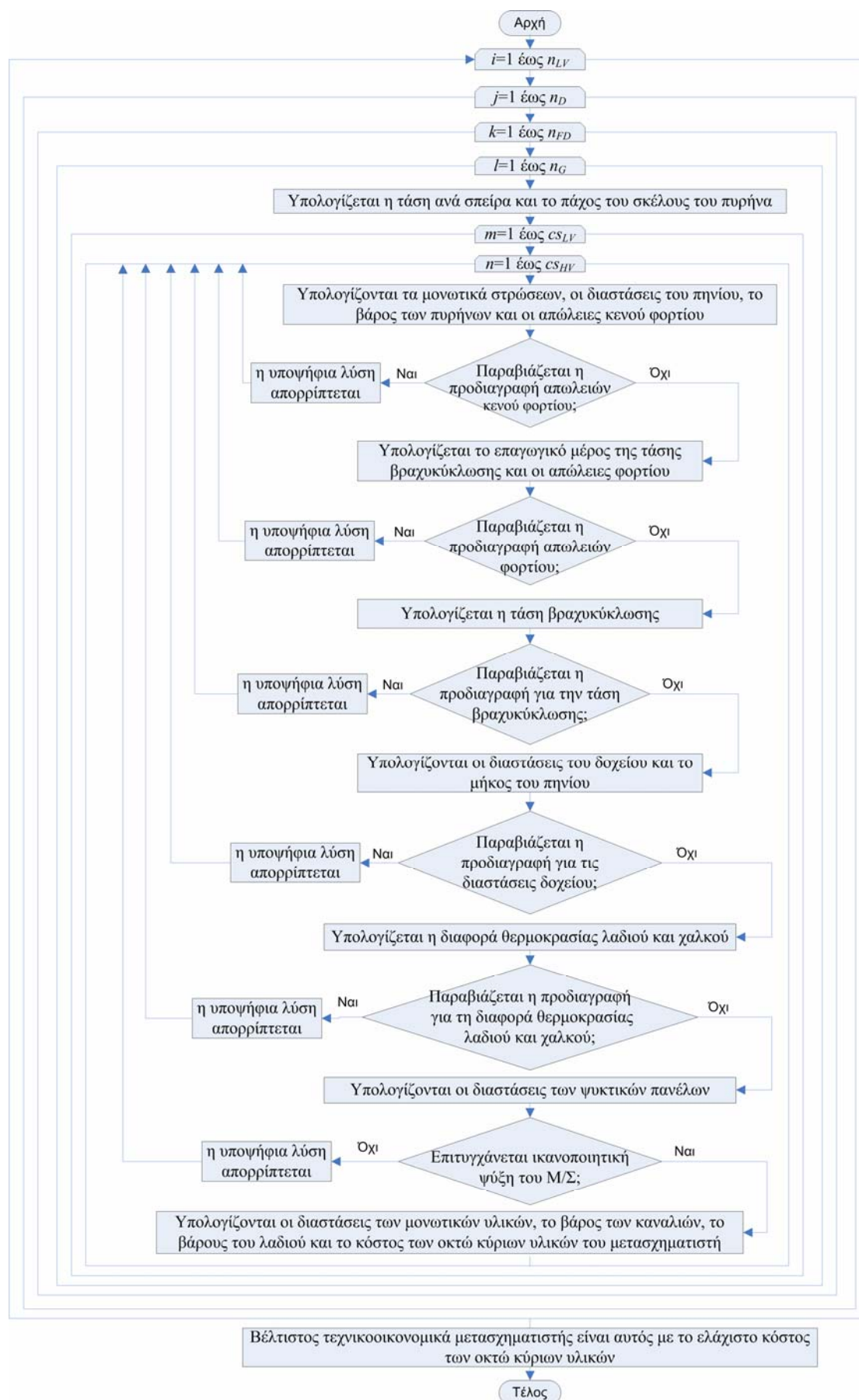
$$n_{loops} = n_{LV} \cdot n_D \cdot n_{FD} \cdot n_G \cdot cs_{LV} \cdot cs_{HV} \quad (2.27)$$

Για κάθε μία από τις n_{loops} διαφορετικές ανακυκλώσεις, το πρόγραμμα υπολογίζει αν ικανοποιούνται οι περιορισμοί του προβλήματος. Αν έστω και ένας περιορισμός παραβιάζεται τότε:

1. διακόπτονται οι υπολογισμοί για τη συγκεκριμένη ανακύκλωση (δεν υπάρχει λόγος να γίνονται άσκοποι υπολογισμοί και να καθυστερεί η εκτέλεση του προγράμματος).
2. στο αρχείο των “απορριφθέντων λύσεων” καταγράφεται ο κωδικός αριθμός της συγκεκριμένης ανακύκλωσης καθώς και ο λόγος για τον οποίο η συγκεκριμένη υποψήφια λύση απορρίπτεται (π.χ. λόγω παραβίασης της τάσης βραχυκύκλωσης) μαζί με την τιμή της μεταβλητής που παραβιάζεται (π.χ. τάση βραχυκύκλωσης 4.62%).

Αν οι προδιαγραφές ικανοποιούνται, τότε στο αρχείο των “αποδεκτών λύσεων” καταγράφονται όλα τα στοιχεία της συγκεκριμένης λύσης.

Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται ο αλγόριθμος εύρεσης του τεχνικά και οικονομικά βέλτιστου μετασχηματιστή.



Σχήμα 2.7 Αλγόριθμος βέλτιστης σχεδίασης μετασχηματιστή.

2.5.4 Ανάλυση Ευαισθησίας για την Εύρεση της Βέλτιστης Λύσης

Ο βέλτιστος μετασχηματιστής πρέπει να ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς με το μικρότερο δυνατό κόστος των οκτώ κύριων υλικών. Επιπλέον, η ιδεατή σχεδίαση μετασχηματιστή στοχεύει να ελαχιστοποιήσει τις απώλειες κενού φορτίου και τις απώλειες φορτίου [2.6]. Για τη μείωση των απωλειών κενού φορτίου συνήθως επιλέγεται η μείωση της μαγνητικής επαγωγής. Όμως, η μείωση της μαγνητικής επαγωγής απαιτεί περισσότερες σπείρες, με συνέπεια να αυξάνονται οι απώλειες φορτίου. Παρόμοια, αν μειωθεί η πυκνότητα του ρεύματος, θα μειωθούν οι απώλειες φορτίου, όμως στην περίπτωση αυτή απαιτείται περισσότερο μαγνητικό υλικό, οπότε αυξάνονται οι απώλειες κενού φορτίου. Δηλαδή η μείωση των απωλειών κενού φορτίου οδηγεί σε αύξηση των απωλειών φορτίου όπως επίσης η μείωση των απωλειών φορτίου οδηγεί σε αύξηση των απωλειών κενού φορτίου.

Η σχεδίαση μετασχηματιστή με μειωμένες απώλειες είναι ένας συμβιβασμός από τη μια μεριά με την κατανομή των απωλειών στον πυρήνα και στα πηνία, και από την άλλη μεριά με το βάρος, το μέγεθος, τον όγκο, την τάση βραχυκύκλωσης, τη μόνωση και το κόστος του μετασχηματιστή. Οι σύγχρονες τεχνικές σχεδίασης με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή επιτρέπουν πολλές μεταβολές στις μεταβλητές σχεδίασης με αποτέλεσμα την επιλογή της βέλτιστης τεchnικοοικονομικά λύσης. Ο Πίνακας 2.3 παρουσιάζει πώς η μεταβολή της σχεδίασης του πυρήνα και των τυλιγμάτων μπορεί να μειώσει τις απώλειες κενού φορτίου και τις απώλειες φορτίου καθώς επίσης και πώς αυτές οι μεταβολές επηρεάζουν το κόστος του μετασχηματιστή [2.7]. Βάσει του συγκεκριμένου πίνακα προκύπτει ότι υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και εξόδου. Για παράδειγμα, οι απώλειες κενού φορτίου μειώνονται με τη μείωση της μαγνητικής επαγωγής (με τις υπόλοιπες μεταβλητές εισόδου να παραμένουν σταθερές) αλλά την ίδια στιγμή αυξάνονται οι απώλειες φορτίου.

Πίνακας 2.3 Εναλλακτικές τεχνικές μείωσης απωλειών.

	<i>Απώλειες Κενού</i>	<i>Απώλειες Φορτίου</i>	<i>Κόστος</i>
Μείωση απωλειών κενού φορτίου			
A. Χρήση υλικού πυρήνα χαμηλότερων απωλειών	Χαμηλότερες	Αμετάβλητες	Υψηλότερο
B. Μείωση μαγνητικής ροής με			
1. Αύξηση εγκάρσιας διατομής πυρήνα	Χαμηλότερες	Υψηλότερες	Υψηλότερο
2. Μείωση τάσης ανά σπείρα	Χαμηλότερες	Υψηλότερες	Υψηλότερο
Γ. Μείωση του μήκους διαδρομής της ροής με μείωση της εγκάρσιας διατομής του αγωγού	Χαμηλότερες	Υψηλότερες	Χαμηλότερο
Μείωση απωλειών φορτίου			
A. Μείωση πυκνότητας ρεύματος με αύξηση εγκάρσιας διατομής αγωγού	Υψηλότερες	Χαμηλότερες	Υψηλότερο
B. Μείωση του μήκους διαδρομής του ρεύματος με			
1. Μείωση εγκάρσιας διατομής πυρήνα	Υψηλότερες	Χαμηλότερες	Χαμηλότερο
2. Αύξηση τάσης ανά σπείρα	Υψηλότερες	Χαμηλότερες	Χαμηλότερο

2.5.5 Μειονεκτήματα της Μεθόδου

Ένα μειονέκτημα της υφιστάμενης μεθοδολογίας βέλτιστης σχεδίασης μετασχηματιστή αποτελεί το γεγονός ότι είναι πολύ σπάνιο έως αδύνατο να εντοπιστεί η ολική βέλτιστη λύση όταν η αναζήτηση πραγματοποιείται σε ένα πολύ μικρό υποχώρο του συνολικού χώρου αναζήτησης. Ένα άλλο μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθοδολογίας είναι ότι το συγκεκριμένο λογισμικό απευθύνεται σε χρήστες οι οποίοι διαθέτουν πολύ καλές γνώσεις στη σχεδίαση των μετασχηματιστών. Όμως, παρά το γεγονός ότι το εν λόγω πρόγραμμα απευθύνεται σε έμπειρους χρήστες, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα και ένας έμπειρος χρήστης να δυσκολευτεί να εντοπίσει τη σχεδόν βέλτιστη σχεδίαση ενός μετασχηματιστή. Επιπλέον, υπάρχει και η πιθανότητα το συγκεκριμένο λογισμικό να μην εντοπίσει καμία λύση, απορρίπτοντας όλες τις υποψήφιες λύσεις, οπότε στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να εκτελεστεί ξανά το λογισμικό με διαφορετικές τιμές στις μεταβλητές σχεδίασης.

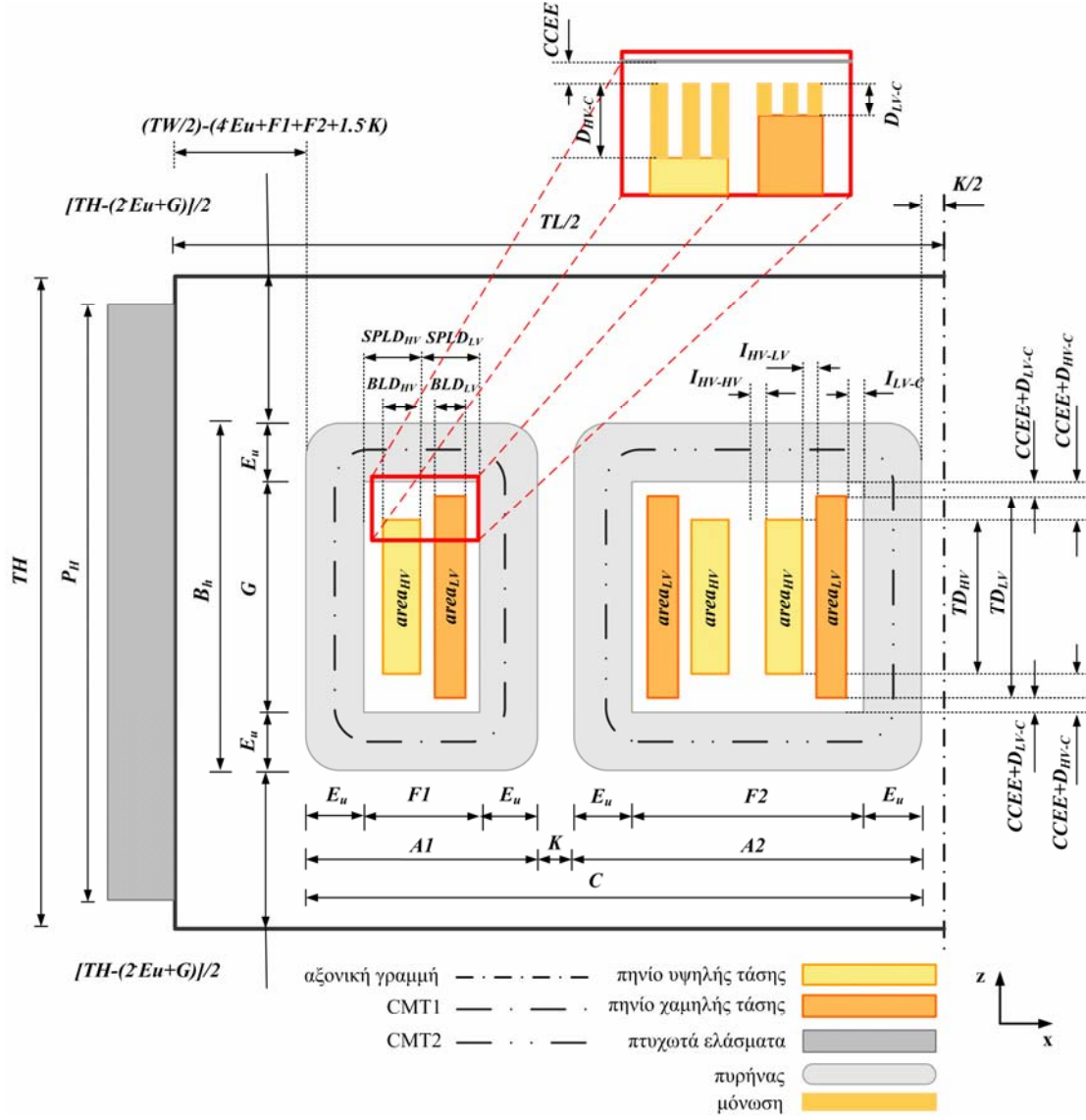
Ένα ακόμη μειονέκτημα της υφιστάμενης μεθοδολογίας είναι ότι χρησιμοποιεί 134 μεταβλητές εισόδου. Με άλλα λόγια, ο χρήστης του προγράμματος πρέπει να ορίσει κατάλληλα 134 τιμές ώστε να επιτευχθεί η σχεδόν βέλτιστη σχεδίαση ενός μετασχηματιστή, δαπανώντας περίπου 3 ώρες αλληλεπίδρασης με το λογισμικό. Στη συνέχεια, ανάλογα με τις τιμές που θα ορισθούν, το πρόγραμμα εκτελεί από μια έως 20^4 επαναλήψεις.

Το συγκεκριμένο πρόγραμμα σχεδίασης μετασχηματιστών χρησιμοποιεί έναν ευρετικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Το μειονέκτημα όμως των ευρετικών μεθόδων είναι ότι αν και δίνουν απλές και ικανοποιητικές λύσεις σε ορισμένα προβλήματα, τίποτα δεν εγγυάται ότι αυτές οι λύσεις είναι οι βέλτιστες. Συνήθως δίνουν προσεγγίσεις των βέλτιστων λύσεων και κάποιες φορές προτιμούνται επειδή δίνουν αποδεκτές απαντήσεις σε μικρό χρόνο. Συνεπώς, δεν μπορούν να αποτελέσουν κύριο εργαλείο βελτιστοποίησης.

2.6 ΕΝΕΡΓΟ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Τα δύο κύρια μέρη του μετασχηματιστή διανομής είναι το ενεργό και το μηχανικό μέρος. Το ενεργό μέρος αποτελείται από δύο μικρούς και δύο μεγάλους πυρήνες οι οποίοι περιβάλλουν τα τυλίγματα των τριών φάσεων, ενώ το μηχανικό μέρος περιλαμβάνει το δοχείο, το μονωτικό λάδι και τα πτυχωτά ελάσματα. Για τον επιτυχή προσδιορισμό των δύο προαναφερθέντων μερών, απαιτούνται αναλυτικές εξισώσεις. Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζονται οι κύριες γεωμετρικές διαστάσεις του μετασχηματιστή διανομής, οι οποίες υπολογίζονται αναλυτικά σε επόμενες παραγράφους του συγκεκριμένου κεφαλαίου. Να σημειωθεί ότι η αξονική γραμμή στο Σχήμα 2.8 υποδηλώνει συμμετρία του σχεδίου. Επίσης, για λόγους αισθητικούς και χώρου, οι διαστάσεις που αφορούν το πηνίο χαμηλής και υψηλής τάσης καθώς και οι μονώσεις που εμπεριέχονται ανάμεσά τους, περιγράφονται σε ένα από τα τρία πηνία (χαμηλής και υψηλής τάσης), αλλά οι ίδιες αντίστοιχες διαστάσεις ισχύουν και για τα τρία πηνία.

Στις επόμενες παραγράφους του συγκεκριμένου κεφαλαίου παρουσιάζεται η πλειοψηφία των εξισώσεων για τον επιτυχή καθορισμό όλων των διαστάσεων ενός μετασχηματιστή, αποτυπώνοντας την πολυπλοκότητα του προβλήματος σχεδίασης. Οι ενότητες 2.7 έως 2.15 περιγράφουν τη σχεδίαση των συνιστωσών του ενεργού μέρους, ενώ στις παραγράφους 2.16 έως 2.21 δίνεται η ακολουθία υπολογισμών των χαρακτηριστικών του μηχανικού μέρους.



Σχήμα 2.8 Γεωμετρικές διαστάσεις τομής του μετασχηματιστή διανομής

2.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΑΣΗΣ ΑΝΑ ΣΠΕΙΡΑ ΚΑΙ ΠΑΧΟΥΣ ΣΚΕΛΟΥΣ ΠΥΡΗΝΑ

Η τάση ανά σπείρα του πηνίου χαμηλής τάσης υπολογίζεται με βάση την ονομαστική φασική τάση του πηνίου και τον αριθμό των σπειρών ως εξής:

$$VPT = \frac{Vln_{LV}}{turns_{LV}} \quad (2.28)$$

Η φασική τάση του πηνίου χαμηλής τάσης Vln_{LV} υπολογίζεται σύμφωνα με την πολική τάση του πηνίου χαμηλής τάσης U_{LV} και το είδος της συνδεσμολογίας του πηνίου χαμηλής τάσης. Αναλυτικότερα:

$$Vln_{LV} = \begin{cases} U_{LV}, & \text{για συνδεσμολογία τριγώνου} \\ \frac{U_{LV}}{\sqrt{3}}, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (2.29)$$

Η σχεδίαση του ενεργού μέρους ξεκινά με τον υπολογισμό των διαστάσεων του πυρήνα, και ειδικότερα το πάχος του σκέλους του πυρήνα. Το απαιτούμενο πάχος είναι αντιστρόφως ανάλογο προς τη μαγνητική επαγωγή του πυρήνα, καθώς το γινόμενο της επαγωγής επί τη

διατομή του πυρήνα αντιστοιχεί στη μαγνητική ροή που πρέπει να διαρρέει τα τυλίγματα (ώστε, δεδομένης της εφαρμοζόμενης τάσης στο πρωτεύον να επάγεται η επιθυμητή τάση στο δευτερεύον). Από το Σχήμα 2.1 φαίνεται ότι η συνολική εγκάρσια διατομή του πυρήνα, μέσα από την οποία διέρχεται η μαγνητική ροή, είναι:

$$A_{tot} = 2 \cdot A_c = 2 \cdot CSF \cdot E_u \cdot D \quad (2.30)$$

Συνεπώς, το πάχος του σκέλους είναι άμεσα εξαρτώμενο και από τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των τυλιγμάτων.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το πάχος σκέλους του πυρήνα, E_u (Σχήμα 2.8), δηλαδή η διάσταση εκείνη γύρω από την οποία θα τοποθετηθεί το πηνίο, σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_u = \frac{VPT \cdot 34.9 \cdot 10^5 \cdot 25.4^2}{2 \cdot CSF \cdot D \cdot B_G \cdot f} \quad (2.31)$$

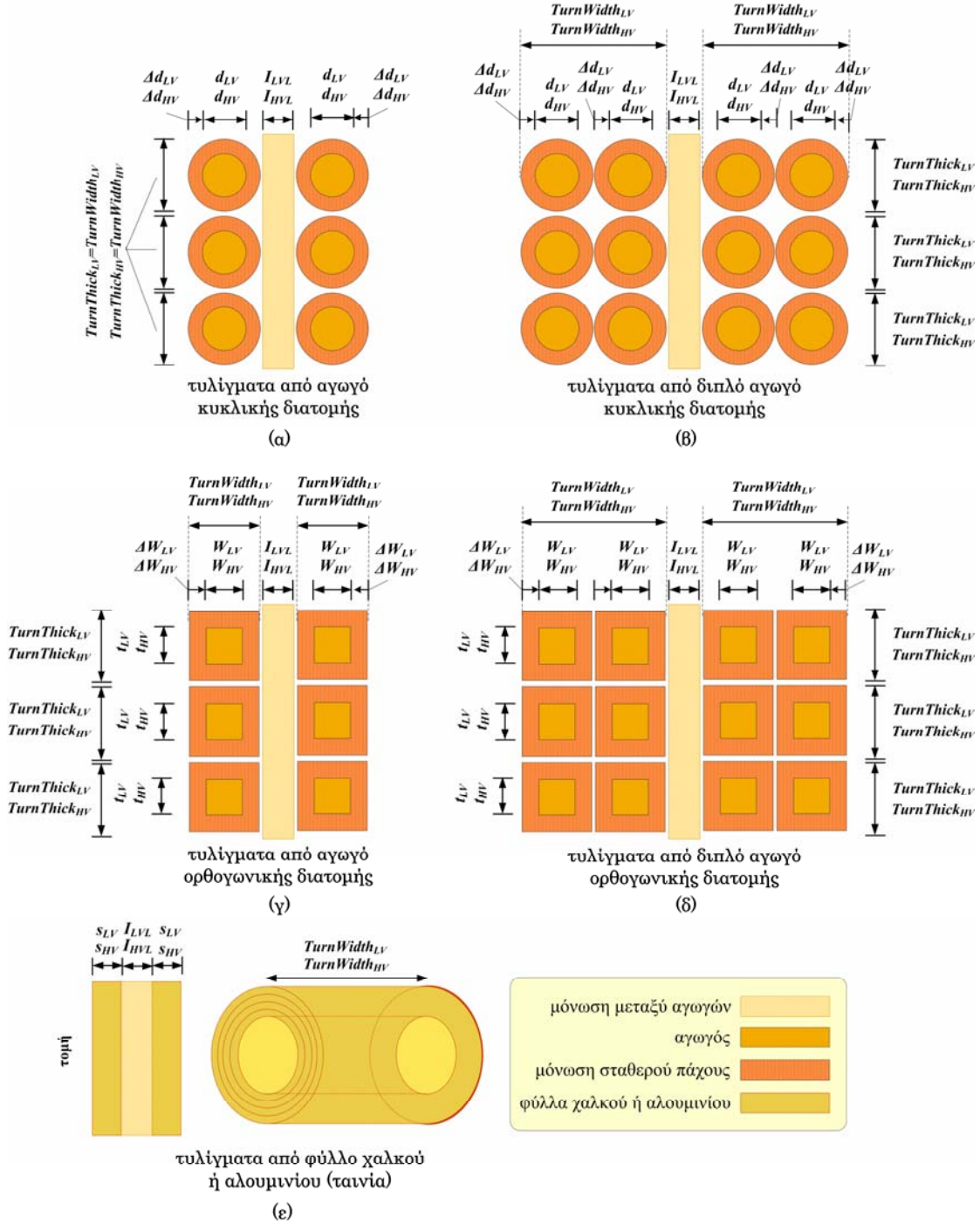
Ο συντελεστής, CSF , πλήρωσης χώρου πυρήνα λαμβάνεται εμπειρικά ίσος με 0.965, εκφράζοντας την καθαρή διατομή του μαγνητικού υλικού. Η απόδειξη της (2.31) παρουσιάζεται στην εργασία [2.8].

Στην περίπτωση που η συνδεσμολογία του πηνίου χαμηλής τάσης είναι ζιγκ-ζαγκ, τότε οι εξισώσεις (2.28) και (2.31) πολλαπλασιάζονται με $2/\sqrt{3}$.

2.8 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

Η μόνωση μεταξύ των αγωγών των τυλιγμάτων πραγματοποιείται με ειδικό μονωτικό χαρτί με ρόμβους εποξικής κόλλας, το οποίο σε συνδυασμό με την κατασκευή των τυλιγμάτων εξασφαλίζουν στον μετασχηματιστή καλή θερμική συμπεριφορά, καλές συνθήκες μόνωσης και μεγάλη ικανότητα αντοχής στη δυναμική καταπόνηση του βραχυκυκλώματος.

Ο υπολογισμός του πάχους της μόνωσης μεταξύ των στρώσεων του πηνίου για τη χαμηλή και υψηλή τάση εξαρτάται από τον τύπο και τις διαστάσεις του αγωγού του πηνίου. Συγκεκριμένα, το είδος του αγωγού του πηνίου και για τις δύο τάσεις μπορεί να αποτελείται από 1) αγωγό κυκλικής διατομής, 2) διπλό αγωγό κυκλικής διατομής, 3) αγωγό ορθογωνικής διατομής, 4) διπλό αγωγό ορθογωνικής διατομής, και 5) φύλλο. Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται αναλυτικά η κατασκευαστική δομή του κάθε τύπου αγωγού. Σύμφωνα με τα παραπάνω, αν το πηνίο (είτε της χαμηλής είτε της υψηλής τάσης) αποτελείται είτε από αγωγό κυκλικής διατομής είτε από διπλό αγωγό κυκλικής διατομής, τότε βάσει της διαμέτρου του αγωγού του πηνίου (d_{LV} ή d_{HV}) υπολογίζεται το πάχος της μόνωσης του αγωγού (Δd_{LV} ή Δd_{HV}) (σε mm), οπότε η συνολική διάμετρος του αγωγού είναι $d_{LV} + \Delta d_{LV}$ ή $d_{HV} + \Delta d_{HV}$. Αν το πηνίο χαμηλής ή υψηλής τάσης αποτελείται είτε από αγωγό ορθογωνικής διατομής πλάτους (W_{LV} ή W_{HV}), είτε από διπλό αγωγό ορθογωνικής διατομής (W_{LV} ή W_{HV}), τότε βάσει του πάχους του αγωγού του πηνίου χαμηλής ή υψηλής τάσης υπολογίζεται το πάχος της μόνωσης του αγωγού (ΔW_{LV} ή ΔW_{HV}) (σε mm), οπότε το συνολικό πάχος του αγωγού είναι $W_{LV} + \Delta W_{LV}$ ή $W_{HV} + \Delta W_{HV}$. Επίσης, στην περίπτωση που το πηνίο χαμηλής ή υψηλής τάσης αποτελείται από ταινία πάχους (s_{LV} ή s_{HV}), υπάρχει τυποποιημένη μόνωση χαρτιού (με ρόμβους εποξικής κόλλας) ανάμεσα στα φύλλα χαμηλής ή υψηλής τάσης (I_{LVL} ή I_{HVL}). Τέλος, το πάχος των μονωτικών στρώσεων εξαρτάται από το είδος των αγωγών των πηνίων υψηλής και χαμηλής τάσης και το οποίο επιλέγεται από τυποποιημένους πίνακες έτσι ώστε να αντέχει η μόνωση σε επαγόμενη και σε κρουστική τάση.



Σχήμα 2.9 Είδη αγωγών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πηνίων. (α) αγωγός κυκλικής διατομής, (β) διπλός αγωγός κυκλικής διατομής, (γ) αγωγός ορθογωνικής διατομής, (δ) διπλός αγωγός ορθογωνικής διατομής, και (ε) φύλλο.

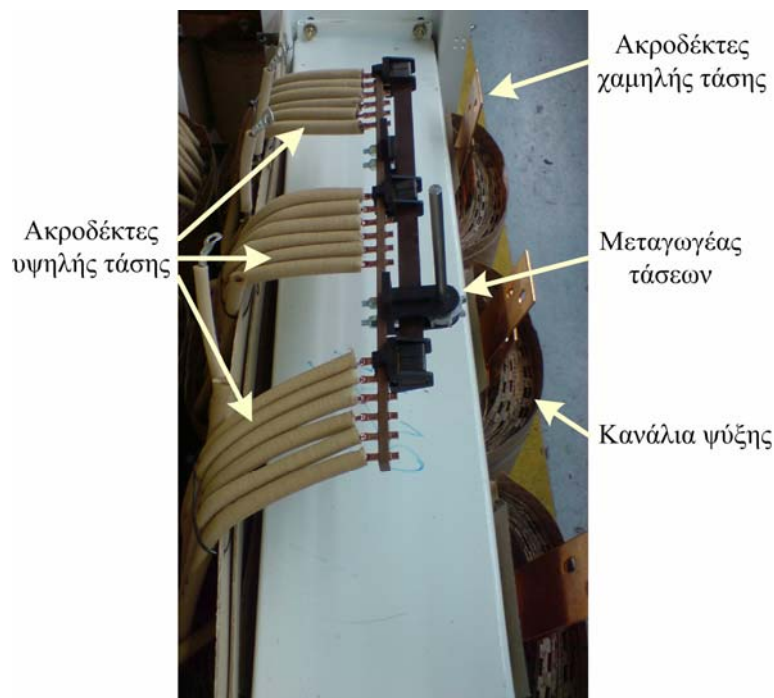
2.9 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΗΝΙΟΥ

Τα τυλίγματα του μετασχηματιστή είναι συγκεντρικά, ορθογωνικής διατομής, με το τύλιγμα της χαμηλής τάσης να είναι αυτό που βρίσκεται πλησιέστερα στον πυρήνα. Για την κατασκευή του τυλίγματος υψηλής τάσης χρησιμοποιούνται αγωγοί από χαλκό σε πολλές στρώσεις, όπου ανάμεσα στις στρώσεις τοποθετείται μονωτικό υλικό, του οποίου το πάχος είναι τέτοιο ώστε να αντέχει σε επαγόμενη και κρουστική τάση. Με τον μεταγωγέα τάσεων επιτυγχάνεται η επιθυμητή τάση λειτουργίας (για παράδειγμα 20 kV ή 15 kV), ενώ με τον μεταγωγέα λήψεων επιτυγχάνονται λήψεις για παράδειγμα $\pm 5\%$ της ονομαστικής τάσης

λειτουργίας του πρωτεύοντος πηνίου, ώστε να αντιστοιχούν σε τάση λειτουργίας του πρωτεύοντος πηνίου για παράδειγμα από 14 kV έως 21 kV καθώς και τις ενδιάμεσες λήψεις τους (κατά ποσοστό της ονομαστικής τάσης λειτουργίας). Μία σημαντική λεπτομέρεια αφορά στην προκύπτουσα ασυμμετρία των τυλιγμάτων της κάθε φάσης ως προς το διαμήκη άξονα του μετασχηματιστή εξαιτίας του γεγονότος ότι η λήψη των ακροδεκτών της υψηλής τάσης γίνεται μόνο από τη μία πλευρά του τυλίγματος.

Η κατασκευή του τυλίγματος της χαμηλής τάσης είναι απλούστερη καθώς αποτελείται συνήθως από φύλλα χαλκού, τα οποία καταλήγουν σε ακροδέκτες. Οι σπείρες είναι τοποθετημένες η μια πάνω στην άλλη και μεταξύ τους υπάρχει μονωτικό υλικό. Το φύλλο παρουσιάζει πλεονεκτήματα όσον αφορά την εμφάνιση δινορρευμάτων. Λόγω του μικρού πάχους δημιουργούνται χαμηλές απώλειες από δινορρεύματα. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η άριστη συμπεριφορά του στις αξονικές δυνάμεις που δημιουργούνται κατά το βραχυκύκλωμα. Ενώ τα τυλίγματα με αγωγούς συμπεριφέρονται κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος ως ελατήρια, οπότε μπορούν να μετατοπισθούν και να έρθουν σε επαφή με τα γειωμένα μέρη του μετασχηματιστή (όπως τα ζυγώματα του πυρήνα και οι μεταλλικοί δοκοί συσφίξεως) ή να βραχυκυκλωθούν μεταξύ τους, τα τυλίγματα από φύλλο χαλκού απλώς υπόκεινται στο νόμο του Hook [2.11]. Συνεπώς, τα τυλίγματα από σύρμα χαλκού πρέπει να στηριχθούν με δοκούς συσφίξεως, ενώ για τα τυλίγματα από φύλλο χαλκού δεν απαιτείται τέτοια στήριξη. Το μεγάλο μειονέκτημα των τυλιγμάτων από φύλλο χαλκού είναι η συμπεριφορά τους στις ακτινικές δυνάμεις. Λόγω του μικρού πάχους των φύλλων η ροπή αντιστάσεώς τους είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα οι καμπτικές τάσεις που δημιουργούνται μεταξύ δύο κατακόρυφων στηριγμάτων του τυλίγματος να γίνονται μεγάλες και μπορούν να υπερβούν το όριο ελαστικότητας του χαλκού, με συνέπεια την παραμόρφωση του τυλίγματος. Για αυτό το λόγο πρέπει να προβλεφθούν αρκετά κατακόρυφα στηρίγματα, ώστε η καμπτική ροπή να είναι μικρή και από αυτή να προκύψει καμπτική τάση, η οποία θα είναι κάτω από το όριο ελαστικότητας του χαλκού (ή του αλουμινίου).

Στο Σχήμα 2.10 φαίνονται με περισσότερη λεπτομέρεια οι τρεις φάσεις του μετασχηματιστή μαζί με τους ακροδέκτες της χαμηλής και της υψηλής τάσης καθώς και τα κανάλια ψύξης του μετασχηματιστή εντός των οποίων κυκλοφορεί λάδι με φυσική κυκλοφορία. Επίσης, υπάρχει και ο μεταγωγέας, ο οποίος βοηθάει στην αλλαγή των λήψεων, δηλαδή τοποθετείται στην επιθυμητή λήψη (τάση) με τον μετασχηματιστή να βρίσκεται εκτός τάσης.



Σχήμα 2.10 Οι ακροδέκτες του πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης, ο μεταγωγέας τάσεων και τα κανάλια ψύξης.

2.10.1 Διαστάσεις Πηνίου Χαμηλής Τάσης

Ο αριθμός σπειρών, $TurnsMain_{LV}$, του πηνίου χαμηλής τάσης προκύπτει με βάση τη μέγιστη φασική τάση του πηνίου χαμηλής τάσης (που αντιστοιχεί στη μέγιστη λήψη) σύμφωνα με τη σχέση [2.9]:

$$TurnsMain_{LV} = turns_{LV} \cdot \frac{V \ln_{LV, max tap}}{V \ln_{LV}} \quad (2.32)$$

όπου $turns_{LV}$ ο αριθμός των σπειρών του πηνίου χαμηλής τάσης, $V \ln_{LV, max tap}$ (σε V) η μέγιστη φασική τάση του πηνίου χαμηλής τάσης (που αντιστοιχεί στη μέγιστη λήψη) και $V \ln_{LV}$ (σε V) η φασική τάση πηνίου χαμηλής τάσης (που αντιστοιχεί στην ονομαστική λήψη).

Το μήκος, TD_{LV} (σε mm) (Σχήμα 2.8), της στρώσης της χαμηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TD_{LV} = G - 2 \cdot CCEE - 2 \cdot D_{LV-C} \quad (2.33)$$

όπου G (σε mm) είναι το ύψος του παραθύρου του πυρήνα, $CCEE$ (σε mm) είναι η απόσταση του άκρου της μόνωσης του πηνίου (χαμηλής τάσης) από τα οριζόντια σκέλη του πυρήνα και D_{LV-C} (σε mm) είναι η απόσταση του άκρου μόνωσης πηνίου χαμηλής τάσης από το άκρο του πηνίου χαμηλής τάσης.

Ανάλογα με το είδος του αγωγού του πηνίου (χαμηλής ή υψηλής τάσης) (Σχήμα 2.9), το οποίο μπορεί να αποτελείται από 1) αγωγό κυκλικής διατομής, 2) διπλό αγωγό κυκλικής διατομής, 3) αγωγό ορθογωνικής διατομής, 4) διπλό αγωγό ορθογωνικής διατομής, και 5) φύλλο, υπολογίζονται οι αντίστοιχες μεταβλητές για το πάχος και τη μόνωση του αγωγού.

■ Αγωγός Κυκλικής Διατομής

Στη περίπτωση που υπάρχει αγωγός κυκλικής διατομής, το πλάτος του αγωγού της χαμηλής τάσης με τη μόνωση, $TurnWidth_{LV}$ (σε mm) (Σχήμα 2.9), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TurnWidth_{LV} = d_{LV} + \Delta d_{LV} \quad (2.34)$$

όπου d_{LV} (σε mm) είναι η διάμετρος του αγωγού χαμηλής τάσης και Δd_{LV} (σε mm) είναι το πάχος της μόνωσης του αγωγού χαμηλής τάσης.

Επίσης, ισχύουν τα παρακάτω:

$$L1 = TurnWidth_{LV} \quad (2.35)$$

Το πάχος αγωγού κυκλικής διατομής με τη μόνωση, $TurnThick_{LV}$ (σε mm) (Σχήμα 2.9), του πηνίου χαμηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TurnThick_{LV} = TurnWidth_{LV} \quad (2.36)$$

Οι σπείρες ανά στρώση, $TurnsPerLayer_{LV}$, του πηνίου χαμηλής τάσης υπολογίζονται συναρτήσει του συνολικού πλάτους της στρώσης και το πλάτος του μονωμένου αγωγού, λαμβάνοντας υπόψη κατάλληλο συντελεστή στρώσεων, σύμφωνα με τη σχέση:

$$TurnsPerLayer_{LV} = \left(\frac{TD_{LV}}{TurnWidth_{LV}} - 1 \right) \cdot TDSP_{LV} \quad (2.37)$$

όπου $TDSP_{LV}$ είναι ο συντελεστής στρώσης σπειρών χαμηλής τάσης.

■ Διπλός Αγωγός Κυκλικής Διατομής

Στη περίπτωση που υπάρχουν δύο αγωγοί κυκλικής διατομής, το πλάτος του αγωγού της χαμηλής τάσης με τη μόνωση, $TurnWidth_{LV}$ (σε mm) (Σχήμα 2.9), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TurnWidth_{LV} = 2 \cdot (d_{LV} + \Delta d_{LV}) \quad (2.38)$$

όπου d_{LV} (σε mm) είναι η διάμετρος του αγωγού χαμηλής τάσης και Δd_{LV} (σε mm) είναι το πάχος της μόνωσης του αγωγού χαμηλής τάσης, το οποίο υπολογίζεται από εμπειρικούς κανόνες χρησιμοποιώντας ως παραμέτρους εισόδου το είδος μόνωσης του αγωγού χαμηλής τάσης (LV_{IT}), τη διάμετρο αγωγού χαμηλής τάσης (d_{LV}) και το είδος αγωγού χαμηλής τάσης.

Επίσης, ισχύουν τα παρακάτω:

$$L1 = \frac{TurnWidth_{LV}}{2} \quad (2.39)$$

Το πάχος διπλού αγωγού κυκλικής διατομής με τη μόνωση, $TurnThick_{LV}$ (σε mm) (Σχήμα 2.9), του πηνίου χαμηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TurnThick_{LV} = \frac{TurnWidth_{LV}}{2} \quad (2.40)$$

Οι σπείρες ανά στρώση, $TurnsPerLayer_{LV}$, του πηνίου χαμηλής τάσης υπολογίζονται συναρτήσει του συνολικού πλάτους της στρώσης και του πλάτους του μονωμένου αγωγού, λαμβάνοντας υπόψη κατάλληλο συντελεστή στρώσεων με τον παράγοντα 2 να αντιστοιχεί στον διπλό αγωγό, σύμφωνα με τη σχέση:

$$TurnsPerLayer_{LV} = \left(\frac{TD_{LV}}{TurnWidth_{LV}} - 2 \right) \cdot TDSP_{LV} \quad (2.41)$$

όπου $TDSP_{LV}$ είναι ο συντελεστής στρώσης σπειρών χαμηλής τάσης.

▪ Αγωγός Ορθογωνικής Διατομής

Στη περίπτωση που υπάρχει αγωγός ορθογωνικής διατομής, το πλάτος του αγωγού της χαμηλής τάσης με τη μόνωση, $TurnWidth_{LV}$ (σε mm) (Σχήμα 2.9), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TurnWidth_{LV} = W_{LV} + \Delta W_{LV} \quad (2.42)$$

όπου W_{LV} (σε mm) είναι το πλάτος του αγωγού χαμηλής τάσης και ΔW_{LV} (σε mm) είναι το πάχος της μόνωσης του αγωγού χαμηλής τάσης.

Επίσης, ισχύουν τα παρακάτω:

$$L1 = TurnThick_{LV} \quad (2.43)$$

Το πάχος αγωγού ορθογωνικής διατομής με τη μόνωση, $TurnThick_{LV}$ (σε mm) (Σχήμα 2.9), του πηνίου χαμηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TurnThick_{LV} = t_{LV} + \Delta W_{LV} \quad (2.44)$$

όπου t_{LV} (σε mm) είναι το πάχος του αγωγού του πηνίου χαμηλής τάσης.

Οι σπείρες ανά στρώση (όπως και στην περίπτωση αγωγού κυκλικής διατομής), $TurnsPerLayer_{LV}$, του πηνίου χαμηλής τάσης υπολογίζονται από τη σχέση:

$$TurnsPerLayer_{LV} = \left(\frac{TD_{LV}}{TurnWidth_{LV}} - 1 \right) \cdot TDSP_{LV} \quad (2.45)$$

όπου $TDSP_{LV}$ είναι ο συντελεστής στρώσης σπειρών χαμηλής τάσης.

▪ Διπλός Αγωγός Ορθογωνικής Διατομής

Στη περίπτωση που υπάρχουν δύο αγωγοί ορθογωνικής διατομής, το πλάτος του αγωγού της χαμηλής τάσης με τη μόνωση, $TurnWidth_{LV}$ (σε mm) (Σχήμα 2.9), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TurnWidth_{LV} = 2 \cdot (W_{LV} + \Delta W_{LV}) \quad (2.46)$$

όπου W_{LV} (σε mm) είναι το πλάτος του αγωγού χαμηλής τάσης και ΔW_{LV} (σε mm) είναι το πάχος της μόνωσης του αγωγού χαμηλής τάσης.

Επίσης, ισχύουν τα παρακάτω:

$$L1 = \frac{TurnThick_{LV}}{2} \quad (2.47)$$

Το πάχος διπλού αγωγού ορθογωνικής διατομής με τη μόνωση, $TurnThick_{LV}$ (σε mm) (Σχήμα 2.9), του πηνίου χαμηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TurnThick_{LV} = t_{LV} + \Delta W_{LV} \quad (2.48)$$

Οι σπείρες ανά στρώση (όπως και στην περίπτωση διπλού αγωγού κυκλικής διατομής), $TurnsPerLayer_{LV}$, του πηνίου χαμηλής τάσης υπολογίζονται από τη σχέση:

$$TurnsPerLayer_{LV} = \left(\frac{TD_{LV}}{TurnWidth_{LV}} - 2 \right) \cdot TDSP_{LV} \quad (2.49)$$

όπου $TDSP_{LV}$ είναι ο συντελεστής στρώσης σπειρών χαμηλής τάσης.

■ Φύλλο

Τελευταία περίπτωση όσον αφορά το πηνίο χαμηλής τάσης είναι να υπάρχει φύλλο. Σε αυτή την περίπτωση, το πλάτος του αγωγού χαμηλής τάσης με τη μόνωση, $TurnWidth_{LV}$ (σε mm) (Σχήμα 2.9), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TurnWidth_{LV} = TD_{LV} \quad (2.50)$$

Οι σπείρες ανά στρώση, $TurnsPerLayer_{LV}$, του πηνίου χαμηλής τάσης υπολογίζονται από τη σχέση:

$$TurnsPerLayer_{LV} = 1 \quad (2.51)$$

Δηλαδή η κάθε στρώση του πηνίου χαμηλής τάσης αποτελείται από μια μόνο σπείρα που αντιστοιχεί στο φύλλο χαλκού ή αλουμινίου.

2.10.2 Διαστάσεις Πηνίου Υψηλής Τάσης

Ο μέγιστος αριθμός σπειρών, $Turns_{HV,max}$, του πηνίου υψηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Turns_{HV,max} = \frac{V \ln_{HV,max tap}}{VPT} \quad (2.52)$$

όπου $V \ln_{HV,max tap}$ (σε V) η μέγιστη φασική τάση του πηνίου υψηλής τάσης (που αντιστοιχεί στη μέγιστη λήψη) και VPT η τάση ανά σπείρα.

Ο ονομαστικός αριθμός σπειρών (που αντιστοιχεί στην ονομαστική υψηλής τάσης), $TurnsMain_{HV}$, του πηνίου υψηλής τάσης προκύπτει με βάση τη μέγιστη φασική τάση του πηνίου υψηλής τάσης (που αντιστοιχεί στη μέγιστη λήψη) σύμφωνα με τη σχέση [2.9]:

$$TurnsMain_{HV} = Turns_{HV,max} \frac{V \ln_{HV}}{V \ln_{HV,max tap}} \quad (2.53)$$

όπου $Turns_{HV,max}$ ο μέγιστος αριθμός των σπειρών του πηνίου υψηλής τάσης, $V \ln_{HV,max tap}$ (σε V) η μέγιστη φασική τάση του πηνίου υψηλής τάσης (που αντιστοιχεί στη μέγιστη λήψη) και $V \ln_{HV}$ (σε V) η ονομαστική φασική τάση του πηνίου υψηλής τάσης (που αντιστοιχεί στην ονομαστική λήψη).

Το μήκος, TD_{HV} (σε mm) (Σχήμα 2.8), της στρώσης της υψηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TD_{HV} = G - 2 \cdot CCEE - 2 \cdot D_{HV-C} \quad (2.54)$$

όπου G (σε mm) είναι το ύψος του παραθύρου του πυρήνα, $CCEE$ (σε mm) είναι η απόσταση του άκρου της μόνωσης του πηνίου (υψηλής τάσης) από τα οριζόντια σκέλη του πυρήνα και

D_{HV-C} (σε mm) είναι η απόσταση άκρου μόνωσης πηνίου υψηλής τάσης από το άκρο του πηνίου υψηλής τάσης.

Ανάλογα με το είδος του αγωγού του πηνίου (Σχήμα 2.9), το οποίο μπορεί να αποτελείται από 1) αγωγό κυκλικής διατομής, 2) διπλό αγωγό κυκλικής διατομής, 3) αγωγό ορθογωνικής διατομής, 4) διπλό αγωγό ορθογωνικής διατομής, και 5) ταινία, υπολογίζονται οι αντίστοιχες μεταβλητές για το πάχος και τη μόνωση του αγωγού.

▪ **Αγωγός Κυκλικής Διατομής**

Στη περίπτωση που υπάρχει αγωγός κυκλικής διατομής, το πλάτος του αγωγού της υψηλής τάσης με τη μόνωση, $TurnWidth_{HV}$ (σε mm) (Σχήμα 2.9), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TurnWidth_{HV} = d_{HV} + \Delta d_{HV} \quad (2.55)$$

όπου d_{HV} (σε mm) είναι η διάμετρος του αγωγού υψηλής τάσης και Δd_{HV} (σε mm) είναι το πάχος της μόνωσης του αγωγού υψηλής τάσης.

Επίσης, ισχύουν τα παρακάτω:

$$L2 = TurnWidth_{HV} \quad (2.56)$$

Το πάχος αγωγού κυκλικής διατομής με τη μόνωση, $TurnThick_{HV}$ (σε mm) (Σχήμα 2.9), του πηνίου υψηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TurnThick_{HV} = TurnWidth_{HV} \quad (2.57)$$

Οι σπείρες ανά στρώση, $TurnsPerLayer_{HV}$, του πηνίου υψηλής τάσης υπολογίζονται συναρτήσει του συνολικού πλάτους της στρώσεις και το πλάτος του μονωμένου αγωγού, λαμβάνοντας υπόψη κατάλληλο συντελεστή στρώσεων με τον παράγοντα 2 να αντιστοιχεί στον διπλό αγωγό, σύμφωνα με τη σχέση:

$$TurnsPerLayer_{HV} = \left(\frac{TD_{HV}}{TurnWidth_{HV}} - 1 \right) \cdot TDSP_{HV} \quad (2.58)$$

όπου $TDSP_{HV}$ είναι ο συντελεστής στρώσης σπειρών υψηλής τάσης.

▪ **Διπλός Αγωγός Κυκλικής Διατομής**

Στη περίπτωση που υπάρχουν δύο αγωγοί κυκλικής διατομής, το πλάτος του αγωγού της υψηλής τάσης με τη μόνωση, $TurnWidth_{HV}$ (σε mm) (Σχήμα 2.9), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TurnWidth_{HV} = 2 \cdot (d_{HV} + \Delta d_{HV}) \quad (2.59)$$

όπου d_{HV} (σε mm) είναι η διάμετρος του αγωγού υψηλής τάσης και Δd_{HV} (σε mm) είναι το πάχος της μόνωσης του αγωγού υψηλής τάσης.

Επίσης, ισχύουν τα παρακάτω:

$$L2 = \frac{TurnWidth_{HV}}{2} \quad (2.60)$$

Το πάχος διπλού αγωγού κυκλικής διατομής με τη μόνωση, $TurnThick_{HV}$ (σε mm) (Σχήμα 2.9), του πηνίου υψηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TurnThick_{HV} = \frac{TurnWidth_{HV}}{2} \quad (2.61)$$

Οι σπείρες ανά στρώση, $TurnsPerLayer_{HV}$, του πηνίου υψηλής τάσης υπολογίζονται από τη σχέση:

$$TurnsPerLayer_{HV} = \left(\frac{TD_{HV}}{TurnWidth_{HV}} - 2 \right) \cdot TDSP_{HV} \quad (2.62)$$

όπου $TDSP_{HV}$ είναι ο συντελεστής στρώσης σπειρών υψηλής τάσης (κατά αντιστοιχία με την (2.58)). Ο συντελεστής 2 αντιστοιχεί στο διπλό αγωγό.

▪ Αγωγός Ορθογωνικής Διατομής

Στη περίπτωση που υπάρχει αγωγός ορθογωνικής διατομής, το πλάτος του αγωγού της υψηλής τάσης με τη μόνωση, $TurnWidth_{HV}$ (σε mm) (Σχήμα 2.9), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TurnWidth_{HV} = W_{HV} + \Delta W_{HV} \quad (2.63)$$

όπου W_{HV} (σε mm) είναι το πλάτος του αγωγού υψηλής τάσης και ΔW_{HV} (σε mm) είναι το πάχος της μόνωσης του αγωγού υψηλής τάσης.

Επίσης, ισχύουν τα παρακάτω:

$$L2 = TurnThick_{HV} \quad (2.64)$$

Το πάχος διπλού αγωγού ορθογωνικής διατομής με τη μόνωση, $TurnThick_{HV}$ (σε mm) (Σχήμα 2.9), του πηνίου υψηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TurnThick_{HV} = t_{HV} + \Delta W_{HV} \quad (2.65)$$

όπου t_{HV} (σε mm) είναι το πάχος του αγωγού του πηνίου υψηλής τάσης.

Οι σπείρες ανά στρώση (όπως και στην περίπτωση αγωγού κυκλικής διατομής), $TurnsPerLayer_{HV}$, του πηνίου υψηλής τάσης υπολογίζονται από τη σχέση:

$$TurnsPerLayer_{HV} = \left(\frac{TD_{HV}}{TurnWidth_{HV}} - 1 \right) \cdot TDSP_{HV} \quad (2.66)$$

όπου $TDSP_{HV}$ είναι ο συντελεστής στρώσης σπειρών υψηλής τάσης.

▪ Διπλός Αγωγός Ορθογωνικής Διατομής

Στη περίπτωση που υπάρχουν δύο αγωγοί ορθογωνικής διατομής, το πλάτος του αγωγού της υψηλής τάσης με τη μόνωση, $TurnWidth_{HV}$ (σε mm) (Σχήμα 2.9), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TurnWidth_{HV} = 2 \cdot (W_{HV} + \Delta W_{HV}) \quad (2.67)$$

όπου W_{HV} (σε mm) είναι το πλάτος του αγωγού υψηλής τάσης και ΔW_{HV} (σε mm) είναι το πάχος της μόνωσης του αγωγού υψηλής τάσης, το οποίο υπολογίζεται από εμπειρικούς κανόνες χρησιμοποιώντας ως παραμέτρους εισόδου το είδος μόνωσης του αγωγού υψηλής τάσης (HV_{IT}) και το είδος αγωγού υψηλής τάσης.

Επίσης, ισχύουν τα παρακάτω:

$$L2 = \frac{TurnThick_{HV}}{2} \quad (2.68)$$

Το πάχος διπλού αγωγού ορθογωνικής διατομής με τη μόνωση, $TurnThick_{HV}$ (σε mm) (Σχήμα 2.9), του πηνίου υψηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TurnThick_{HV} = t_{HV} + \Delta W_{HV} \quad (2.69)$$

Οι σπείρες ανά στρώση (όπως και στην περίπτωση διπλού αγωγού κυκλικής διατομής), $TurnsPerLayer_{HV}$, του πηνίου υψηλής τάσης υπολογίζονται από τη σχέση:

$$TurnsPerLayer_{HV} = \left(\frac{TD_{HV}}{TurnWidth_{HV}} - 2 \right) \cdot TDSP_{HV} \quad (2.70)$$

όπου $TDSP_{HV}$ είναι ο συντελεστής στρώσης σπειρών υψηλής τάσης.

▪ Φύλλο

Τελευταία περίπτωση όσο αφορά το πηνίο υψηλής τάσης είναι να υπάρχει ταινία. Σε αυτή την περίπτωση, το πλάτος του αγωγού της υψηλής τάσης με τη μόνωση, $TurnWidth_{HV}$ (σε mm) (Σχήμα 2.9), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TurnWidth_{HV} = TD_{HV} \quad (2.71)$$

Οι σπείρες ανά στρώση, $TurnsPerLayer_{HV}$, του πηνίου υψηλής τάσης υπολογίζονται από τη σχέση:

$$TurnsPerLayer_{HV} = 1 \quad (2.72)$$

Δηλαδή η κάθε στρώση του πηνίου υψηλής τάσης αποτελείται από μια μόνο σπείρα που αντιστοιχεί στο φύλλο χαλκού ή αλουμινίου.

2.10.3 Υπολογισμός του Εύρους των Παραθύρων των Πυρήνων

Το εύρος του παραθύρου του πυρήνα περιλαμβάνει το πάχος του πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης καθώς και τις διηλεκτρικές αποστάσεις μεταξύ τους και μεταξύ των πηνίων και του πυρήνα, τα οποία υπολογίζονται με τη διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια.

Οι στρώσεις, $Layers_{LV}$, του πηνίου της χαμηλής τάσης υπολογίζονται από τη σχέση:

$$Layers_{LV} = \frac{TurnsMain_{LV}}{TurnsMainLayer_{LV}} \quad (2.73)$$

όπου $TurnsMain_{LV}$ είναι ο αριθμός των σπειρών του πηνίου χαμηλής τάσης και $TurnsPerLayer_{LV}$ είναι οι σπείρες ανά στρώση του πηνίου χαμηλής τάσης.

Το πάχος, BLD_{LV} (σε mm) (Σχήμα 2.8), του πηνίου της χαμηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$BLD_{LV} = (L1 + I_{LV}) \cdot \frac{Layers_{LV}}{LDSP_{LV}} + TI_{LV} \quad (2.74)$$

όπου I_{LV} (σε mm) είναι το πάχος της μόνωσης μεταξύ των στρώσεων του πηνίου χαμηλής τάσης, $Layers_{LV}$ είναι οι στρώσεις του πηνίου χαμηλής τάσης, $LDSP_{LV}$ είναι ο συντελεστής χώρου των στρώσεων χαμηλής τάσης και TI_{LV} (σε mm) είναι το πάχος της μόνωσης των λήψεων του πηνίου χαμηλής τάσης. Ο συντελεστής χώρου των στρώσεων του πηνίου χαμηλής τάσης, $LDSP_{LV}$, εκφράζει τη χαλαρότητα που υπάρχει από τη μηχανή περιέλιξης του πηνίου χαμηλής τάσης κατά το τύλιγμα του συγκεκριμένου πηνίου.

Το συνολικό πάχος, $SPLD_{LV}$ (σε mm) (Σχήμα 2.8), του πηνίου χαμηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$SPLD_{LV} = BLD_{LV} + I_{LV-C} + I_{HV-LV} \quad (2.75)$$

όπου BLD_{LV} (σε mm) είναι το πάχος του πηνίου χαμηλής τάσης, I_{LV-C} (σε mm) είναι το πάχος της μόνωσης μεταξύ χαμηλής τάσης και πυρήνα και I_{HV-LV} (σε mm) είναι το πάχος της μόνωσης μεταξύ υψηλής και χαμηλής τάσης.

Οι στρώσεις, $Layers_{HV}$, του πηνίου υψηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Layers_{HV} = \frac{Turns_{HV,max}}{TurnsPerLayer_{HV}} \quad (2.76)$$

όπου $Turns_{HV,max}$ είναι ο μέγιστος αριθμός σπειρών του πηνίου υψηλής τάσης και $TurnsPerLayer_{HV}$ είναι οι σπείρες ανά στρώση του πηνίου υψηλής τάσης.

Το πάχος, BLD_{HV} (σε mm) (Σχήμα 2.8), του πηνίου της υψηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$BLD_{HV} = (L2 + I_{HVL}) \cdot \frac{Layers_{HV}}{LDSP_{HV}} + TI_{HV} \quad (2.77)$$

όπου I_{HVL} (σε mm) είναι το πάχος της μόνωσης μεταξύ των στρώσεων υψηλής τάσης, $Layers_{HV}$ είναι οι στρώσεις του πηνίου υψηλής τάσης, $LDSP_{HV}$ είναι ο συντελεστής χώρου των στρώσεων υψηλής τάσης και TI_{HV} (σε mm) είναι το πάχος της μόνωσης των λήψεων του πηνίου υψηλής τάσης. Ο συντελεστής χώρου των στρώσεων υψηλής τάσης, $LDSP_{HV}$, εκφράζει τη χαλαρότητα που υπάρχει από τη μηχανή περιέλιξης υψηλής τάσης κατά το τύλιγμα του συγκεκριμένου πηνίου.

Το συνολικό πάχος, $SPLD_{HV}$ (σε mm) (Σχήμα 2.8), του πηνίου υψηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$SPLD_{HV} = BLD_{HV} + I_{HV-HV} \quad (2.78)$$

όπου BLD_{HV} (σε mm) είναι το πάχος του πηνίου της υψηλής τάσης, και I_{HV-HV} (σε mm) είναι το πάχος της μόνωσης μετά την υψηλή τάση.

Ο υπολογισμός του θεωρητικού εύρους του παραθύρου, F (σε mm) (Σχήμα 2.8), του πυρήνα προκύπτει από την κατασκευαστική απαίτηση ότι στη διάσταση αυτή πρέπει να χωράει το πηνίο χαμηλής τάσης, καθώς και το πηνίο υψηλής τάσης. Συνεπώς, η διάσταση F προκύπτει ως εξής:

$$F = SPLD_{LV} + SPLD_{HV} \quad (2.79)$$

όπου, $SPLD_{LV}$, $SPLD_{HV}$ (σε mm) είναι το συνολικό πάχος των πηνίων χαμηλής και υψηλής τάσης, αντίστοιχα.

Ο υπολογισμός του εύρους, $F1$ (σε mm) (Σχήμα 2.8), του παραθύρου του μικρού ατομικού πυρήνα, γίνεται με τυποποίηση της διάστασης F (σε mm) της σχέσης (2.79) στην ισodύναμη ή στην αμέσως μεγαλύτερη τυποποιημένη διάσταση (χρησιμοποιείται πίνακας τυποποιημένων διαστάσεων για το εύρος του παραθύρου του πυρήνα).

Το εύρος, $F2$ (σε mm) (Σχήμα 2.8), του παραθύρου του μεγάλου ατομικού πυρήνα προκύπτει ως εξής:

$$F2 = 2 \cdot F1 \quad (2.80)$$

δηλαδή το $F2$ είναι, γενικά, διπλάσιο του εύρους του παραθύρου του μικρού πυρήνα.

2.10.4 Έλεγχος της Ορθότητας Επιλογής των Μονωτικών Μεταξύ των Στρώσεων των Πηνίων Χαμηλής και Υψηλής Τάσης

Ο έλεγχος της ορθότητας επιλογής των μονωτικών μεταξύ των στρώσεων των πηνίων χαμηλής και υψηλής τάσης στηρίζεται στον υπολογισμό της επαγόμενης και κρουστικής τάσης, όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

■ Πηνίο Χαμηλής Τάσης

Όσον αφορά το πηνίο χαμηλής τάσης, η επαγόμενη τάση, $Induced_{LV}$ (σε kV), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Induced_{LV} = VPT \cdot 2 \cdot TurnsPerLayer_{LV} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \quad (2.81)$$

Στην (2.81), υπεισέρχεται ο πρώτος πολλαπλασιαστής, ο οποίος λαμβάνεται ίσος με 2, λόγω της διαφοράς δυναμικού της αρχικής σπείρας μίας στρώσης από την τελευταία της επόμενης, καθώς και ο δεύτερος πολλαπλασιαστής, ο οποίος λαμβάνεται επίσης ίσος με 2, γιατί η επαγόμενη τάση είναι διπλάσια της ονομαστικής.

Η κρουστική τάση, $Impulse_{LV}$ (σε kV), του πηνίου χαμηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Impulse_{LV} = \frac{2 \cdot BIL_{LV} \cdot TurnsPerLayer_{LV}}{turns_{LV} \cdot \frac{V \ln_{LV, \min tap}}{V \ln_{LV}}} \quad (2.82)$$

όπου BIL_{LV} (σε kV), είναι η βασική στάθμη μόνωσης του πηνίου χαμηλής τάσης, $turns_{LV}$ είναι οι σπείρες του πηνίου της χαμηλής τάσης, $V \ln_{LV, \min tap}$ (σε V) η ελάχιστη φασική τάση του πηνίου χαμηλής τάσης και $V \ln_{LV}$ (σε V) είναι η ονομαστική φασική τάση του πηνίου χαμηλής τάσης.

Η επαγόμενη και κρουστική τάση του πηνίου χαμηλής τάσης χρησιμοποιούνται ως κριτήρια ελέγχου της ορθής επιλογής του πάχους της μόνωσης μεταξύ των στρώσεων του πηνίου. Ο έλεγχος γίνεται με βάση τη μέγιστη επαγόμενη τάση ($Induced_{max}$) και τη μέγιστη

κρουστική τάση ($Impulse_{max}$) στην οποία μπορεί να ανταποκριθεί το εξεταζόμενο πάχος μόνωσης, σύμφωνα με τα όρια που δίνονται από αντίστοιχο πίνακα.

Εάν $Induced_{LV} < Induced_{LV,max}$, και $Impulse_{LV} < Impulse_{LV,max}$, τότε το πάχος, I_{LVL} , της μόνωσης μεταξύ των στρώσεων χαμηλής τάσης έχει επιλεγεί σωστά, διαφορετικά επιλέγεται η αμέσως μεγαλύτερη μόνωση, βάσει του πίνακα που περιγράφηκε παραπάνω.

■ Πηνίο Υψηλής Τάσης

Όσον αφορά το πηνίο υψηλής τάσης, η επαγόμενη τάση, $Induced_{HV}$ (σε kV), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Induced_{HV} = VPT \cdot 2 \cdot TurnsPerLayer_{HV} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \quad (2.83)$$

Η κρουστική τάση, $Impulse_{HV}$ (σε kV), του πηνίου της υψηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Impulse_{HV} = \frac{2 \cdot BIL_{HV} \cdot TurnsPerLayer_{HV}}{turns_{HV} \cdot \frac{V \ln_{HV,min,tap}}{V \ln_{HV}}} \quad (2.84)$$

όπου BIL_{HV} (σε kV), είναι η βασική στάθμη μόνωσης του πηνίου υψηλής τάσης, $turns_{HV}$ είναι οι σπείρες του πηνίου της υψηλής τάσης, $V \ln_{HV,min,tap}$ (σε V) η ελάχιστη φασική τάση του πηνίου υψηλής τάσης και $V \ln_{HV}$ (σε V) είναι η ονομαστική φασική τάση του πηνίου υψηλής τάσης.

Ο έλεγχος του πάχους της μόνωσης μεταξύ των στρώσεων του πηνίου υψηλής τάσης γίνεται κατά τρόπο αντίστοιχο με το πηνίο χαμηλής τάσης, μέσω σύγκρισης με τη μέγιστη τιμή επαγόμενης και κρουστικής τάσης.

Εάν $Induced_{HV} < Induced_{HV,max}$, και $Impulse_{HV} < Impulse_{HV,max}$, τότε το πάχος, I_{HVL} , της μόνωσης μεταξύ των στρώσεων υψηλής τάσης έχει επιλεγεί σωστά, διαφορετικά επιλέγεται η αμέσως μεγαλύτερη μόνωση, βάσει του πίνακα που περιγράφηκε παραπάνω.

2.11 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΑΡΟΥΣ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΠΥΡΗΝΑ

Ο υπολογισμός του βάρους γίνεται με βάση τη μέση διαδρομή του μικρού και του μεγάλου πυρήνα. Το μήκος της μέσης διαδρομής του μικρού πυρήνα, $CMT1$ (σε mm) (Σχήμα 2.8), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$CMT1 = 2 \cdot (F1 + G) + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{E_u}{2} + 3.5 \right) - 8 \cdot 3.5 \quad (2.85)$$

όπου $F1$ (σε mm) είναι το εύρος του παραθύρου του μικρού πυρήνα, G (σε mm) είναι το ύψος του παραθύρου του πυρήνα, και E_u (σε mm) είναι το πάχος του σκέλους του πυρήνα.

Το μήκος της μέσης διαδρομής του μεγάλου πυρήνα, $CMT2$ (σε mm) (Σχήμα 2.8), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$CMT2 = 2 \cdot (F2 + G) + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{E_u}{2} + 3.5 \right) - 8 \cdot 3.5 \quad (2.86)$$

όπου $F2$ (σε mm) είναι το εύρος του παραθύρου του μεγάλου πυρήνα. Στην εξίσωση (2.86), οι συντελεστές 3.5 αντιστοιχούν στην καμπυλότητα των γωνιών του πυρήνα (Σχήμα 2.3 β).

Το συνολικό βάρος, CTW (σε kg), των τεσσάρων πυρήνων του μετασχηματιστή είναι:

$$CTW = 2 \cdot (CMT1 + CMT2) \cdot D \cdot E_u \cdot CSF \cdot g_{MS} \cdot 10^{-6} \quad (2.87)$$

όπου D (σε mm) είναι το πλάτος του σκέλους του πυρήνα, CSF είναι ο συντελεστής πλήρωσης χώρου του πυρήνα, και g_{MS} (σε gr/cm^3) είναι η πυκνότητα της μαγνητικής λαμαρίνας.

Οι απώλειες κενού φορτίου, NLL (σε W), υπολογίζονται από τη σχέση:

$$NLL = CTW \cdot WPK \quad (2.88)$$

όπου WPK (σε W/kg) είναι οι ειδικές απώλειες κενού φορτίου του μετασχηματιστή. Οι ειδικές απώλειες προκύπτουν από καμπύλη που αντιστοιχεί στο υλικό του πυρήνα, συναρτήσει της μαγνητικής επαγωγής λειτουργίας.

Εάν $NLL > NLL_{max}$ (όπου NLL_{max} (σε W) οι μέγιστες επιτρεπόμενες απώλειες κενού φορτίου) τότε η συγκεκριμένη υποψήφια λύση απορρίπτεται λόγω παραβίασης της προδιαγραφής των απωλειών κενού φορτίου.

2.12 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ ΤΑΣΗΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ

Ένα από τα σημαντικά προβλήματα κατά τη σχεδίαση μετασχηματιστών είναι ο προκαθορισμός της επαγωγικής πτώσης τάσης των τυλιγμάτων του όταν βρίσκεται υπό φορτίο και των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται σε αυτά κατά το βραχυκύκλωμα. Ο ακριβής υπολογισμός τους παρουσιάζει μεγάλη δυσκολία, η οποία οδηγεί τους σχεδιαστές στην υιοθέτηση κατάλληλων συντελεστών, οι οποίοι προκύπτουν με εμπειρικό τρόπο μέσα από διαδικασία μέτρησης του πεδίου σε κατασκευασμένους μετασχηματιστές. Μία από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους εμπειρικού υπολογισμού είναι η μέθοδος των συντελεστών Rogowski, η οποία χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία κατασκευής μετασχηματιστών [2.10] [2.11]. Η μέθοδος Rogowski υπολογίζει το πεδίο σκέδασης θεωρώντας πηνία σταθερής πυκνότητας ρεύματος, σε μικρή απόσταση από τα σκέλη του πυρήνα. Κατά τον υπολογισμό λαμβάνεται δισδιάστατη τροποποιημένη αναπαράσταση της πραγματικής γεωμετρίας του μετασχηματιστή [2.12]. Κατά την εξαγωγή της, η συμβολή των τμημάτων των πηνίων που βρίσκονται εκτός των παραθύρων του πυρήνα (δηλαδή ο συνυπολογισμός της τρίτης διάστασης) πραγματοποιείται με κατάλληλη τροποποίηση των πραγματικών διαστάσεων των πηνίων. Η αυτεπαγωγή σκέδασης L_s (σε H) (επαγωγικότητα) των πηνίων υψηλής και χαμηλής τάσης υπολογίζεται με βάση ένα ισοδύναμο πάχος πηνίων, το οποίο προκύπτει από τις πραγματικές τους διαστάσεις με χρήση των συντελεστών Rogowski, προσαρμοσμένων κατάλληλα στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή. Έχοντας υπολογίσει τη συνολική αυτεπαγωγή σκέδασης των τυλιγμάτων, η αντίστοιχη επαγωγική πτώση τάσης (ανηγμένη στο πηνίο χαμηλής τάσης) δίνεται από τη σχέση:

$$IX(\%) = \frac{I_{LV} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot turns_{LV}^2 \cdot L_s}{V_{lnLV}} \quad (2.89)$$

όπου I_{LV} (σε A) είναι το φασικό ρεύμα του πηνίου χαμηλής τάσης, $turns_{LV}$ είναι ο αριθμός των σπειρών του πηνίου χαμηλής τάσης, f (σε Hz) είναι η συχνότητα, L_s (σε H) είναι η συνολική αυτεπαγωγή σκέδασης του πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης και V_{lnLV} (σε V) είναι η ονομαστική φασική τάση του πηνίου χαμηλής τάσης.

2.13 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΒΑΡΟΥΣ ΑΓΩΓΩΝ

2.13.1 Απώλειες Φορτίου Πηνίου Χαμηλής Τάσης

Το μήκος του αγωγού του πηνίου της χαμηλής τάσης, $ConductorLength_{LV}$ (σε m), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$ConductorLength_{LV} = MT_{LV} \cdot Layers_{LV} \cdot 3 \quad (2.90)$$

όπου MT_{LV} (σε m) είναι η μέση σπείρα του αγωγού του πηνίου χαμηλής τάσης και $Layers_{LV}$ είναι οι στρώσεις του πηνίου χαμηλής τάσης, ενώ ο συντελεστής 3 αντιπροσωπεύει τον συνολικό αριθμό των πηνίων.

Η αντίσταση του αγωγού, R_{LV} (σε Ω), του πηνίου χαμηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_{LV} = \frac{\rho_{LV} \cdot \frac{ConductorLength_{LV}}{3}}{area_{LV}} \quad (2.91)$$

όπου ρ_{LV} (σε $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$) είναι η ειδική αντίσταση του αγωγού χαμηλής τάσης και $area_{LV}$ (σε mm^2) είναι η διατομή του πηνίου χαμηλής τάσης.

Οι απώλειες φορτίου, $CuLosses_{LV}$ (σε W), των πηνίων χαμηλής τάσης των τριών φάσεων υπολογίζονται από τη σχέση:

$$CuLosses_{LV} = 3 \cdot R_{LV} \cdot I_{LV}^2 \cdot 1.04 \quad (2.92)$$

όπου I_{LV} (σε A) είναι το ρεύμα του πηνίου χαμηλής τάσης. Ο συντελεστής 1.04 στην εξίσωση (2.92) εκφράζει την προσαύξηση των απωλειών κατά 4 % λόγω της χαλαρότητας του πηνίου χαμηλής τάσης, ενώ ο συντελεστής 3 αντιπροσωπεύει το συνολικό αριθμό των πηνίων.

2.13.2 Απώλειες Φορτίου Πηνίου Υψηλής Τάσης

Το μήκος του αγωγού του πηνίου υψηλής τάσης, $ConductorLength_{HV}$ (σε m), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$ConductorLength_{HV} = MT_{HV} \cdot TurnsMain_{HV} \cdot 3 \quad (2.93)$$

όπου MT_{HV} (σε m) είναι η μέση σπείρα του αγωγού του πηνίου υψηλής τάσης και $TurnsMain_{HV}$ είναι οι ονομαστικές σπείρες του πηνίου υψηλής τάσης, ενώ ο συντελεστής 3 αντιπροσωπεύει το συνολικό αριθμό των πηνίων.

Η αντίσταση του αγωγού, R_{HV} (σε Ω), του πηνίου υψηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_{HV} = \frac{\rho_{HV} \cdot \frac{ConductorLength_{HV}}{3}}{area_{HV}} \quad (2.94)$$

όπου ρ_{HV} (σε $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$) είναι η ειδική αντίσταση του αγωγού του πηνίου υψηλής τάσης και $area_{HV}$ (σε mm^2) είναι η διατομή του πηνίου υψηλής τάσης.

Οι απώλειες φορτίου, $CuLosses_{HV}$ (σε W), των πηνίων υψηλής τάσης των τριών φάσεων υπολογίζονται από τη σχέση:

$$CuLosses_{HV} = 3 \cdot R_{HV} \cdot I_{HV}^2 \cdot 1.06 \quad (2.95)$$

όπου I_{HV} (σε A) είναι το ρεύμα του πηνίου υψηλής τάσης. Ο συντελεστής 1.06 στην (2.95) εκφράζει την προσαύξηση των απωλειών κατά 6 % λόγω της χαλαρότητας του πηνίου υψηλής τάσης και λόγω των λήψεων που υπάρχουν στο πηνίο υψηλής τάσης, ενώ ο παράγοντας 3 αντιπροσωπεύει το συνολικό αριθμό των πηνίων.

2.13.3 Συνολικές Απώλειες Φορτίου

Οι συνολικές απώλειες φορτίου, LL (σε W), είναι:

$$LL = CuLosses_{LV} + CuLosses_{HV} + EdL_{LV} + EdL_{HV} \quad (2.96)$$

όπου $CuLosses_{LV}$ (σε W) είναι οι απώλειες φορτίου των πηνίων χαμηλής τάσης των τριών φάσεων, $CuLosses_{HV}$ (σε W) είναι οι απώλειες φορτίου των πηνίων υψηλής τάσης των τριών φάσεων, EdL_{LV} (σε W) είναι οι απώλειες δινορρευσμάτων των πηνίων χαμηλής τάσης των τριών φάσεων και EdL_{HV} (σε W) είναι οι απώλειες δινορρευσμάτων των πηνίων υψηλής τάσης των τριών φάσεων. Οι απώλειες δινορρευσμάτων προκύπτουν εμπειρικά από πίνακες.

Εάν $LL > LL_{max}$ (σε W), δηλαδή αν οι απώλειες φορτίου υπερβαίνουν τις μέγιστες επιτρεπόμενες απώλειες φορτίου, τότε η συγκεκριμένη υποψήφια λύση απορρίπτεται λόγω παραβίασης της προδιαγραφής των απωλειών φορτίου.

2.13.4 Υπολογισμός Βάρους Αγωγών Χαμηλής και Υψηλής Τάσης

Ο υπολογισμός του βάρους των αγωγών των πηνίων χαμηλής και υψηλής τάσης εξαρτάται από το είδος του αγωγού. Συγκεκριμένα, όταν ο αγωγός είναι ταινία στη θεωρητική σχέση υπολογισμού του βάρους υπεισέρχεται ένας εμπειρικός παράγοντας προσαύξεσης 4%, ενώ για τα υπόλοιπα είδη αγωγού υπεισέρχεται ένας εμπειρικός παράγοντας προσαύξεσης 6%.

Συνεπώς, εάν το είδος του αγωγού στο πηνίο χαμηλής τάσης είναι φύλλο, τότε το βάρος του αγωγού των πηνίων χαμηλής τάσης των τριών φάσεων $ConductorWeight_{LV}$ (σε kg) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$ConductorWeight_{LV} = ConductorLength_{LV} \cdot \left(1 + \frac{TAPS_{LV,max}}{100}\right) \cdot area_{LV} \cdot g_{LV} \cdot 1.04 \cdot 10^{-3} \quad (2.97)$$

όπου $ConductorLength_{LV}$ (σε m) είναι το μήκος του αγωγού χαμηλής τάσης, $TAPS_{LV,max}$ (%) είναι η μέγιστη λήψη του πηνίου χαμηλής τάσης, $area_{LV}$ (σε mm²) είναι η διατομή του πηνίου χαμηλής τάσης και g_{LV} (σε gr/cm³) είναι η πυκνότητα του αγωγού χαμηλής τάσης.

Εάν το είδος του αγωγού στο πηνίο χαμηλής τάσης δεν είναι ταινία, τότε το βάρος του αγωγού (σε kg) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$ConductorWeight_{LV} = ConductorLength_{LV} \cdot \left(1 + \frac{TAPS_{LV,max}}{100}\right) \cdot area_{LV} \cdot g_{LV} \cdot 1.06 \cdot 10^{-3} \quad (2.98)$$

Εάν το είδος του αγωγού στο πηνίο υψηλής τάσης είναι ταινία, τότε το βάρος του αγωγού (σε kg) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$ConductorWeight_{HV} = ConductorLength_{HV} \cdot \left(1 + \frac{TAPS_{HV,max}}{100}\right) \cdot area_{HV} \cdot g_{HV} \cdot 1.04 \cdot 10^{-3} \quad (2.99)$$

όπου $ConductorLength_{HV}$ (σε m) είναι το μήκος του αγωγού υψηλής τάσης, $TAPS_{HV,max}$ (%) είναι η μέγιστη λήψη του πηνίου υψηλής τάσης, $area_{HV}$ (σε mm²) είναι η διατομή του πηνίου υψηλής τάσης και g_{HV} (σε gr/cm³) είναι η πυκνότητα του αγωγού υψηλής τάσης.

Εάν το είδος του αγωγού στο πηνίο υψηλής τάσης δεν είναι ταινία, τότε το βάρος του αγωγού (σε kg) των πηνίων υψηλής τάσης των τριών φάσεων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$ConductorWeight_{HV} = ConductorLength_{HV} \cdot \left(1 + \frac{TAPS_{HV,max}}{100}\right) \cdot area_{HV} \cdot g_{HV} \cdot 1.06 \cdot 10^{-3} \quad (2.100)$$

2.14 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΑΣΗΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΣΗΣ

Ως τάση βραχυκύκλωσης θεωρείται η τάση που πρέπει να εφαρμοστεί στα άκρα του πρωτεύοντος πηνίου του μετασχηματιστή, προκειμένου να διέλθει μέσα από αυτό αλλά και μέσα από το τύλιγμα του βραχυκυκλωμένου δευτερεύοντος πηνίου ένταση ρεύματος ίδιας τιμής με τις αντίστοιχες ονομαστικές του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου.

Η τάση βραχυκύκλωσης, IZ (%), υπολογίζεται θεωρητικά από τη σχέση [2.11]:

$$IZ = \sqrt{IX^2 + IR^2} \quad (2.101)$$

όπου το επαγωγικό μέρος της τάσης βραχυκύκλωσης, IX (%), υπολογίζεται από τη σχέση (2.89) και το ωμικό μέρος της τάσης βραχυκύκλωσης, IR (%) υπολογίζεται από τη σχέση (2.102). Αναλυτικότερα, το ωμικό μέρος, IR (%), της τάσης βραχυκύκλωσης υπολογίζεται με αναγωγή των απωλειών φορτίου με βάση την ονομαστική ισχύ του μετασχηματιστή, σύμφωνα με τη σχέση:

$$IR = \frac{LL}{RKVA \cdot 10} \quad (2.102)$$

όπου LL (σε W) οι απώλειες φορτίου, και $RKVA$ (σε KVA) η ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή.

Όμως, λόγω των κατασκευαστικών ανοχών, στην θεωρητική τιμή της τάσης βραχυκύκλωσης της σχέσης (2.101) προστίθεται και ένας εμπειρικός προσθετός, Add (%). Συνεπώς, η τάση βραχυκύκλωσης U_{sc} (%), υπολογίζεται από τη σχέση:

$$U_{sc} = IZ + Add \quad (2.103)$$

Εάν $U_{sc} < U_{sc,min}$ ή $U_{sc} > U_{sc,max}$, τότε η συγκεκριμένη υποψήφια λύση απορρίπτεται, λόγω παραβίασης της προδιαγραφής της τάσης βραχυκύκλωσης.

2.15 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΗΚΟΥΣ ΠΗΝΙΟΥ

2.15.1 Υπολογισμός Πάχους Καναλιών

Το συνολικό πάχος, $ThickDucts$ (σε mm), των καναλιών του πηνίου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$ThickDucts = 2 \cdot (Ducts_{LV} + Ducts_{HV}) \cdot 3.33 \quad (2.104)$$

όπου $Ducts_{LV}$ και $Ducts_{HV}$ είναι ο αριθμός των καναλιών της χαμηλής και της υψηλής τάσης αντίστοιχα, ενώ ο συντελεστής 3.33 αντιστοιχεί στο πάχος κάθε καναλιού (σε mm) (Σχήμα 2.11).

2.15.2 Υπολογισμός Πάχους Μπαρών (Λήψεων) Χαμηλής και Υψηλής Τάσης

Στον υπολογισμό του μήκους του πηνίου, εκτός των άλλων, υπεισέρχεται το πάχος των μπαρών χαμηλής και υψηλής τάσης, το οποίο εξαρτάται από το είδος του αγωγού. Συνεπώς, εάν το είδος του αγωγού στο πηνίο χαμηλής τάσης είναι αγωγός κυκλικής διατομής ή δύο αγωγοί κυκλικής διατομής, τότε το πάχος της μπάρας της χαμηλής τάσης υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη διάμετρο του αγωγού του πηνίου χαμηλής τάσης. Εάν το είδος του αγωγού στο πηνίο χαμηλής τάσης είναι αγωγός ορθογωνικής διατομής ή δύο αγωγοί ορθογωνικής διατομής, τότε το πάχος της μπάρας της χαμηλής τάσης υπολογίζεται με βάση το πάχος του αγωγού του πηνίου χαμηλής τάσης. Εάν το είδος του αγωγού στο πηνίο χαμηλής τάσης είναι ταινία, τότε το πάχος της μπάρας της χαμηλής τάσης υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη διατομή του αγωγού του πηνίου χαμηλής τάσης και τη διάσταση του καλουπιού του πηνίου (κατά την y διεύθυνση). Σε αντιστοιχία με το πηνίο χαμηλής τάσης, υπολογίζεται το πάχος μπαρών της υψηλής τάσης. Επίσης, ο αριθμός μπαρών του πηνίου χαμηλής τάσης εξαρτάται από τη συνδεσμολογία των πηνίων.

2.15.3 Υπολογισμός Λοιπών Παχών και Ανοχών

Για τον υπολογισμό του τελικού συνολικού μήκους του πηνίου λαμβάνονται υπόψη κάποια επιπλέον πάχη και ανοχές. Αναλυτικότερα, είναι αναγκαίο να ληφθούν υπόψη:

- η επικάλυψη χαρτονιού και μόνωσης στρώσεων χαμηλής τάσης,
- η επικάλυψη μόνωσης στρώσεων υψηλής τάσης, σύμφωνα με τις στρώσεις του πηνίου και της μόνωσης μεταξύ των στρώσεων υψηλής τάσης.
- οι ανοχές και η επιμήκυνση, ανάλογα με την ονομαστική ισχύ του μετασχηματιστή.

2.15.4 Υπολογισμός Συνολικού Μήκους Πηνίου

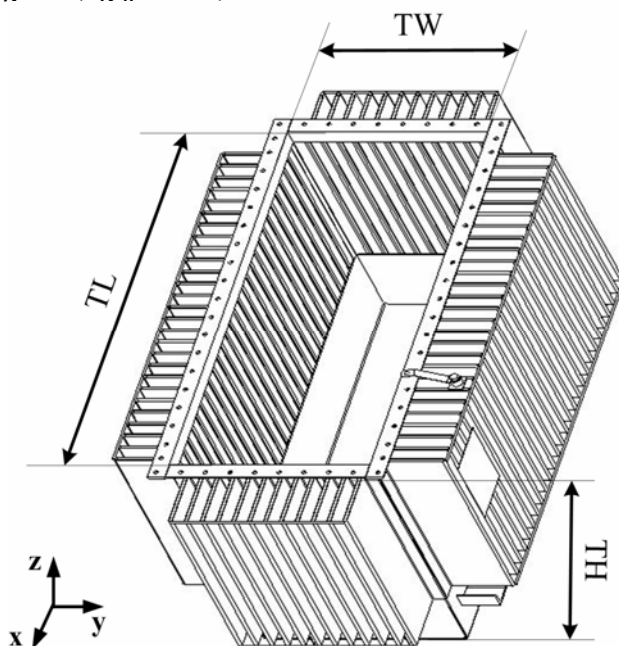
Για την εξαγωγή του συνολικού μήκους του πηνίου, $CoilLength$ (mm), προστίθενται τα παρακάτω μεγέθη:

- μήκος καλουπιού πηνίου,
- διάσταση F πηνίου,

- συνολικό πάχος καναλιών πηνίου,
- συνολικό πάχος λήψεων χαμηλής τάσης,
- συνολικό πάχος λήψεων υψηλής τάσης,
- επικάλυψη χαρτονιού και μόνωσης στρώσεων χαμηλής τάσης,
- επικάλυψη μόνωσης στρώσεων υψηλής τάσης,
- ανοχές και επιμήκυνση.

2.16 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΔΟΧΕΙΟΥ

Το δοχείο συντελεί στη ψύξη του ενεργού μέρους κατά τη λειτουργία του. Η θερμότητα που παράγεται από το ενεργό μέρος (λόγω των απωλειών φορτίου και κενού φορτίου) μεταφέρεται στο λάδι και στη συνέχεια στα τοιχώματα του δοχείου. Η επιφάνεια των τοιχωμάτων του δοχείου πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μεταφερθεί η θερμότητα αυτή στο περιβάλλον, διατηρώντας τη θερμοκρασία των τυλιγμάτων και του πυρήνα εντός των ορίων της προδιαγραφόμενης υπερύψωσης της θερμοκρασίας. Τα τοιχώματα του δοχείου των μετασχηματιστών διανομής κατασκευάζονται από πτυχωτό έλασμα, και ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών τους γίνεται μετά τον προσδιορισμό των κυρίων διαστάσεων του δοχείου. Οι τρεις κύριες διαστάσεις που πρέπει ο σχεδιαστής να υπολογίσει είναι το πλάτος, το ύψος και το μήκος του δοχείου (Σχήμα 2.13).



Σχήμα 2.13 Οι τρεις κύριες διαστάσεις του δοχείου.

Για τον υπολογισμό του μήκους του δοχείου λαμβάνονται υπόψη η ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή, το συνολικό εύρος δύο διαδοχικών πυρήνων (ενός μικρού και ενός μεγάλου), το εύρος του παραθύρου του μικρού και μεγάλου πυρήνα, το πάχος του σκέλους του πυρήνα και η απόσταση μεταξύ μικρού και μεγάλου πυρήνα.

Στη συνέχεια εξετάζεται εάν το μήκος του δοχείου υπερβαίνει το αντίστοιχο μέγιστο επιτρεπόμενο όριο, οπότε η συγκεκριμένη υποψήφια λύση απορρίπτεται λόγω παραβίασης της προδιαγραφής για το μήκος του δοχείου.

Για τον υπολογισμό του πλάτους του δοχείου λαμβάνεται υπόψη το μήκος του πηνίου. Εάν το πλάτος του δοχείου λαδιού υπερβαίνει το αντίστοιχο μέγιστο επιτρεπόμενο όριο, τότε η συγκεκριμένη υποψήφια λύση απορρίπτεται λόγω παραβίασης της προδιαγραφής για το πλάτος του δοχείου λαδιού.

Ακόμη, για τον καθορισμό του ελάχιστου ύψους του δοχείου, λαμβάνεται υπόψη η ονομαστική ισχύς. Αναλυτικότερα, για μετασχηματιστές μεγαλύτερης ή μικρότερης ονομαστικής ισχύος από 630 kVA εξετάζεται εάν διαθέτουν δοχείο διαστολής ή όχι και στη συνέχεια υπολογίζεται το ελάχιστο ύψος του δοχείου λαδιού σύμφωνα με το ύψος του παραθύρου του πυρήνα G και το πάχος του σκέλους του πυρήνα E_u .

Εάν το ύψος του δοχείου υπερβαίνει το αντίστοιχο μέγιστο επιτρεπόμενο όριο, τότε η συγκεκριμένη υποψήφια λύση απορρίπτεται λόγω παραβίασης της προδιαγραφής για το ύψος του δοχείου.

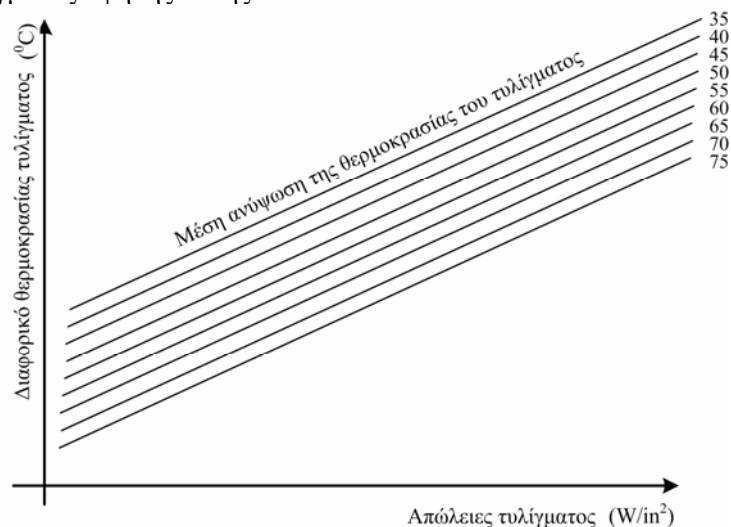
Τέλος, σημαντική παράμετρος υπολογισμού αποτελεί το ύψος λαδιού. Συγκεκριμένα, ο υπολογισμός του ύψους του λαδιού πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη εάν υπάρχει δοχείο διαστολής ή όχι, σύμφωνα με το υπολογισμένο ύψος του δοχείου.

2.17 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΛΑΔΙΟΥ ΚΑΙ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ

Πριν τον υπολογισμό των διαστάσεων των πτυχωτών ελασμάτων της επιφάνειας του δοχείου, πραγματοποιείται υπολογισμός της διαφοράς θερμοκρασίας λαδιού και τυλίγματος, η οποία εξαρτάται από τα κανάλια ψύξης των πηνίων χαμηλής και υψηλής τάσης και τη θερμότητα απωλειών που απάγουν. Η επιφάνεια των καναλιών ψύξης του πηνίου χαμηλής τάσης υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη των αριθμό των καναλιών του πηνίου χαμηλής τάσης, το πλάτος του καλουπιού του πηνίου και το πλάτος της στρώσης του πηνίου. Στη συνέχεια, ανάλογα με το είδος της συνδεσμολογίας του πηνίου χαμηλής τάσης, υπολογίζεται η επιφάνεια των καναλιών του διακένου μεταξύ του πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης. Επομένως, η συνολική επιφάνεια των καναλιών χαμηλής τάσης και του εξωτερικού διακένου είναι το άθροισμα της επιφάνειας των καναλιών ψύξης και διακένου.

Παράλληλα, οι απώλειες του ενός πηνίου χαμηλής τάσης (σε W/m^2) υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες φορτίου και δινορρευσμάτων των τριών πηνίων του αγωγού χαμηλής τάσης. Έχοντας ως δεδομένο την συγκεκριμένη τιμή, εντοπίζεται το διαφορικό της θερμοκρασίας του τυλίγματος χαμηλής τάσης, χρησιμοποιώντας καμπύλη της μορφής που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.14 και στη συνέχεια υπολογίζεται το μέσο διαφορικό θερμοκρασίας λαδιού και τυλίγματος χαμηλής τάσης. Τέλος, πραγματοποιείται ο έλεγχος εάν το μέσο διαφορικό θερμοκρασίας λαδιού και τυλίγματος χαμηλής τάσης υπερβαίνει το αντίστοιχο μέγιστο επιτρεπόμενο όριο, οπότε η συγκεκριμένη υποψήφια λύση απορρίπτεται, λόγω παραβίασης της προδιαγραφής για τη διαφορά θερμοκρασίας λαδιού και τυλίγματος.

Η ίδια μέθοδος ακολουθείται για τον υπολογισμό του μέσου διαφορικού θερμοκρασίας λαδιού και τυλίγματος υψηλής τάσης.



Σχήμα 2.14 Μεταβολή διαφορικού θερμοκρασίας τυλίγματος σε σχέση με τη μέση ανύψωση της θερμοκρασίας του τυλίγματος και τις απώλειες του τυλίγματος.

2.18 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΠΑΝΕΛΩΝ

Οι τριφασικοί μετασχηματιστές παρουσιάζουν έντονο το φαινόμενο της ανάπτυξης μεγάλης θερμότητας στα ενεργά τους μέρη κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Για την επιτυχή αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, χρησιμοποιούνται πτυχωτά ελάσματα (ή διαφορετικά ψυκτικά πανέλα), έχοντας ως στόχο την αύξηση της επιφάνειας ψύξης του μετασχηματιστή και συνεπώς την καλύτερη λειτουργία του.

Κριτήριο για την επιλογή των διαστάσεων των ψυκτικών πανέλων είναι η μέση ανύψωση της θερμοκρασίας λαδιού, η οποία υπολογίζεται με βάση το μέγιστο διαφορικό θερμοκρασίας μεταξύ λαδιού και τυλίγματος. Ως μέγιστο διαφορικό θερμοκρασίας λαμβάνεται η μέγιστη τιμή ανάμεσα 1) στο μέσο διαφορικό θερμοκρασίας λαδιού και τυλίγματος χαμηλής τάσης και 2) στο μέσο διαφορικό θερμοκρασίας λαδιού και τυλίγματος υψηλής τάσης. Για τη μέση ανύψωση της θερμοκρασίας λαδιού χρησιμοποιείται η μέγιστη θερμοκρασία τυλίγματος, η μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος και το μέγιστο διαφορικό θερμοκρασίας. Γνωρίζοντας τη μέση ανύψωση θερμοκρασίας λαδιού, υπολογίζεται η σταθερά μεταγωγής και η σταθερά ακτινοβολίας του δοχείου χρησιμοποιώντας κατάλληλους πίνακες.

Ο υπολογισμός της επιφάνειας μεταγωγής και της επιφάνειας ακτινοβολίας του δοχείου εξαρτάται από το αν υπάρχει ή όχι δοχείο διαστολής, λαμβάνοντας υπόψη το ύψος του λαδιού, το μήκος, το πλάτος, και το ύψος του δοχείου καθώς επίσης και τη διάσταση του πανέλου.

Η επιφάνεια των πανέλων υπολογίζεται σύμφωνα με την απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών πτερυγίων (πανέλων), το ύψος του πανέλου και τον αριθμό των πανέλων.

Οι απώλειες λόγω μεταγωγής του δοχείου υπολογίζονται σύμφωνα με την επιφάνεια μεταγωγής και τη σταθερά μεταγωγής του δοχείου που προκύπτει από αντίστοιχο πίνακα.

Οι απώλειες που απάγονται μέσω ακτινοβολίας προκύπτουν σύμφωνα με την επιφάνεια ακτινοβολίας του δοχείου και τη σταθερά ακτινοβολίας του δοχείου λαδιού λαμβάνοντας τιμές από αντίστοιχο πίνακα.

Οι απώλειες που απάγονται από τα πανέλα υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψη την επιφάνεια των πανέλων και το συντελεστή απωλειών πανέλων που προκύπτει από κατάλληλο πίνακα.

Επομένως, από το συγκεκριμένο δοχείο και πανέλα (πτυχωτά ελάσματα) μπορεί να γίνει μεταγωγή και ακτινοβολία των συνολικών απωλειών, *TankLosses* (σε W), που υπολογίζονται αθροίζοντας τις απώλειες που απάγονται λόγω μεταγωγής δοχείου, ακτινοβολίας και απωλειών πανέλων.

Όμως, οι συνολικές απώλειες που θα πρέπει να απαχθούν λόγω ακτινοβολίας από το δοχείο και τα πανέλα θα πρέπει να υπερβούν τις συνολικές απώλειες του μετασχηματιστή, *TTL* (σε W), οι οποίες υπολογίζονται αθροίζοντας 1) τις απώλειες φορτίου χαμηλής τάσης, 2) τις μέγιστες απώλειες φορτίου του πηνίου υψηλής τάσης, 3) τις απώλειες δινορρευσμάτων χαμηλής τάσης, 4) τις απώλειες δινορρευσμάτων υψηλής τάσης, και 5) τις απώλειες κενού φορτίου.

Πρέπει λοιπόν να επιλεγεί κατάλληλο ύψος πανέλου και κατάλληλες διαστάσεις δοχείου, ώστε οι απώλειες που μπορεί να ψύξει ο μετασχηματιστής να είναι μεγαλύτερες ή τουλάχιστον ίσες σε σχέση με τις απώλειες (θερμότητας) που δημιουργούνται στο μετασχηματιστή κατά τη λειτουργία του, σύμφωνα με τη σχέση (2.17):

Η επιλογή του ύψους του πανέλου γίνεται με τη βοήθεια κατάλληλου πίνακα. Συγκεκριμένα, υπολογίζονται αρχικά οι απώλειες που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή. Έπειτα, για κάθε ένα από τα διαφορετικά μεγέθη πανέλων που υπάρχουν στο αντίστοιχο πίνακα (ξεκινώντας από το μικρότερο όσο αφορά τις διαστάσεις του), υπολογίζονται οι απώλειες και ελέγχεται αν επαληθεύεται η συνθήκη (2.17). Το πρώτο (μικρότερο) μέγεθος πανέλου που ικανοποιεί τη σχέση (2.17), αποτελεί τη λύση στο πρόβλημα της ικανοποιητικής ψύξης του μετασχηματιστή. Σε περίπτωση που δε μπορεί να βρεθεί κατάλληλο μέγεθος πανέλου που να ικανοποιεί την παραπάνω εξίσωση, τότε η συγκεκριμένη υποψήφια λύση απορρίπτεται, επειδή δεν επιτυγχάνεται ικανοποιητική ψύξη του μετασχηματιστή.

2.19 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

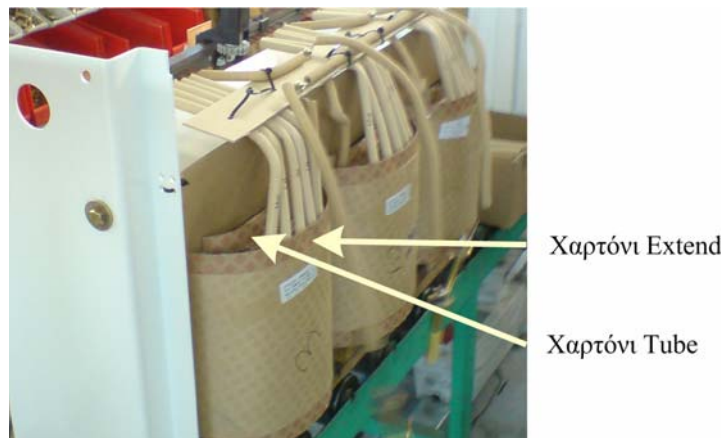
Ο υπολογισμός των συνολικών διαστάσεων των μονωτικών υλικών συμπεριλαμβάνει τόσο τα μονωτικά υλικά των πηνίων όσο και επιπλέον μονωτικά υλικά που χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή του ενεργού μέρους. Στρώμα μονωτικού χαρτιού υπάρχει μεταξύ του τυλίγματος της υψηλής τάσης και του πυρήνα, μεταξύ των στρώσεων των τυλιγμάτων τόσο της υψηλής όσο και της χαμηλής τάσης, μεταξύ του τυλίγματος της χαμηλής τάσης και του πυρήνα, καθώς και μεταξύ των τυλιγμάτων της υψηλής τάσης. Επιπλέον, μονωτικά χαρτιά υπάρχουν μεταξύ των στρώσεων των τυλιγμάτων και των καναλιών ψύξης. Αναλυτικότερα, θα πρέπει να υπολογιστεί η επιφάνεια όλων των μονωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται στο πηνίο χαμηλής και υψηλής τάσης, δηλαδή:

- του μονωτικού χαρτονιού *Tube* (χαρτόνι το οποίο χρησιμοποιείται μεταξύ του πηνίου χαμηλής τάσης και του πυρήνα, Σχήμα 2.15): η επιφάνεια αυτή προκύπτει πολλαπλασιάζοντας το ύψος του χαρτονιού με την ισοδύναμη εσωτερική διάμετρο² του πηνίου χαμηλής τάσης.
- των μονωτικών των στρώσεων (στρώσεις πάχους I_{LV} ή I_{HV} , Σχήμα 2.9): η επιφάνεια των μονωτικών υλικών των στρώσεων κάθε πηνίου προκύπτει πολλαπλασιάζοντας το ύψος του μονωτικού κάθε στρώσης (λαμβάνεται ίσο με τη διάσταση $G-2 \cdot CCEE$ αν πρόκειται για το πηνίο χαμηλής τάσης ή $G-2 \cdot CCEE + 4 \cdot D_{HV-C}$ αν πρόκειται για το πηνίο υψηλής τάσης, Σχήμα 2.8) με τον αριθμό των στρώσεων του πηνίου και το μήκος της μέσης σπείρας του πηνίου.
- των μονωτικών των καναλιών πηνίων (στρώσεις μονωτικού χαρτιού το οποίο τοποθετείται ανάμεσα σε στρώση πηνίου και κανάλι, Σχήμα 2.11): η επιφάνεια των μονωτικών υλικών των καναλιών κάθε πηνίου προκύπτει πολλαπλασιάζοντας το ύψος του κάθε καναλιού (λαμβάνεται ίσο με τη διάσταση $G-2 \cdot CCEE$, Σχήμα 2.8) με τον αριθμό των καναλιών του πηνίου και (αν πρόκειται για κανάλι του πηνίου χαμηλής τάσης) το μήκος του καλουπιού του πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης μιας φάσης ή (αν πρόκειται για κανάλι του πηνίου υψηλής τάσης) το άθροισμα του μήκους του καλουπιού του πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης μιας φάσης και του πάχους του πηνίου χαμηλής τάσης και του διακένου μεταξύ πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης (το πάχος χαμηλής τάσης και το διάκενο πολλαπλασιάζονται με 2 για να ληφθούν υπόψη και οι δύο πλευρές του πηνίου εκτός των παραθύρων του πυρήνα).
- των μονωτικών των περιμετρικών καναλιών πηνίου (στρώσεις μονωτικού χαρτιού το οποίο τοποθετείται ανάμεσα σε στρώση πηνίου και περιμετρικό κανάλι): η επιφάνεια των μονωτικών υλικών του περιμετρικού καναλιού κάθε πηνίου προκύπτει πολλαπλασιάζοντας το ύψος του καναλιού (διάσταση $G-2 \cdot CCEE$, Σχήμα 2.8) με την ισοδύναμη διάμετρο του περιμετρικού καναλιού.
- των μονωτικών διακένου (στο διάκενο I_{HV-LV} μεταξύ των πηνίων χαμηλής και υψηλής τάσης μιας φάσης ή στο διάκενο μεταξύ των πηνίων υψηλής τάσης δύο διαδοχικών φάσεων I_{HV-HV} , Σχήμα 2.9): η επιφάνεια των μονωτικών υλικών του διακένου μεταξύ του πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης προκύπτει πολλαπλασιάζοντας το ύψος του μονωτικού του διακένου (διάσταση $G-2 \cdot CCEE$, Σχήμα 2.8) με την ισοδύναμη εξωτερική διάμετρο του πηνίου χαμηλής τάσης. Αντίστοιχα, η επιφάνεια των μονωτικών υλικών του διακένου μεταξύ των πηνίων υψηλής τάσης δύο διαδοχικών φάσεων προκύπτει πολλαπλασιάζοντας το ύψος του μονωτικού του διακένου με την ισοδύναμη εξωτερική διάμετρο του πηνίου υψηλής τάσης.
- του μονωτικού χαρτονιού *Extend* (επιπλέον μονωτικό υλικό το οποίο χρησιμοποιείται στην εξωτερική πλευρά του πηνίου υψηλής τάσης, Σχήμα 2.15): η επιφάνεια αυτή

² Με τον όρο ισοδύναμη διάμετρο περιγράφεται η διάμετρος που θα είχε το πηνίο (και τα κανάλια του) εάν ήταν κυλινδρικά.

προκύπτει πολλαπλασιάζοντας το ύψος του χαρτονιού με την ισοδύναμη εξωτερική διάμετρο του πηνίου υψηλής τάσης.

Γενικά υπάρχουν πέντε διαφορετικά πάχη μονωτικών υλικών, το συνολικό βάρος των οποίων (*TotalWeightOfInsulatingMaterials*) υπολογίζεται βάσει της συνολικής επιφάνειας και συναρτήσει της πυκνότητας του μονωτικού υλικού που χρησιμοποιείται και διαφόρων εμπειρικών συντελεστών.



Σχήμα 2.15 Μονωτικό χαρτόνι *Tube* και *Extend*.

2.20 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΑΡΟΥΣ ΚΑΝΑΛΙΩΝ

Ακόμη μια σημαντική παράμετρος για τη σωστή σχεδίαση του μετασχηματιστή είναι ο υπολογισμός του βάρους των καναλιών (διάυλοι), τα οποία χρησιμοποιούνται μεταξύ των στρώσεων της υψηλής και χαμηλής τάσης για την κυκλοφορία του μονωτικού λαδιού και κατά συνέπεια για την καλύτερη ψύξη του μετασχηματιστή. Το πάχος τους εξαρτάται από το μήκος του τυλίγματος, εξαρτώμενο από την ισχύ του μετασχηματιστή, για να αποφεύγεται η αποκοπή της ροής του λαδιού, λόγω της στρωτής κίνησής του. Στη συνέχεια, υπολογίζεται και το κατάλληλο πάχος διακένου μεταξύ του πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης. Επομένως, ανάλογα με τις διαστάσεις του πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης, υπολογίζεται ο αριθμός των καναλιών και ο αριθμός των εσωτερικών περιμετρικών καναλιών. Στο Σχήμα 2.5 και στο Σχήμα 2.11 φαίνονται τα κανάλια τόσο στην υψηλή όσο και στη χαμηλή τάση. Επομένως, το συνολικό βάρος των καναλιών και για τις δύο τάσεις προκύπτει από εμπειρική σχέση, η οποία περιέχει το άθροισμα των καναλιών της χαμηλής και υψηλής τάσης καθώς επίσης και τον αριθμό των εσωτερικών περιμετρικών καναλιών της χαμηλής και υψηλής τάσης.

2.21 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΑΡΟΥΣ ΛΑΔΙΟΥ

Για το συνολικό βάρος του λαδιού, αρχικά απαιτείται ο υπολογισμός του όγκου του χώρου των πανέλων λαμβάνοντας υπόψη τις διαστάσεις και τον αριθμό των πανέλων. Επίσης, απαιτείται ο προσδιορισμός του όγκου που καταλαμβάνουν τα πηνία χαμηλής και υψηλής τάσης, καθώς και ο όγκος που καταλαμβάνει η μαγνητική λαμαρίνα. Ακόμη, ο όγκος του δοχείου ο οποίος θα μπορούσε να καταλαμβάνεται από λάδι (αν δεν υπήρχε το ενεργό μέρος του μετασχηματιστή), υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το μήκος του δοχείου, το πλάτος του δοχείου και το ύψος του λαδιού. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο όγκος του λαδιού, λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω υπολογισμούς. Το βάρος του λαδιού υπολογίζεται από την πυκνότητα λαδιού και τον όγκο του λαδιού.

2.22 ΚΟΣΤΟΣ ΚΥΡΙΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Το συνολικό κόστος των οκτώ κύριων υλικών του μετασχηματιστή, *MMC* (σε €), προκύπτει από τη σχέση:

$$MMC = \sum_{i=1}^8 C_i \quad (2.105)$$

Τα κόστη C_i με $i=1,\dots,8$ υπολογίζονται από τις εξισώσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Το κόστος, C_1 (σε €), του αγωγού του πηνίου χαμηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_1 = \text{ConductorWeight}_{LV} \cdot \text{CPK}_{LV} \quad (2.106)$$

όπου $\text{ConductorWeight}_{LV}$ (σε kg) είναι το συνολικό βάρος των τριών πηνίων χαμηλής τάσης, και CPK_{LV} (σε €/kg) είναι το κόστος του αγωγού του πηνίου χαμηλής τάσης ανά κιλό.

Το κόστος, C_2 (σε €), του αγωγού του πηνίου υψηλής τάσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_2 = \text{ConductorWeight}_{HV} \cdot \text{CPK}_{HV} \quad (2.107)$$

όπου $\text{ConductorWeight}_{HV}$ (σε kg) είναι το συνολικό βάρος των τριών πηνίων χαμηλής τάσης, και CPK_{HV} (σε €/kg) είναι το κόστος του αγωγού του πηνίου χαμηλής τάσης ανά κιλό.

Το κόστος, C_3 (σε €), των μαγνητικών πυρήνων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_3 = \text{CTW} \cdot \text{CPK}_{MS} \quad (2.108)$$

όπου CTW (σε kg) είναι το συνολικό βάρος των τεσσάρων πυρήνων του μετασχηματιστή και CPK_{MS} (σε €/kg) είναι το κόστος της μαγνητικής λαμαρίνας ανά κιλό.

Το κόστος, C_4 (σε €), των μονωτικών χαρτιών υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_4 = \text{TotalWeightOfInsulatingMaterials} \cdot \text{CPK}_p \quad (2.109)$$

όπου $\text{TotalWeightOfInsulatingMaterials}$ (σε kg) είναι το συνολικό βάρος των μονωτικών χαρτιών, και CPK_p (σε €/kg) είναι το κόστος του μονωτικού χαρτιού ανά κιλό.

Το κόστος, C_5 (σε €), των καναλιών υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_5 = \text{WeightOfDuctStrips} \cdot \text{CPK}_{DS} \quad (2.110)$$

όπου $\text{WeightOfDuctStrips}$ (σε kg) είναι το συνολικό βάρος των καναλιών, και CPK_{DS} (σε € / kg) είναι το κόστος των καναλιών ανά κιλό.

Το κόστος, C_6 (σε €), του λαδιού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_6 = \text{WeightOfOil} \cdot \text{CPK}_O \quad (2.111)$$

όπου WeightOfOil (σε kg) είναι το συνολικό βάρος του λαδιού, και CPK_O (σε € / kg) είναι το κόστος του λαδιού ανά κιλό.

Το κόστος, C_7 (σε €), των πανέλων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_7 = 9.87 \cdot \text{CorrugationArea} \cdot \text{CPK}_R \quad (2.112)$$

όπου CorrugationArea (σε m²) είναι η επιφάνεια των πανέλων, και CPK_R (σε €/kg) είναι το κόστος του ψυκτικού πανέλου ανά κιλό.

Το κόστος, C_8 (σε €), της λαμαρίνας του δοχείου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_8 = \text{TotalSheetSteelweight} \cdot \text{CPK}_S \quad (2.113)$$

όπου $\text{TotalSheetSteelweight}$ (σε kg) είναι το συνολικό βάρος του φύλλου λαμαρίνας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή συγκεκριμένων τμημάτων του μετασχηματιστή όπως για παράδειγμα τις πλευρικές επιφάνειες του καζανιού ή του δοχείου διαστολής, και CPK_S (σε €/kg) είναι το κόστος του σιδήρου του δοχείου ανά κιλό.

2.23 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό διατυπώθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης σχεδίασης των τριφασικών μετασχηματιστών διανομής με τυλιγμένους πυρήνες χρησιμοποιώντας ως μονωτικό ορυκτό λάδι, κύριος στόχος του οποίου είναι η εύρεση των βέλτιστων τιμών των κατασκευαστικών

παραμέτρων, βάσει των οποίων εξασφαλίζεται σχεδίαση με το ελάχιστο δυνατό κόστος (κατασκευής ή συνολικό κόστος κατοχής) ενώ παράλληλα ικανοποιούνται οι περιορισμοί σχεδίασης. Η βέλτιστη σχεδίαση συνίσταται στον υπολογισμό των ηλεκτρικών και μηχανολογικών χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή, μέσω αναλυτικών σχέσεων και εμπειρικών συντελεστών, ακολουθώντας μια αλληλουχία υπολογισμών οι οποίοι εμπλέκουν μια σειρά από μεταβλητές σχεδίασης. Βάσει των χαρακτηριστικών αυτών υπολογίζεται το κόστος των επιμέρους συνιστωσών του ενεργού και μηχανικού μέρους του μετασχηματιστή, το οποίο χρησιμοποιείται για την εξαγωγή της αντικειμενικής συνάρτησης βελτιστοποίησης. Η μη γραμμική μορφή της συνάρτησης αυτής, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι μεταβλητές σχεδίασης μπορεί να λαμβάνουν συνεχείς ή διακριτές τιμές καθιστούν τη βελτιστοποίηση ένα δύσκολο πρόβλημα μη γραμμικού μικτού ακέραιου προγραμματισμού με μη γραμμικούς περιορισμούς. Στη συνέχεια του κεφαλαίου περιγράφηκε ο τρόπος με τον οποίο επιλύεται από την υφιστάμενη ευρετική μεθοδολογία βελτιστοποίησης. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν και τεκμηριώθηκαν οι αναλυτικές εξισώσεις της σχεδίασης, οι οποίες συνθέτουν τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης, αποτελώντας τη βάση για τις μεθόδους που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια.

2.24 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] Schneider Electric, *Μετασχηματιστές διανομής λαδιού EABHM: Χρήση και Συντήρηση*, Τεχνικό τετράδιο Νο. 2, 2002.
- [2.2] IEC 60296, *Specification for Unused Mineral Insulating Oils for Transformers and Switchgear*, 1982.
- [2.3] Σ. Αρτεμάκης, Π. Γεωργιάκης, Α. Σουφλάρης, Δ. Παπαρήγας, “Εγχειρίδιο μελέτης τριφασικού μετασχηματιστή διανομής τύπου τυλιχτού πυρήνα,” Σεντέρ Ελεκτρικ ΑΕ, Οινόφυτα, Σεπτέμβριος 2000.
- [2.4] CENELEC Harmonization document, HD 428.1 S1:1992.
- [2.5] P. S. Georgilakis, M. A. Tsili, A. T. Souflaris, “A heuristic solution to the transformer manufacturing cost optimization problem,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 181, no. 1-3, pp. 260-266, 2007.
- [2.6] A. Dymkov, *Transformer design*, English translation from the Russian by A. Gavrilovets, Mir Publishers, Moscow, 1975.
- [2.7] Barry W. Kennedy, *Energy efficient transformers*, McGraw-Hill, New York, 1998.
- [2.8] Π. Σ. Γεωργιάκης, “Συμβολή μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης στη μείωση των απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών διανομής,” Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2000.
- [2.9] V. N. Mittle, A. Mittal, *Design of Electrical Machines*, 4th ed., Standard Publishers Distributors, 1996.
- [2.10] P. Raitsios, “Leakage field of a transformer under conventional and superconducting condition,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 102, pp. 246-252, 2001.
- [2.11] Π. Ραϊτσιο, *Μελέτη Μετασχηματιστών*, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα, 2000.
- [2.12] Μ. Α. Τσίλη, “Ανάπτυξη μεικτών αριθμητικών τεχνικών πεπερασμένων στοιχείων – οριακών στοιχείων για τη σχεδίαση μετασχηματιστών ισχύος,” Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2005.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΤΕΧΝΗΤΗΣ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Η επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές αποτελεί μια σημαντική παράμετρο για τη μείωση του κατασκευαστικού κόστους, αντιμετωπίζοντας το συγκεκριμένο πρόβλημα ως υποπρόβλημα του κύριου προβλήματος που δεν είναι άλλο από τη συνολική βελτιστοποίηση σχεδίασης των μετασχηματιστών. Για να υλοποιηθεί όμως η σωστή επιλογή υλικού των τυλιγμάτων, ο κατασκευαστής πρέπει να εξετάσει για κάθε σχεδίαση ενός μετασχηματιστή ποιο υλικό είναι το οικονομικότερο, ο χαλκός ή το αλουμίνιο, βελτιστοποιώντας τη σχεδίαση του μετασχηματιστή δύο φορές (μία με τυλίγματα χαλκού και μία με τυλίγματα αλουμινίου) και στη συνέχεια να επιλέξει τον οικονομικότερο μετασχηματιστή. Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος ταξινόμησης σε δύο κλάσεις (χαλκός ή αλουμίνιο), στο κεφάλαιο αυτό προτείνονται δύο μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης: τα δέντρα απόφασης και τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μεγάλο ενδιαφέρον σχετικά με την εφαρμογή της τεχνητής νοημοσύνης στη βιομηχανία. Κύριο πλεονέκτημα των τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης είναι ότι δεν απαιτείται περίπλοκη μαθηματική σχηματοποίηση ή ποσοτική συσχέτιση μεταξύ των εισόδων και εξόδων ενός συστήματος, ενώ παράλληλα δεν είναι απαραίτητα τα δεδομένα πολλών ετών.

Ένα από τα σημαντικότερα υποπροβλήματα της βέλτιστης σχεδίασης ενός μετασχηματιστή είναι η επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων χαμηλής και υψηλής τάσης. Το υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των τυλιγμάτων είναι χαλκός ή αλουμίνιο, των οποίων η συμπεριφορά είναι πολύ ικανοποιητική τόσο στην αντιμετώπιση του βραχυκυκλώματος όσο και στη μείωση των απωλειών φορτίου μειώνοντας παράλληλα και τις απώλειες δινορρευσμάτων [3.1]. Το ερώτημα που τίθεται όμως είναι: ποιο είναι εκείνο το υλικό που πρέπει να επιλέξει η βιομηχανία ώστε να μειώσει το κόστος κατασκευής; Η απάντηση στη συγκεκριμένη ερώτηση δεν είναι αυτονόητη καθώς και τα δύο υλικά αποτελούν χρηματιστηριακά προϊόντα των οποίων η τιμή μεταβάλλεται ραγδαία με την πάροδο του χρόνου. Επομένως, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η επιλογή του υλικού των τυλιγμάτων ενός μετασχηματιστή είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους στη προσπάθεια μείωσης του κόστους. Η επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή αποτελεί πρόβλημα ταξινόμησης σε δύο κλάσεις: χαλκός ή αλουμίνιο.

Για την επιλογή του υλικού των τυλιγμάτων ενός μετασχηματιστή, προτείνονται δύο μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης: τα δέντρα απόφασης και τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, βάσει των οποίων έχουν επιλυθεί με επιτυχία δύσκολα προβλήματα ταξινόμησης της βιομηχανίας [3.2][3.3].

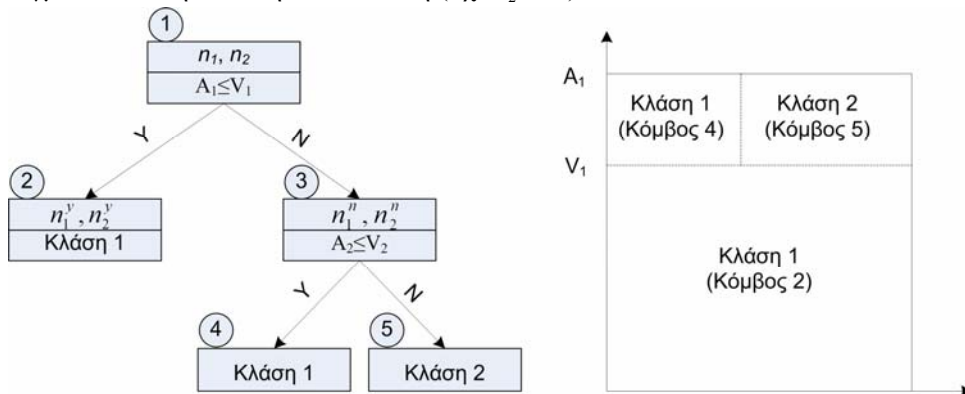
3.2 ΔΕΝΤΡΑ ΑΠΟΦΑΣΗΣ

3.2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά των Δέντρων Απόφασης

Η μεθοδολογία των δέντρων απόφασης ανήκει στις τεχνικές εποπτευόμενης μάθησης. Είναι μία μη παραμετρική μέθοδος μάθησης, ανεξάρτητη από τη στατιστική κατανομή του εξεταζόμενου πληθυσμού. Το δέντρο απόφασης κατασκευάζεται με τη διαδικασία της επαγωγικής εξαγωγής συμπερασμάτων (*inductive inference*) και έχει την ιεραρχική μορφή ενός δέντρου από κανόνες με δομή από πάνω προς τα κάτω [3.2][3.3]. Χρησιμοποιείται για την εξαγωγή συμπερασμάτων με βάση γνωστές και εύκολα αναγνωρίσιμες ιδιότητες.

Ο πρώτος κόμβος του δέντρου απόφασης ονομάζεται ρίζα και ακολουθούν οι κόμβοι ελέγχου (ή ενδιάμεσοι κόμβοι) καθώς και οι τερματικοί κόμβοι. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι περιέχουν έναν έλεγχο και δημιουργούν δύο απογόνους. Ο ένας απόγονος (αριστερός) προκύπτει όταν επαληθεύεται ο έλεγχος, ενώ ο άλλος απόγονος (δεξιός) όταν δεν επαληθεύεται. Οι τερματικοί κόμβοι είναι αυτοί που οδηγούν στην ταξινόμηση της εξεταζόμενης περίπτωσης σε μία από τις προεπιλεγμένες κλάσεις.

Το Σχήμα 3.1 δείχνει ένα υποθετικό δυαδικό δέντρο απόφασης και τη γεωμετρική του ερμηνεία στο χώρο των ιδιοτήτων. Σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο αναγράφονται τα σύνολα των παραδειγμάτων που ανήκουν στις δύο κλάσεις και ο κατάλληλος διχοτομικός έλεγχος. Στους τερματικούς κόμβους φαίνεται η κλάση η οποία αντιστοιχεί στο υποθετικά αμιγές σύνολο παραδειγμάτων που ανήκουν σε μία μόνο κλάση. Με n_i συμβολίζεται ο αριθμός των παραδειγμάτων του κόμβου 1 που ανήκουν στην κλάση i με $i \in \{1, 2\}$, και με n_i^y (αντίστοιχα n_i^n) συμβολίζεται ο αριθμός των παραδειγμάτων του κόμβου 2 (αντίστοιχα κόμβου 3) που ανήκουν στην κλάση i και επαληθεύουν (αντίστοιχα δεν επαληθεύουν) τον έλεγχο του κόμβου 1. Προκειμένου να εξαχθεί η κλάση που αντιστοιχεί σε δεδομένες τιμές των ιδιοτήτων εισόδου (για ένα συγκεκριμένο παράδειγμα), το δέντρο διασχίζεται, ξεκινώντας από τον κόμβο-ρίζα, και εφαρμόζονται διαδοχικά οι διχοτομικοί έλεγχοι που συναντώνται προκειμένου να επιλεγεί ο κατάλληλος απόγονος. Όταν η διαδικασία αυτή οδηγηθεί σε ένα τερματικό κόμβο, ανακτάται η κλάση που αντιστοιχεί στον κόμβο αυτό και αποδίδεται στο συγκεκριμένο παράδειγμα. Συνεπώς, στον τερματικό κόμβο 2 η πλειοψηφία των παραδειγμάτων ανήκουν στην κλάση 1 ($n_1^y > n_2^y$), ενώ η ιδεατή περίπτωση θα ήταν όλα τα παραδείγματα να ανήκαν στην ίδια κλάση (πχ $n_2^y = 0$).



Σχήμα 3.1 Υποθετικό δέντρο απόφασης και η αντίστοιχη γεωμετρική του ερμηνεία.

Το δέντρο απόφασης (Σχήμα 3.1) έχει συνολικά 5 κόμβους, εκ των οποίων 2 είναι ενδιάμεσοι κόμβοι (κόμβοι 1 και 3) και 3 είναι τερματικοί (κόμβοι 2, 4 και 5).

Με βάση το δέντρο απόφασης μπορούν να εξαχθούν τόσοι κανόνες, όσοι είναι και οι τερματικοί του κόμβοι. Επομένως, για το συγκεκριμένο δέντρο απόφασης εξάγονται 3 κανόνες με βάση τους οποίους ένα παράδειγμα ταξινομείται στην κλάση 1 ή στην κλάση 2. Ο Πίνακας 3.1 καταγράφει τους κανόνες αυτούς, όπου A_1 , A_2 και V_1 , V_2 είναι μεταβλητές ελέγχου και οι αντίστοιχες τιμές τους που έχουν προκύψει από το δέντρο απόφασης, ορίζοντας και τα δυο μια συνθήκη που ελέγχεται σε κάθε κόμβο.

Πίνακας 3.1 Κανόνες του δέντρου απόφασης που αφορούν το Σχήμα 3.1.

Κόμβος	Κανόνας
2	Αν $A_1 \leq V_1$, τότε κλάση 1
4	Αν $A_1 > V_1$ και $A_2 \leq V_2$, τότε κλάση 1
5	Αν $A_1 > V_1$ και $A_2 > V_2$, τότε κλάση 2

3.2.2 Επαγωγική Εξαγωγή Συμπερασμάτων

Στόχος της διαδικασίας επαγωγικής εξαγωγής συμπερασμάτων είναι η δημιουργία ενός όσο το δυνατόν πιο απλού δέντρου, που να έχει τη μέγιστη ποσότητα πληροφορίας για την ταξινόμηση των παραδειγμάτων μάθησης. Για παράδειγμα, ο στόχος της αρχικής έκδοσης της μεθόδου ID3 (*interactive dichotomizer*) ήταν να κατασκευάσει τα πιο απλά δέντρα με το ελάχιστο σφάλμα ταξινόμησης στο σύνολο μάθησης [3.2][3.3].

Σε πιο πρόσφατες προσεγγίσεις, η διαδικασία κατασκευής του δέντρου απόφασης στοχεύει στην κατασκευή ενός σχεδόν βέλτιστου δέντρου απόφασης, με την έννοια ότι αυτό επιτυγχάνει μία καλή ισορροπία μεταξύ πολυπλοκότητας και ακρίβειας, δηλαδή μεταξύ του συνολικού αριθμού των κόμβων και της ικανότητας ταξινόμησης. Συνεπώς, ο αλγόριθμος ανάπτυξης του δέντρου (*tree growing*) οδηγεί στην εξαγωγή της δομής του δέντρου και των διχοτομικών του ελέγχων.

Κατά τη διάρκεια της δημιουργίας του δέντρου οι κόμβοι ελέγχου αναπτύσσονται προοδευτικά, επιλέγοντας τον καταλληλότερο έλεγχο, ο οποίος διαχωρίζει τις καταστάσεις του κάθε κόμβου σε δύο υποσύνολα όσο το δυνατόν πιο καθαρά, δηλαδή με τη μικρότερη δυνατή ανάμιξη κλάσεων.

Η βασική ιδέα είναι η διαδοχική ανάπτυξη των κόμβων ελέγχου, με δομή από πάνω προς τα κάτω. Ο αναδρομικός αλγόριθμος ανάπτυξης του δέντρου ξεκινάει με ολόκληρο το σύνολο μάθησης στον κόμβο-ρίζα του δέντρου. Σε κάθε βήμα επιλέγεται ένας έλεγχος προκειμένου να διαχωρίσει το τρέχον σύνολο παραδειγμάτων σε δύο υποσύνολα, που αντιστοιχούν στους απογόνους του τρέχοντα κόμβου.

Αυτή είναι μία διαδικασία αναζήτησης μάλλον του τοπικού, παρά του ολικού βέλτιστου, η οποία οδηγεί σε ένα αποδοτικό αλγόριθμο, η υπολογιστική πολυπλοκότητα του οποίου είναι τις περισσότερες φορές της τάξεως $N \log N$, όπου N ο αριθμός των παραδειγμάτων μάθησης, και της τάξεως n του αριθμού των υποψήφιων ιδιοτήτων.

Το βέλτιστο κριτήριο διαχωρισμού (*optimal splitting criterion*) ορίζει τη διαδικασία αναζήτησης του καλύτερου υποψήφιου ελέγχου για το διαχωρισμό του τρέχοντα κόμβου [3.4]. Ουσιαστικά το κριτήριο αυτό αξιολογεί την ικανότητα ενός υποψήφιου ελέγχου να μειώσει τη “μη καθαρότητα” (*impurity*) της μεταβλητής εξόδου μέσα στο υποσύνολο των παραδειγμάτων μάθησης του κόμβου. Στα προβλήματα ταξινόμησης η “μη καθαρότητα” μετράται με την εντροπία της πληροφορίας, σύμφωνα με τον κλασικό ορισμό του Shannon.

Το κριτήριο διακοπής διαχωρισμού (*stop splitting criterion*) καθορίζει το εάν ένας κόμβος πρέπει να αναπτυχθεί περαιτέρω, ανάλογα με την πληροφορία που υπάρχει στο τρέχον υποσύνολο μάθησης [3.4]. Για παράδειγμα, αν το τοπικό υποσύνολο μάθησης είναι επαρκώς καθαρό τότε δεν υπάρχει λόγος για περαιτέρω διαχωρισμό. Ένας άλλος λιγότερο προφανής λόγος για το μη διαχωρισμό ενός κόμβου σχετίζεται με το πρόβλημα της υπερπροσαρμογής (*over-fitting*) το οποίο μπορεί να συμβεί όταν το σύνολο μάθησης του κόμβου γίνεται υπερβολικά μικρό για να επιτρέψει μία αξιόπιστη επιλογή ενός καλού ελέγχου.

3.2.3 Βέλτιστο Κριτήριο Διαχωρισμού

Το βέλτιστο κριτήριο διαχωρισμού αποτελείται από την αναζήτηση ενός τοπικά βέλτιστου ελέγχου που να μεγιστοποιεί μία συνάρτηση βαθμολογίας (*score function*). Αυτό συνεπάγεται την ανεύρεση για κάθε υποψήφια ιδιότητα του δικού της βέλτιστου ελέγχου και τον προσδιορισμό της ιδιότητας η οποία είναι η συνολικά βέλτιστη. Αυτό δημιουργεί την ανάγκη για τον ορισμό μίας συνάρτησης βαθμολογίας και για το σχεδιασμό των κατάλληλων

αλγορίθμων αναζήτησης της βέλτιστης τιμής κατωφλίου για κάθε τύπο υποψήφιων ιδιοτήτων [3.3].

Σε πρακτικές εφαρμογές οι ποιοτικές ιδιότητες είναι γενικά δυαδικοί δείκτες, οπότε οι ιδιότητες αυτές επιτρέπουν μόνο έναν απλό διαχωρισμό. Συνεπώς, στην περίπτωση αυτή υπολογίζεται μία φορά η συνάρτηση βαθμολογίας του μοναδικού διαχωρισμού. Όμως, στην περίπτωση των αριθμητικών ιδιοτήτων που λαμβάνουν πραγματικές τιμές απαιτείται μια διαδικασία υπολογισμού της βέλτιστης τιμής κατωφλίου.

Για μία αριθμητική ιδιότητα σε κάθε κόμβο ακολουθείται η διαδικασία υπολογισμού της βέλτιστης τιμής κατωφλίου προκειμένου να παραχθεί ο αντίστοιχος βέλτιστος διαχωρισμός [3.5].

Αυτή η διαδικασία αναζήτησης απαιτεί περίπου N υπολογισμούς της συνάρτησης βαθμολογίας καθώς και ταξινόμηση του υποσυνόλου μάθησης. Αν και η διαδικασία αυτή με μία πρώτη ματιά πιθανόν να φαίνεται χρονοβόρα, γίνεται με τρόπο αποδοτικό με το σημερινό διαθέσιμο υπολογιστικό υλικό.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία αναζήτησης της βέλτιστης τιμής κατωφλίου εφαρμόζεται επαναληπτικά, για κάθε αριθμητική ιδιότητα και για κάθε κόμβο του δέντρου. Η διαδικασία αυτή προσδιορίζει με συστηματικό τρόπο τη βέλτιστη τιμή κατωφλίου, οποιοσδήποτε και να είναι ο ορισμός της συνάρτησης βαθμολογίας.

Επομένως, εκτός από τη διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης τιμής κατωφλίου, απαιτείται και ο προσδιορισμός μίας συνάρτησης βαθμολογίας για να χρησιμοποιηθεί για την επιλογή του καλύτερου ελέγχου. Η συνάρτηση βαθμολογίας προκύπτει από τα μέτρα καθαρότητας (ή αβεβαιότητας) [3.6].

Ένας εύκολος τρόπος να μετρηθεί η μη καθαρότητα είναι να χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση εντροπίας, γνωστή από τη θερμοδυναμική και από τη θεωρία της πληροφορίας. Ανάμεσα στις άλλες ελκυστικές ιδιότητες της αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι η συνάρτηση εντροπίας είναι το μόνο μέτρο αβεβαιότητας το οποίο είναι προσθετικό [3.7]: η εντροπία ενός συστήματος που αποτελείται από ανεξάρτητα υποσυστήματα είναι ίση με το άθροισμα των εντροπιών των υποσυστημάτων. Παρόμοια, η αβεβαιότητα του αποτελέσματος ανεξάρτητων γεγονότων είναι ίση με το άθροισμα των αβεβαιοτήτων κάθε γεγονότος ξεχωριστά. Μία άλλη ενδιαφέρουσα ιδιότητα της εντροπίας είναι η πιθανοτική της ερμηνεία, η οποία προτείνει ότι η μείωση της εντροπίας ισοδυναμεί με αύξηση των μεταγενέστερων πιθανοτήτων ([3.8]-[3.10]).

Μια απλή και πρακτική λύση είναι η χρησιμοποίηση της συνολικής ποσότητας της πληροφορίας που παρέχεται από ένα υποψήφιο διαχωρισμό σε ένα κόμβο, ως το κριτήριο για την επιλογή του πλέον κατάλληλου διαχωρισμού. Συνεπώς, η πληροφορία που παρέχεται από έναν έλεγχο T σε ένα κόμβο που αποτελείται από N παραδείγματα μάθησης, ορίζεται ως:

$$I_C^T(LS(N)) = H_C(LS(N)) - H_{C|T}(LS(N)) \quad (3.1)$$

Η $H_C(LS(N))$ συμβολίζει την προγενέστερη εντροπία ταξινόμησης που εκτιμάται στο υποσύνολο μάθησης του κόμβου, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$H_C(LS(N)) = - \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{n_{..}} \log_2 \frac{n_i}{n_{..}} \quad (3.2)$$

όπου n_i συμβολίζει τον αριθμό των παραδειγμάτων μάθησης της κλάσης c_i στον τρέχοντα κόμβο και $n_{..}$ είναι ο συνολικός αριθμός των παραδειγμάτων μάθησης.

Από την άλλη μεριά, η $H_{C|T}(LS(N))$ συμβολίζει τη μεταγενέστερη εντροπία ταξινόμησης που εκτιμάται στο υποσύνολο μάθησης του κόμβου, με δεδομένη την πληροφορία που παρέχεται από τον έλεγχο. Η μεταγενέστερη εντροπία ταξινόμησης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$H_{C|T}(LS(N)) = - \sum_{j=1}^p \frac{n_j}{n_{..}} \sum_{i=1}^m \frac{n_{ij}}{n_j} \log_2 \frac{n_{ij}}{n_j} \quad (3.3)$$

όπου n_{ij} συμβολίζει τον αριθμό των παραδειγμάτων μάθησης της κλάσης c_i που αντιστοιχεί στο αποτέλεσμα t_j , και $n_{.j}$ είναι ο συνολικός αριθμός των παραδειγμάτων μάθησης που αντιστοιχούν στο αποτέλεσμα t_j .

Στην πράξη, αντί της απευθείας χρησιμοποίησης της ποσότητας πληροφορίας, προτιμάται η κανονικοποίησή της, προκειμένου να προκύψουν τιμές που να ανήκουν στο διάστημα $[0...1]$, ανεξάρτητα από την προγενέστερη εντροπία $H_C(LS(N))$. Οι κανονικοποιημένες τιμές μπορούν να ερμηνευθούν σαν ένα “απόλυτο” μέτρο της συσχέτισης μεταξύ του αποτελέσματος του ελέγχου και της ταξινόμησης, όπου η τιμή 1 αντιστοιχεί σε μία πλήρη συσχέτιση και η τιμή 0 σε στατιστική ανεξαρτησία. Συγκεκριμένα, ποσότητες πληροφορίας που αποκτώνται σε διαφορετικούς κόμβους ενός δέντρου, ή με διάφορες ταξινομήσεις, μπορούν να συγκριθούν χάρη στην ιδιότητα της κανονικοποίησης.

Τελικά επιλέγεται η κανονικοποίηση της I_C^T με τη μέση τιμή των H_C και H_T [3.11]. Επομένως, η συνάρτηση βαθμολογίας ορίζεται ως:

$$SCORE(T, LS(N)) = C_C^T(LS(N)) = \frac{2 \cdot I_C^T(LS(N))}{H_C(LS(N)) + H_T(LS(N))} \quad (3.4)$$

όπου H_T είναι η αβεβαιότητα ή η εντροπία που σχετίζεται με το αποτέλεσμα του ελέγχου και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$H_T(LS(N)) = - \sum_{j=1}^p \frac{n_{.j}}{n_{..}} \log_2 \frac{n_{.j}}{n_{..}} \quad (3.5)$$

3.2.4 Κριτήριο Διακοπής Διαχωρισμού

Ο ορισμός ενός κατάλληλου κριτηρίου διακοπής διαχωρισμού είναι πολύ σημαντικός διότι το κριτήριο αυτό είναι υπεύθυνο για τη διατήρηση μίας ισορροπίας ανάμεσα στην αξιοπιστία (ικανότητα ταξινόμησης άγνωστων παραδειγμάτων) και στην πολυπλοκότητα (αριθμός κόμβων) του δέντρου απόφασης. Προκειμένου τα δέντρα να έχουν καλή αξιοπιστία πρέπει να αναπτυχθούν με ένα μεγάλο αριθμό κόμβων. Όμως η στρατηγική αυτή οδηγεί στη δημιουργία πολύπλοκων δέντρων, όπου οι περισσότεροι κόμβοι αποτελούνται από τυχαίους διαχωρισμούς οι οποίοι είναι πολύ δύσκολο να ερμηνευθούν. Επομένως είναι επιτακτική η ανάγκη για μία διαδικασία ικανή να διακρίνει τους τυχαίους διαχωρισμούς από τους διαχωρισμούς που συνδέονται στενά με την ταξινόμηση. Για το λόγο αυτό έχει προταθεί η μέθοδος του ελέγχου υπόθεσης (*hypothesis testing*), με σκοπό να αναγνωρίσει τις περιπτώσεις όπου η μείωση της εντροπίας λόγω ενός ελέγχου είναι πράγματι σημαντική [3.12]. Η διαδικασία του ελέγχου υπόθεσης έχει επίσης προταθεί για το χειρισμό των ιδιοτήτων με θόρυβο και των ταξινομήσεων με θόρυβο [3.13].

Η διαδικασία διακοπής διαχωρισμού αποφασίζει αν ένας κόμβος πρέπει να διαχωριστεί περαιτέρω ή αν είναι τερματικός κόμβος. Αν τα παραδείγματα του υποσυνόλου μάθησης ανήκουν σχεδόν ολοκληρωτικά σε μία από τις m κλάσεις, τότε ο κόμβος είναι φύλλο τερματικού τύπου (*LEAF*). Ο έλεγχος αν τα παραδείγματα ανήκουν σχεδόν αποκλειστικά σε μία κλάση γίνεται με τη βοήθεια της προγενέστερης εντροπίας ταξινόμησης $H_C(LS(N))$ καθώς και μίας προκαθορισμένης τιμής κατωφλίου, έστω $H_{\min}$, για την εντροπία [3.3]. Συνεπώς:

$$\text{αν } H_C(LS(N)) < H_{\min}, \text{ τότε } LEAF \quad (3.6)$$

Αν η παραπάνω σχέση δεν επαληθεύεται, τότε εφαρμόζεται ο έλεγχος υπόθεσης για να διαπιστωθεί αν ο κόμβος πρέπει να διαχωριστεί ή αν είναι αδιέξοδος. Προκειμένου να υπάρχει η μεγαλύτερη δυνατή συνοχή με τη στρατηγική που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό του βέλτιστου κριτηρίου διαχωρισμού, χρησιμοποιείται ως κριτήριο διακοπής διαχωρισμού το αποκαλούμενο στατιστικό μέτρο G [3.11]. Πράγματι, μπορεί να αποδειχθεί ότι κάτω από την υπόθεση της στατιστικής ανεξαρτησίας του ελέγχου και της επιθυμητής ταξινόμησης, η κατανομή του δείγματος της ακόλουθης ποσότητας:

$$G^2 = \hat{A} = 2 \cdot n \cdot \ln(2 \cdot I_C^T(LS(N))) \quad (3.7)$$

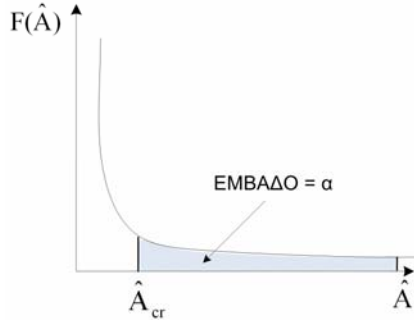
η οποία είναι ευθέως ανάλογη με τη συνολική πληροφορία που παρέχεται από τον έλεγχο, ακολουθεί κατανομή X^2 με $(m-1) \cdot (p-1)$ βαθμούς ελευθερίας, όπου το m συμβολίζει τον αριθμό των κλάσεων και το p τον αριθμό των απογόνων κόμβων κάθε κόμβου ελέγχου. Συνεπώς, αν εκ των προτέρων καθοριστεί μία τιμή για το ρίσκο, έστω a , της μη ανίχνευσης της υπόθεσης ανεξαρτησίας, υπολογίζεται, με χρήση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της $\hat{A}$, η τιμή κατωφλίου $\hat{A}_{cr}$ έτσι ώστε $\text{Prob}(\hat{A} > \hat{A}_{cr}) = a$. Τελικά, αν $\hat{A} > \hat{A}_{cr}$ απορρίπτεται η υπόθεση της στατιστικής ανεξαρτησίας και διαχωρίζεται ο κόμβος, ενώ διαφορετικά ($\hat{A} \leq \hat{A}_{cr}$) σταματάει ο διαχωρισμός και ο κόμβος είναι αδιέξοδος (*DEADEND*). Επομένως, το κριτήριο διακοπής διαχωρισμού διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{αν } 2 \cdot n \cdot \ln(2 \cdot I_C^T(LS(N))) \leq \hat{A}_{cr}, \text{ τότε } \text{DEADEND} \quad (3.8)$$

Θεωρώντας $m=2$ κλάσεις και $p=2$ απογόνους κόμβους, τότε η κατανομή X^2 έχει ένα βαθμό ελευθερίας. Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται η X^2 συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της $\hat{A}$ με ένα βαθμό ελευθερίας και υπολογίζεται γραφικά η τιμή κατωφλίου $\hat{A}_{cr}$ για μία δοσμένη τιμή ρίσκου a .

Εάν επιλεγεί μία τιμή ρίσκου $a=1.0$ θα έχει σαν αποτέλεσμα τη συστηματική απόρριψη της υπόθεσης ανεξαρτησίας, και τη θεώρηση ως σημαντικής ακόμα και της πιο μικρής αύξησης της πληροφορίας. Αυτό θα οδηγήσει στην πλήρη ανάπτυξη των δέντρων, διαχωρίζοντας πλήρως τα παραδείγματα μάθησης των διαφορετικών κλάσεων. Από την άλλη μεριά, η χρήση μίας υπερβολικά μικρής τιμής για το a θα οδηγήσει στην ανάπτυξη μόνο των κόμβων που δίνουν μία πολύ μεγάλη αύξηση στη πληροφορία, και έτσι θα δημιουργήσει υπερβολικά απλά δέντρα με πιθανόν μεγάλο βαθμό αστοχίας σε νέα παραδείγματα.

Η τιμή της παραμέτρου a επιδρά δραστικά στην ανάπτυξη του δέντρου. Απαιτούνται αρκετές δοκιμές για τον προσδιορισμό της βέλτιστης τιμής του a , η οποία οδηγεί σε κατασκευή δέντρων με μικρή πολυπλοκότητα και μεγάλη ακρίβεια.



Σχήμα 3.2 X^2 συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της $\hat{A}$ με ένα βαθμό ελευθερίας.

Συνοψίζοντας, το κριτήριο διακοπής διαχωρισμού αποφασίζει για το διαχωρισμό ή όχι ενός κόμβου με την παρακάτω λογική:

- Αν τα παραδείγματα του υποσυνόλου μάθησης ενός κόμβου ανήκουν σχεδόν αποκλειστικά σε μία κλάση, τότε ο κόμβος είναι φύλλο (*LEAF*) (3.6).
- Αλλιώς,
 - Αν ο κόμβος δε μπορεί να διαχωριστεί με ένα στατιστικά σημαντικό τρόπο ($\hat{A} \leq \hat{A}_{cr}$), τότε ο κόμβος είναι αδιέξοδος (*DEADEND*) (3.8).
 - Αν ισχύει ότι $\hat{A} > \hat{A}_{cr}$, τότε ο κόμβος διαχωρίζεται σε p απογόνους.

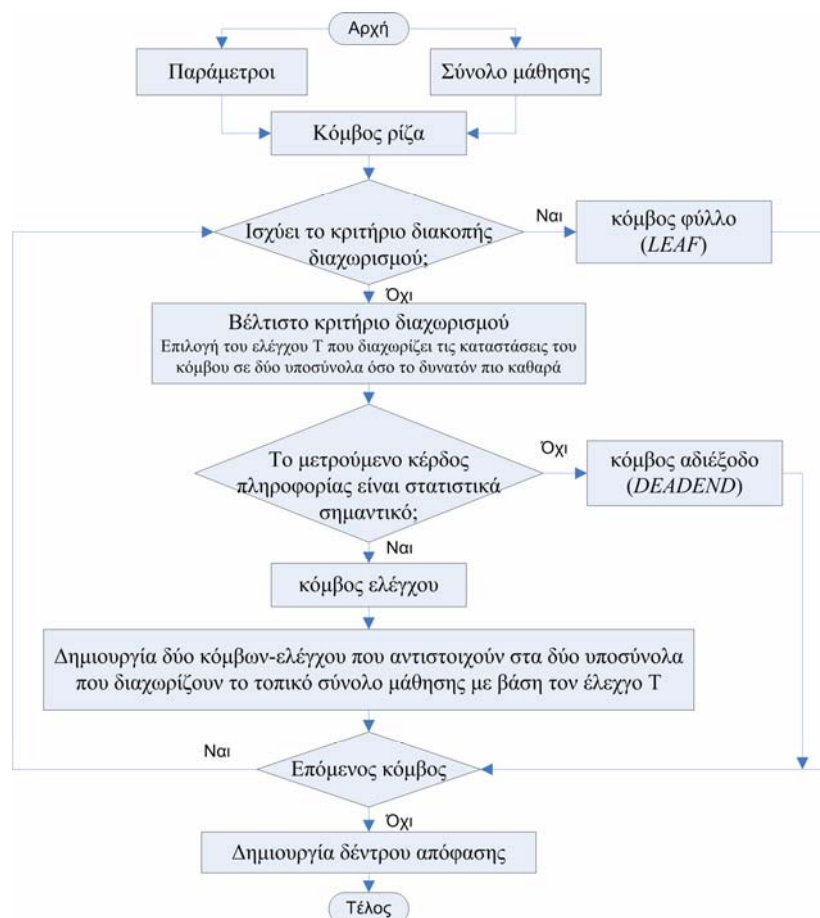
3.2.5 Αλγόριθμος Κατασκευής των Δέντρων Απόφασης

Οι παράμετροι οι οποίες εμπλέκονται στην κατασκευή των δέντρων απόφασης είναι [3.3]:

- Το επίπεδο ρίσκου, α , και
- η ελάχιστη τιμή της εντροπίας, $H_{\min}$, κάτω από την οποία ένας κόμβος είναι *LEAF*.

Οι τιμές των συγκεκριμένων παραμέτρων ορίζονται πριν από την έναρξη της διαδικασίας κατασκευής του δέντρου απόφασης. Η επιλογή του επιπέδου ρίσκου επηρεάζει πολύ περισσότερο τη μορφή του δέντρου, από ότι η ελάχιστη τιμή της εντροπίας.

Στη συνέχεια θα θεωρηθεί η περίπτωση δυαδικών δέντρων απόφασης που κάνουν ταξινόμηση σε δύο κλάσεις. Ο όρος δυαδικό δέντρο σημαίνει ότι κάθε κόμβος ελέγχου έχει δύο απογόνους, όπου τα παραδείγματα μάθησης του ενός κόμβου επαληθεύουν τον έλεγχο, ενώ του άλλου τον διαψεύδουν.



Σχήμα 3.3 Λογικό διάγραμμα κατασκευής δέντρου απόφασης.

Τα βήματα που ακολουθούνται για την κατασκευή του δέντρου απόφασης είναι τα ακόλουθα (Σχήμα 3.3):

1. Έναρξη της διαδικασίας με τον κόμβο ρίζα ο οποίος περιλαμβάνει ολόκληρο το σύνολο μάθησης.
2. Εξέταση της περαιτέρω ικανότητας διαχωρισμού του κόμβου με εφαρμογή του κριτηρίου διακοπής διαχωρισμού:
 - Αν το υποσύνολο μάθησης του κόμβου είναι επαρκώς καθαρό, τότε *LEAF*.
 - Αν δεν είναι, τότε εκτέλεση του βήματος 3.

3. Επιλογή του καλύτερου ελέγχου με εφαρμογή του βέλτιστου κριτηρίου διαχωρισμού, δηλαδή εύρεση του ελέγχου T ο οποίος διαιρεί τα παραδείγματα μάθησης στα δύο πιο καθαρά υποσύνολα.
4. Στατιστικός έλεγχος για το βέλτιστο έλεγχο.
 - Αν το κέρδος πληροφορίας είναι στατιστικά σημαντικό, τότε κόμβος ελέγχου. Εκτέλεση του βήματος 5.
 - Αν δεν είναι στατιστικά σημαντικό, τότε *DEADEND*.
5. Διαχωρισμός του κόμβου, δηλαδή δημιουργία δύο απογόνων που αντιστοιχούν στα δύο υποσύνολα μάθησης του βέλτιστου ελέγχου διαχωρισμού.
6. Αναδρομική εφαρμογή των βημάτων 2-5 στους απογόνους κόμβους.

3.3 ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

3.3.1 Εισαγωγή

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα ή απλά νευρωνικά δίκτυα αποτελούν μια προσπάθεια μαθηματικής μοντελοποίησης της λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου. Έχουν την ικανότητα να εκτελούν μαζικούς υπολογισμούς με παράλληλο τρόπο. Η αρχιτεκτονική τους βασίζεται στην αρχιτεκτονική των βιολογικών νευρωνικών δικτύων. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι μια συλλογή από νευρώνες που συνδέονται μεταξύ τους. Κάθε νευρώνας έχει πολλές εισόδους αλλά μόνο μία έξοδο, η οποία με τη σειρά της μπορεί να αποτελέσει είσοδο για άλλους νευρώνες. Οι συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων διαφέρουν ως προς τη σημαντικότητά τους, η οποία και προσδιορίζεται από το συντελεστή βάρους, κάτι το οποίο τους επιτρέπει να προσαρμόζονται μέσω μιας διαδικασίας εκμάθησης. Η επεξεργασία κάθε νευρώνα καθορίζεται από τη συνάρτηση μεταφοράς ή ενεργοποίησης ή καταωφλίου, η οποία καθορίζει την κάθε έξοδο σε σχέση με τις εισόδους και τους συντελεστές βάρους. Συμπερασματικά, τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να ερμηνευθούν ως προσαρμοσμένες μηχανές που μπορούν να αποθηκεύουν γνώση μέσω της διαδικασίας εκμάθησης.

Η έρευνα πάνω στο πεδίο αυτό έχει μια ιστορία αρκετών δεκαετιών, αλλά, μετά από μία μείωση του ενδιαφέροντος στη δεκαετία του 1970, μία μαζική ανάπτυξη ξεκίνησε στις αρχές του 1980. Το κυρίαρχο τους πλεονέκτημα σε σχέση με τα στατιστικά μοντέλα έχει να κάνει με το γεγονός ότι μοντελοποιούν ένα πολυδιάστατο πρόβλημα χωρίς να απαιτούν περίπλοκες υποθέσεις ανάμεσα στις μεταβλητές εισόδου. Υπάρχουν πολλών τύπων μοντέλα νευρωνικών δικτύων. Το κοινό χαρακτηριστικό σε αυτά είναι η σχέση με τη γενικότερη ιδέα των βιολογικών συστημάτων. Δηλαδή, είναι ένα σύστημα επεξεργασίας δεδομένων που προσομοιώνουν τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου.

Μερικές από τις σημαντικότερες ιδιότητες των νευρωνικών δικτύων πέρα από την υπολογιστική τους ισχύ και την ικανότητά τους να γενικεύουν μαθαίνοντας, είναι οι ακόλουθες [3.14]:

- Η μη γραμμικότητα (*nonlinearity*), ιδιότητα που οφείλεται στη διασύνδεση μη γραμμικών νευρώνων και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν η είσοδος του δικτύου είναι μη γραμμικής φύσεως.
- Η αντιστοίχιση εισόδου-εξόδου (*input-output mapping*), όπως στην περίπτωση της ταξινόμησης προτύπων (*pattern classification*), όπου στο δίκτυο η είσοδος που εκφράζει ένα φυσικό αντικείμενο ή γεγονός, αποδίδεται σε μια συγκεκριμένη κλάση αντικειμένων ή γεγονότων.
- Η προσαρμοστικότητα (*adaptivity*) δηλαδή η ιδιότητα του δικτύου να αναπροσαρμόζει τα βάρη των συνδέσεων προκειμένου να ανταποκριθεί στις μεταβολές στο περιβάλλον του.
- Η ικανότητα τεκμηρίωσης της απόκρισης (*evidential response*) στα πλαίσια της κατηγοριοποίησης προτύπων, η οποία έγκειται στη δυνατότητα σχεδιασμού του νευρωνικού δικτύου ώστε να παρέχει πληροφόρηση για την εμπιστοσύνη στη ληφθείσα απόφαση.

- Η γνώση αναπαρίσταται από ένα νευρωνικό δίκτυο μέσω της δομής και του τρόπου ενεργοποίησής του. Δεδομένου λοιπόν ότι ο κάθε νευρώνας επηρεάζεται από τη λειτουργία ολόκληρου του δικτύου, τα νευρωνικά δίκτυα έχουν μια εγγενή ικανότητα διαχείρισης της συναφούς πληροφορίας (*contextual information*).
- Η ανοχή σε σφάλμα (*fault tolerance*) αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα των νευρωνικών δικτύων που οφείλεται στον τρόπο που κατανέμεται η πληροφορία μέσα στο δίκτυο. Σαν αποτέλεσμα του γεγονότος αυτού αποφεύγεται η κατάρρευση του συστήματος ενώ η απόδοση του δεν μειώνεται σημαντικά.

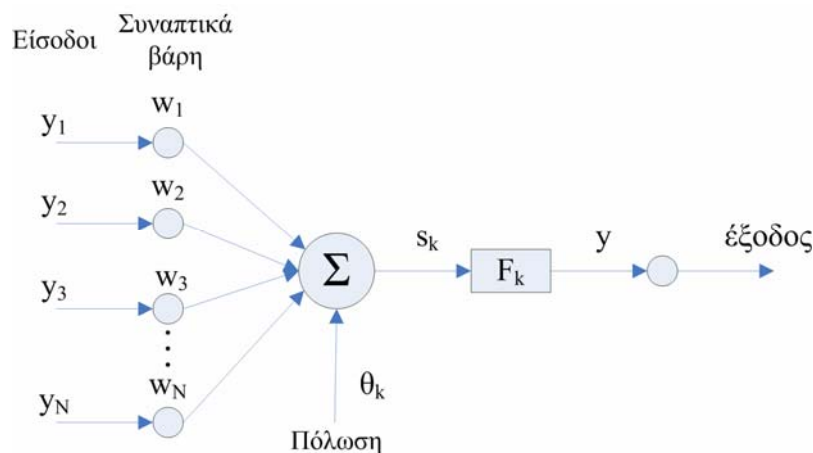
3.3.2 Βασικές Συνιστώσες Νευρωνικών Δικτύων

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από ένα σύνολο απλών μονάδων επεξεργασίας, που επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω των σημάτων που στέλνονται διαμέσου ενός πλήθους σταθμισμένων συνδέσεων [3.15].

Ένα νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία [3.16]:

- Ένα σύνολο μονάδων επεξεργασίας που ονομάζονται *νευρώνες*.
- Μια *κατάσταση ενεργοποίησης* y_k για κάθε νευρώνα, που αποτελεί και την έξοδο του νευρώνα.
- Συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων, κάθε μια από τις οποίες χαρακτηρίζεται από ένα *συναπτικό βάρος* ή *σύναψη* w_{jk} , που προσδιορίζει την επίδραση που έχει το σήμα του νευρώνα j στο νευρώνα k .
- Έναν *κανόνα διάδοσης* (*propagation rule*), που καθορίζει την ενεργό είσοδο s_k του νευρώνα k .
- Μια *συνάρτηση ενεργοποίησης* F_k , που καθορίζει την ενημέρωση (update) του νευρώνα k , δηλαδή το νέο επίπεδο ενεργοποίησής του, βάσει της ενεργού εισόδου $s_k(t)$ και της τρέχουσας ενεργοποίησής $y_k(t)$.
- Μια *εξωτερική είσοδο* θ_k για κάθε νευρώνα, που καλείται *κατώφλι* ή *πόλωση* (bias) και μπορεί να θεωρηθεί σαν το συναπτικό βάρος μιας μονάδας με τιμή ενεργοποίησης ίση με 1.
- Έναν *κανόνα εκμάθησης*, μέσω του οποίου συλλέγονται οι πληροφορίες.
- Ένα *περιβάλλον* μέσα στο οποίο πρέπει να λειτουργήσει το σύστημα, παρέχοντας σήματα εισόδου και, αν χρειαστεί, σήματα λάθους.

Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζονται οι βασικές συνιστώσες ενός νευρωνικού δικτύου.



Σχήμα 3.4 Βασικές συνιστώσες ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

3.3.3 Νευρώνες

Οι νευρώνες ενός νευρωνικού δικτύου δέχονται κάποια είσοδο (*input*) από γειτονικές ή εξωτερικές πηγές, την οποία χρησιμοποιούν για να υπολογίσουν το σήμα εξόδου (*output*), το οποίο διαδίδεται στους άλλους νευρώνες, καθώς και να ρυθμίζουν τα συναπτικά βάρη.

Οι νευρώνες που περιέχονται σε ένα νευρωνικό δίκτυο διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- νευρώνες *εισόδου*, που δέχονται δεδομένα από πηγές που βρίσκονται εκτός του νευρωνικού δικτύου.
- νευρώνες *εξόδου*, που στέλνουν δεδομένα έξω από το νευρωνικό δίκτυο.
- *Κρυφοί* νευρώνες, που στέλνουν σήματα εισόδου και εξόδου εντός του νευρωνικού δικτύου.

Καθώς το νευρωνικό δίκτυο λειτουργεί, οι μονάδες μπορούν να ενημερώνονται σύγχρονα (ταυτόχρονη ενημέρωση της ενεργοποίησης των μονάδων) ή ασύγχρονα (υπάρχει κάποια πιθανότητα οι μονάδες να ενημερώσουν την ενεργοποίησή τους τη χρονική στιγμή t , αλλά συνήθως μόνο μία μονάδα μπορεί να το κάνει αυτό κάποια δεδομένη χρονική στιγμή) [3.15].

3.3.4 Υπολογισμός Εισόδου και Εξόδου Νευρώνα

Συνήθως θεωρείται ότι κάθε νευρώνας συνεισφέρει αθροιστικά στην είσοδο του νευρώνα με τον οποίο συνδέεται. Συνεπώς, η ολική είσοδος στο νευρώνα k ισούται με το σταθμισμένο άθροισμα των εξόδων των νευρώνων με τις οποίες συνδέεται, συν τον όρο πόλωσης θ_k (*bias*):

$$s_k(t) = \sum_j w_{jk}(t) \cdot y_j(t) + \theta_k(t) \quad (3.9)$$

Για θετικές τιμές w_{jk} , η συνεισφορά θεωρείται διεγερτική (*excitation*) ενώ για αρνητικές τιμές w_{jk} , η συνεισφορά θεωρείται ανασταλτική (*inhibition*). Οι μονάδες που ακολουθούν τον κανόνα διάδοσης της εξίσωσης (3.9) καλούνται σίγμα μονάδες.

Η επίδραση της ολικής εισόδου στην ενεργοποίηση του νευρώνα καθορίζεται από τη συνάρτηση ενεργοποίησης F_k η οποία, λαμβάνοντας υπόψη την ενεργό είσοδο $s_k(t)$ και την τρέχουσα ενεργοποίηση $y_k(t)$, παράγει μια νέα τιμή ενεργοποίησης για τη μονάδα k .

$$y_k(t+1) = F_k(y_k(t), s_k(t)) \quad (3.10)$$

Σε αρκετές περιπτώσεις, η συνάρτηση ενεργοποίησης F_k είναι μη φθίνουσα συνάρτηση της ολικής εισόδου στο νευρώνα.

$$y_k(t+1) = F_k(s_k(t)) = F_k\left(\sum_j w_{jk}(t) \cdot y_j(t) + \theta_k(t)\right) \quad (3.11)$$

Γενικά, ως συνάρτηση ενεργοποίησης λαμβάνεται κάποια συνάρτηση κατωφλίου (*threshold function*), όπως η συνάρτηση κατωφλίου (signum συνάρτηση ή *sgn*), ή γραμμική ή τμηματικά γραμμική συνάρτηση ή μια συνάρτηση κατωφλίου ομαλής μετάβασης (Σχήμα 3.5). Για την τελευταία συνήθως χρησιμοποιείται σιγμοειδής συνάρτηση της μορφής:

$$y_k = F_k = \frac{1}{1 + e^{-s_k}} \quad (3.12)$$

Από τις συναρτήσεις αυτές, η γραμμική (τμηματικά ή ολικά) και η σιγμοειδής δίνουν τιμές εξόδου που κυμαίνονται από 0 έως 1, ενώ η συνάρτηση *sgn* δίνει τιμές εξόδου ίσες με -1 ή $+1$. Η σιγμοειδής συνάρτηση είναι μια από τις σημαντικότερες συναρτήσεις των νευρωνικών δικτύων, διότι παρέχει μη γραμμικότητα στο νευρώνα, κάτι που είναι απαραίτητο στη μοντελοποίηση μη γραμμικών φαινομένων. Σε κάποιες περιπτώσεις, η έξοδος ενός νευρώνα μπορεί να είναι στοχαστική συνάρτηση της ολικής εισόδου της μονάδας [3.15].



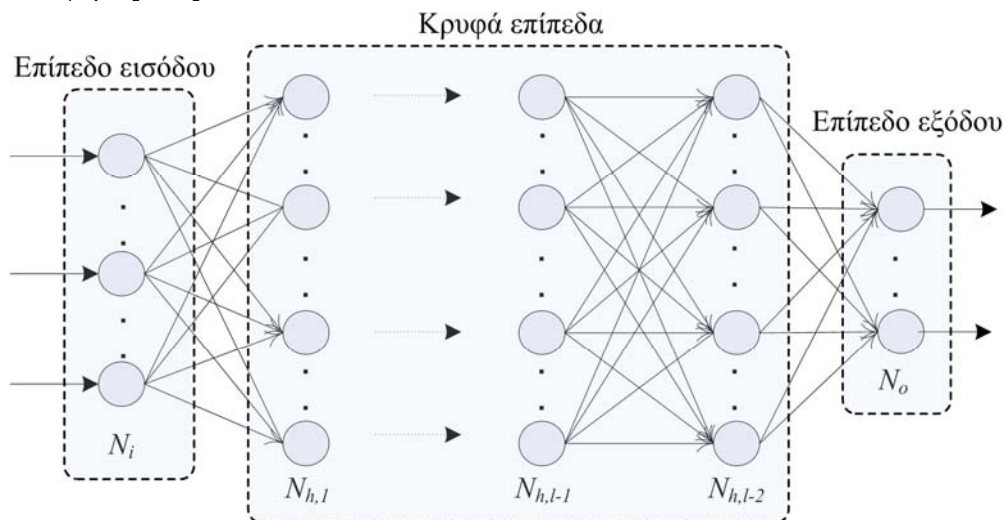
Σχήμα 3.5 Είδη συναρτήσεων ενεργοποίησης

3.3.5 Κατηγορίες Νευρώνων Βάσει της Διαμόρφωσής τους

Τα νευρωνικά δίκτυα, ανάλογα με τη μορφή των συνδέσεων που διαθέτουν, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες [3.15]:

1. Δίκτυα εμπρόσθιας τροφοδότησης (*feedforward networks*), στα οποία η ροή των δεδομένων από την είσοδο στην έξοδο γίνεται αυστηρά και μόνο προς τα εμπρός, δηλαδή τα σήματα κατευθύνονται από την είσοδο στην έξοδο. Η επεξεργασία των δεδομένων μπορεί να γίνεται σε περισσότερα από ένα επίπεδα (*layers*), ωστόσο δεν υπάρχουν συνδέσεις που να εκτείνονται από την έξοδο κάποιου νευρώνα προς την είσοδο κάποιου άλλου νευρώνα του ίδιου επιπέδου ή προηγούμενου. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα νευρωνικά δίκτυα τύπου *Perceptron* και *Adaline*.
2. Δίκτυα με ανάδραση (*recurrent networks*), τα οποία περιέχουν ανάδρομες συνδέσεις, δηλαδή οι έξοδοι κάποιων νευρώνων γίνονται είσοδοι σε νευρώνες του ίδιου ή προηγούμενου επιπέδου.

Γνωστά τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα απλής ανατροφοδότησης, όπως για παράδειγμα το μοντέλο *Perceptron*, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα εμπρόσθιας τροφοδότησης πολλών επιπέδων, καθώς επίσης και τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα με ανατροφοδότηση, όπως για παράδειγμα το μοντέλο *Hopfield*, τα κυψελωτά νευρωνικά δίκτυα και τα δίκτυα *Kohonen*. Το Σχήμα 3.6 παρουσιάζει ένα πλήρως συνδεδεμένο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο απλής τροφοδότησης. Για περισσότερες πληροφορίες και λεπτομέρειες που αφορούν τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, ο αναγνώστης παραπέμπεται στην αναφορά [3.14].



Σχήμα 3.6 Παράδειγμα ενός πλήρως συνδεδεμένου τεχνητού νευρωνικού δικτύου απλής τροφοδότησης.

3.3.6 Εκπαίδευση Νευρωνικών Δικτύων

Τα νευρωνικά δίκτυα σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε όταν τους δίνεται κάποια είσοδος, αυτά να παράγουν την επιθυμητή έξοδο. Αυτό επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας τη

δύναμη των συνδέσεων μεταξύ των νευρώνων, δηλαδή τα συναπτικά βάρη w_{jk} , πράγμα που μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Ένας τρόπος είναι να οριστούν σαφώς τα συναπτικά βάρη, γνωρίζοντας εκ των προτέρων τις τιμές τους. Ένας άλλος τρόπος είναι να εκπαιδευτεί το νευρωνικό δίκτυο, παρέχοντάς του πρότυπα και αφήνοντάς το να αλλάξει τα συναπτικά βάρη βάσει ενός κανόνα εκμάθησης.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες εκπαίδευσης [3.15]:

- Η επιβλεπόμενη ή συσχετιζόμενη μάθηση (*supervised or associative learning*), κατά την οποία το δίκτυο εκπαιδεύεται τροφοδοτώντας το με πρότυπα ζεύγη εισόδων-εξόδων, τα οποία μπορεί να παρέχονται είτε από κάποιον εξωτερικό εκπαιδευτή (το χρήστη) είτε από το ίδιο το σύστημα που περιλαμβάνει το δίκτυο (αυτο-επιβλεπόμενο).
- Η μη επιβλεπόμενη μάθηση (*unsupervised learning*) ή αυτο-οργάνωση (*self-organization*), κατά την οποία οι νευρώνες εξόδου εκπαιδεύονται να αντιδρούν σε ομάδες προτύπων που παρουσιάζονται στην είσοδο. Σε αντίθεση με την επιβλεπόμενη μάθηση, δε δίνεται στο δίκτυο κάποια επιθυμητή έξοδος, οπότε το σύστημα πρέπει να παράγει δική του αναπαράσταση των ερεθισμάτων εισόδου. Η μη επιβλεπόμενη μάθηση εφαρμόζεται σε δίκτυα με ανάδραση.

3.3.7 Λειτουργία Νευρωνικών Δικτύων

Ένα νευρωνικό δίκτυο έχει δύο βασικές λειτουργίες: την εκπαίδευση και την πρόβλεψη. Το πρώτο στάδιο είναι η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου. Στο στάδιο αυτό δημιουργείται ένα σύνολο μάθησης (*training set*), δηλαδή ένα σύνολο από διανύσματα εισόδων και επιθυμητών εξόδων-αποτελεσμάτων. Τα διανύσματα αυτά ονομάζονται πρότυπα εκπαίδευσης. Χρησιμοποιώντας το σύνολο μάθησης και κατάλληλο αλγόριθμο, το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύεται, δηλαδή υπολογίζει τα βάρη του (και τις πολώσεις του, εφόσον υπάρχουν). Τελικός σκοπός της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου είναι η ελαχιστοποίηση του σφάλματος πρόβλεψης στο σύνολο μάθησης.

$$e = |\hat{y} - y| \quad (3.13)$$

Ένας απλοϊκός τρόπος υπολογισμού του σφάλματος φαίνεται στην εξίσωση (3.13), όπου, e το σφάλμα εξόδου του νευρωνικού. Με $\hat{y}$ συμβολίζεται η προβλεπόμενη τιμή-έξοδος από το νευρωνικό δίκτυο και y είναι η πραγματική-επιθυμητή τιμή, σύμφωνα με το σύνολο μάθησης.

Μετά την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου ακολουθεί το στάδιο της πρόβλεψης. Στο στάδιο αυτό δημιουργείται ένα σύνολο ελέγχου (*test set*), δηλαδή ένα σύνολο από πρότυπα ελέγχου. Στο στάδιο αυτό δίνονται μόνο τα διανύσματα εισόδου στο νευρωνικό δίκτυο και αυτό υπολογίζει τα προβλεπόμενα διανύσματα εξόδου. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται, χρησιμοποιώντας τις τιμές των βαρών (και των πολώσεων, εφόσον υπάρχουν) που υπολογίστηκαν κατά το στάδιο της εκπαίδευσης. Το σφάλμα πρόβλεψης στο σύνολο ελέγχου προκύπτει από το σφάλμα των προβλεπόμενων εξόδων του νευρωνικού δικτύου ως προς τις επιθυμητές εξόδους για κάθε ένα από τα πρότυπα ελέγχου.

Για τη βέλτιστη λειτουργία του νευρωνικού δικτύου, θα πρέπει κατά τα δύο στάδια της λειτουργίας του να ληφθούν υπόψη ορισμένοι βασικοί παράγοντες που το χαρακτηρίζουν.

- Η δομή και ο καθορισμός της αρχιτεκτονικής του νευρωνικού δικτύου. Για παράδειγμα, εξετάζεται ο αριθμός των κρυφών στρωμάτων, ο αριθμός των νευρώνων ανά στρώμα, η συνάρτηση ενεργοποίησης, ο αλγόριθμος εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου, ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου εκπαίδευσης.
- Ο καθορισμός των συνόλων εκπαίδευσης και ελέγχου του νευρωνικού δικτύου, για παράδειγμα ο βέλτιστος αριθμός των προτύπων εκπαίδευσης.
- Η ικανότητα γενίκευσης του νευρωνικού δικτύου, η οποία διασφαλίζεται όταν το νευρωνικό δίκτυο παρουσιάζει μικρό σφάλμα πρόβλεψης τόσο στο σύνολο εκπαίδευσης όσο και στο σύνολο ελέγχου.

Η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου είναι μια σχετικά χρονοβόρα επαναληπτική διαδικασία, ιδίως όταν τα πρότυπα εκπαίδευσης είναι πολλά και όταν επίσης είναι πολλοί οι νευρώνες των στρώματων εισόδου και εξόδου.

Ο αριθμός των νευρώνων του στρώματος εισόδου είναι ίσος με τον αριθμό των μεταβλητών εισόδου του προβλήματος πρόβλεψης. Παρόμοια, ο αριθμός των νευρώνων του στρώματος εξόδου είναι ίσος με τον αριθμό των μεταβλητών εξόδου του προβλήματος πρόβλεψης.

Ο αριθμός των νευρώνων του κρυφού στρώματος, πρέπει να προσδιοριστεί με επαναληπτικές δοκιμές, καθώς δεν υπάρχει γενική μέθοδος προσδιορισμού του. Αν οι κρυφοί νευρώνες είναι υπερβολικά λίγοι, το νευρωνικό δίκτυο δε μπορεί να μάθει τις πολύπλοκες σχέσεις μεταξύ εισόδων και εξόδων και ίσως αντιμετωπίσει πρόβλημα σύγκλισης κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης του. Αν ο αριθμός των κρυφών νευρώνων είναι υπερβολικά μεγάλος, η διαδικασία εκπαίδευσης θα διαρκέσει περισσότερο και ίσως επηρεάσει αρνητικά την ικανότητα γενίκευσης του νευρωνικού δικτύου.

Ο αριθμός των νευρώνων του κρυφού στρώματος μεταβάλλεται για διαφορετικές εφαρμογές και συνήθως εξαρτάται από το μέγεθος του συνόλου εκπαίδευσης και τον αριθμό των νευρώνων του στρώματος εισόδου.

3.4 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΥΛΙΚΟΥ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

3.4.1 Εισαγωγή

Η επιλογή του υλικού των τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές αποτελεί μια σημαντική παράμετρο για τη μείωση του κατασκευαστικού κόστους, αντιμετωπίζοντας το συγκεκριμένο πρόβλημα ως υποπρόβλημα του κύριου προβλήματος που δεν είναι άλλο από τη συνολική βελτιστοποίηση σχεδίασης των μετασχηματιστών. Για να υλοποιηθεί όμως η σωστή επιλογή υλικού των τυλιγμάτων, ο κατασκευαστής πρέπει να εξετάσει για κάθε σχεδίαση ενός μετασχηματιστή ποιο υλικό είναι το οικονομικότερο, ο χαλκός ή το αλουμίνιο, βελτιστοποιώντας τη σχεδίαση του μετασχηματιστή δύο φορές (μία με τυλίγματα χαλκού και μία με τυλίγματα αλουμινίου) και στη συνέχεια να επιλέξει τον οικονομικότερο μετασχηματιστή. Οι επόμενες παράγραφοι παρουσιάζουν αναλυτικά τις προτεινόμενες τεχνικές και την πορεία που ακολουθήθηκε για τη διαμόρφωσή τους και την επίλυση του παραπάνω υποπροβλήματος.

3.4.2 Δημιουργία Βάσης Γνώσης

Δημιουργήθηκε μία πολύ μεγάλη βάση γνώσης (2646 διαφορετικές βέλτιστες σχεδιάσεις μετασχηματιστών [3.18]), η οποία αποδείχθηκε ότι είναι κατάλληλη για την αποδοτική λειτουργία του μοντέλου νευρωνικού δικτύου [3.17]. Η βάση γνώσης δημιουργήθηκε για έξι επίπεδα ισχύος (250 kVA, 400 kVA, 630 kVA, 800 kVA, 1000 kVA, 1600 kVA), εννέα κατηγορίες απωλειών φορτίου και κενού φορτίου (AA', AB', AC', BA', BB', BC', CA', CB', CC') [3.19], δύο διαφορετικά υλικά κατασκευής τυλιγμάτων (χαλκός και αλουμίνιο), επτά διαφορετικές τιμές για το μοναδιαίο κόστος του χαλκού και επτά διαφορετικές τιμές για το μοναδιαίο κόστος του αλουμινίου. Με τον τρόπο αυτόν δημιουργήθηκαν $6 \cdot 9 \cdot 7 \cdot 7 = 2646$ βέλτιστες σχεδιάσεις.

Συνολικά, αποθηκεύτηκαν στη βάση γνώσης 2646 βέλτιστες σχεδιάσεις. Κάθε μια από αυτές τις βέλτιστες σχεδιάσεις είχε ιδιότητες εισόδου και εξόδου. Για κάθε μία από τις 2646 μελέτες μετασχηματιστών υπολογίστηκαν 13 ιδιότητες εισόδου, τις οποίες παραθέτει ο Πίνακας 3.2. Οι συγκεκριμένες ιδιότητες επιλέχθηκαν μετά από μια σειρά δοκιμών, περικλείοντας τις σημαντικότερες ιδιότητες κατά τη σχεδίαση ενός μετασχηματιστή, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη την τεχνογνωσία και εμπειρία των μηχανικών σχεδίασης της βιομηχανίας. Οι ιδιότητες εξόδου αποτελούνται από το υλικό των τυλιγμάτων (χαλκός ή αλουμίνιο) που αντιστοιχεί σε κάθε μια από τις 2646 βέλτιστες σχεδιάσεις. Από αυτές τις

2646 σχεδιάσεις, οι 1350 χρησιμοποιήθηκαν ως σύνολο μάθησης ενώ οι υπόλοιπες ως σύνολο ελέγχου.

Πίνακας 3.2 Ιδιότητες εισόδου της βάσης γνώσης.

<i>Σύμβολο</i>	<i>Περιγραφή</i>
I_1	Μοναδιαίο κόστος χαλκού (€/kg)
I_2	Μοναδιαίο κόστος αλουμινίου (€/kg)
I_3	I_1 / I_2
I_4	Μοναδιαίο κόστος μαγνητικού υλικού (€/kg)
I_5	I_4 / I_1
I_6	I_4 / I_2
I_7	Εγγυημένες απώλειες κενού φορτίου (W)
I_8	Εγγυημένες απώλειες φορτίου (W)
I_9	I_7 / I_8
I_{10}	Ονομαστική ισχύς (kVA)
I_{11}	Εγγυημένη τάση βραχυκύκλωσης (%)
I_{12}	I_7 / I_{10}
I_{13}	I_8 / I_{10}

3.4.3 Νευρωνικό Δίκτυο

Για την αποφυγή της διπλής προαναφερθείσας βελτιστοποίησης, αναπτύχθηκε μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου για την επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών. Το συγκεκριμένο μοντέλο βοηθάει την απόφαση του κατασκευαστή για το ποιο υλικό είναι προτιμότερο (δηλαδή οικονομικότερο), ο χαλκός ή το αλουμίνιο [3.17].

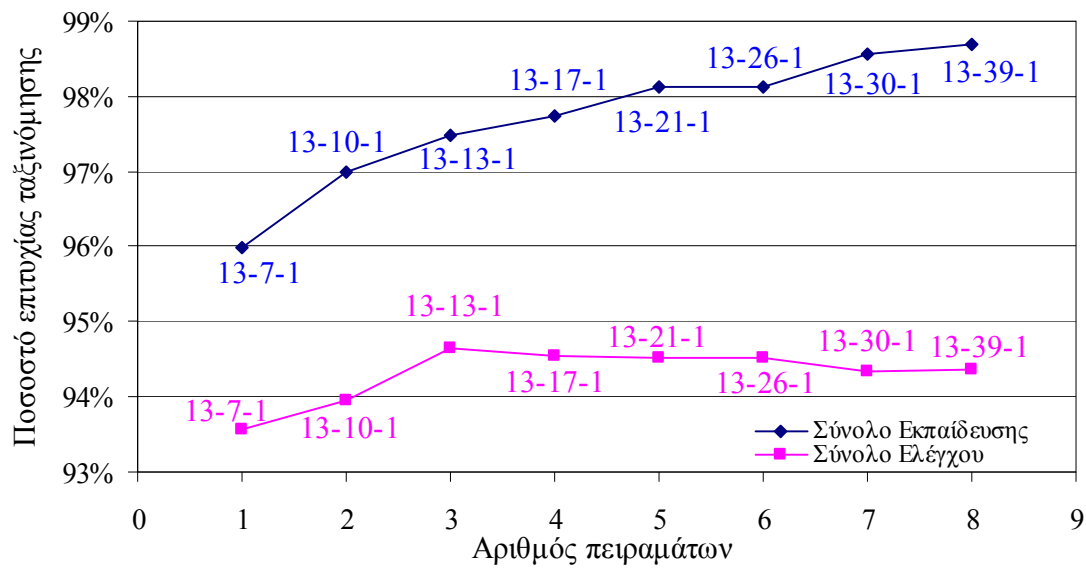
Η επιλογή του νευρωνικού δικτύου έγινε μετά από εκτενή έρευνα, δημιουργώντας πληθώρα από διαφορετικές τοπολογίες δικτύων (δηλαδή διαφορετικό αριθμό νευρώνων σε κάθε επίπεδο καθώς επίσης και διαφορετικό πλήθος κρυφών επιπέδων, με εξαίρεση το επίπεδο εισόδου το οποίο περιελάμβανε 13 νευρώνες εισόδου), διαφορετικές συναρτήσεις μεταφοράς και τέλος διαφορετικές συναρτήσεις εκπαίδευσης. Ο Πίνακας 3.3 και το Σχήμα 3.7 παρουσιάζουν ένα μέρος των αποτελεσμάτων και τη γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων, αντίστοιχα. Τέλος, στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η τοπολογία του βέλτιστου τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

Αναλυτικότερα, το βέλτιστο νευρωνικό δίκτυο που επιλέχθηκε ήταν ένα πλήρως συνδεδεμένο, τριών επιπέδων τεχνητό νευρωνικό δίκτυο με απλή ανατροφοδότηση που εκπαιδεύτηκε με τον αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης λάθους, περιλαμβάνοντας 13 νευρώνες εισόδου, 13 νευρώνες στο πρώτο κρυφό επίπεδο και 1 νευρώνα στο επίπεδο εξόδου. Το συγκεκριμένο δίκτυο εμφάνισε πολύ καλή συμπεριφορά, επιλέγοντας το σωστό υλικό τυλιγμάτων με ποσοστό επιτυχίας 94.7% στο σύνολο ελέγχου.

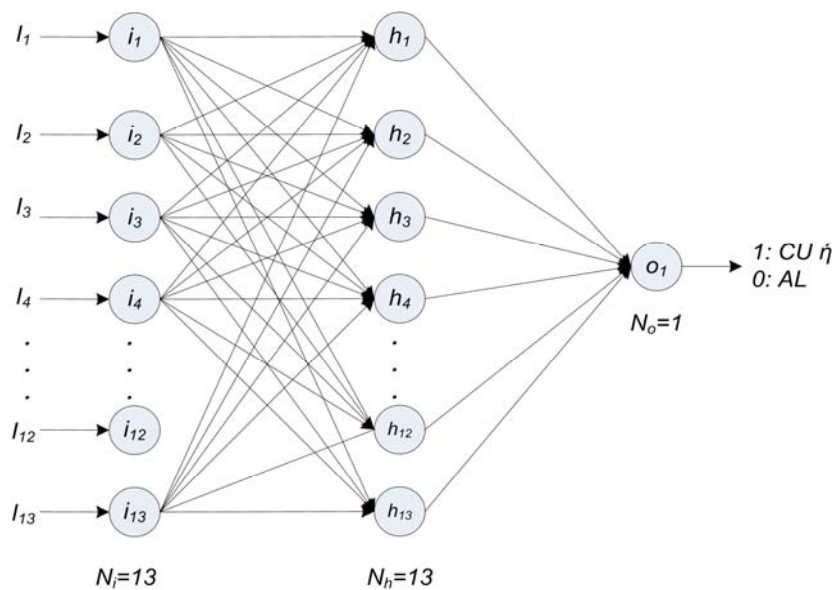
Η πρωτοτυπία του συγκεκριμένου μοντέλου είναι ότι μειώνεται η ταχύτητα σχεδίασης του μετασχηματιστή στο μισό, καθώς δεν απαιτείται (σε αντιδιαστολή με την επικρατούσα βιομηχανική πρακτική) να γίνεται δύο φορές βελτιστοποίηση της σχεδίασης κάθε μετασχηματιστή, μία με τυλίγματα χαλκού και μία με τυλίγματα αλουμινίου, και στη συνέχεια να επιλέγεται το υλικό τυλιγμάτων που οδηγεί στη φθηνότερη σχεδίαση. Το προτεινόμενο μοντέλο νευρωνικού δικτύου επιλέγει άμεσα και με μεγάλη ακρίβεια το υλικό των τυλιγμάτων που οδηγεί στη σχεδίαση μετασχηματιστή με το ελάχιστο κόστος [3.17].

Πίνακας 3.3 Απόδοση (ποσοστό επιτυχίας ταξινόμησης) του νευρωνικού δικτύου με 13 νευρώνες εισόδου, 1 νευρώνα εξόδου και διαφορετικό πλήθος νευρώνων στο πρώτο κρυφό επίπεδο για την επιλογή υλικού τυλιγμάτων μετασχηματιστή.

Αριθμός πειράματος	Αρχιτεκτονική νευρωνικού δικτύου	Ποσοστό επιτυχίας στο σύνολο εκπαίδευσης	Ποσοστό επιτυχίας στο σύνολο ελέγχου
1	13-7-1	95.99%	93.56%
2	13-10-1	96.99%	93.95%
3	13-13-1	97.48%	94.69%
4	13-17-1	97.75%	94.55%
5	13-21-1	98.14%	94.51%
6	13-26-1	98.12%	94.52%
7	13-30-1	98.57%	94.35%
8	13-39-1	98.70%	94.37%



Σχήμα 3.7 Η ακρίβεια των 8 διαφορετικών νευρωνικών δικτύων όσον αφορά το σύνολο εκπαίδευσης και ελέγχου.

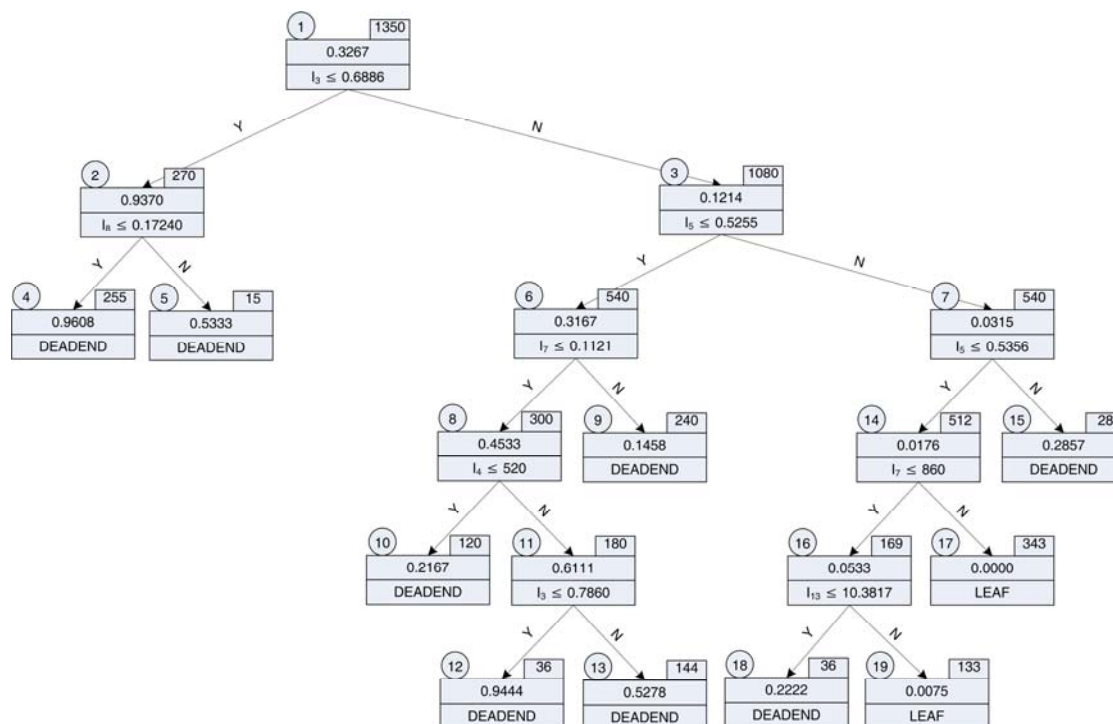


Σχήμα 3.8 Αρχιτεκτονική του βέλτιστου νευρωνικού δικτύου για την επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές.

3.4.4 Προτεινόμενη Μεθοδολογία για την Επιλογή του Υλικού των Τυλιγμάτων

Έχοντας την εμπειρία της εφαρμογής νευρωνικών δικτύων στο πρόβλημα επιλογής του υλικού των τυλιγμάτων, η μέθοδος επεκτάθηκε και συνδυάστηκε με την τεχνική των δέντρων απόφασης καταλήγοντας στο καινοτομικό μοντέλο επιλογής του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών διανομής που παρουσιάζεται στη συνέχεια [3.20]. Το συγκεκριμένο μοντέλο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα δύο μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης, των δέντρων απόφασης και των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Τα δέντρα απόφασης επιλέγουν αυτόματα τις πιο σημαντικές παραμέτρους εισόδου που επηρεάζουν τον προσδιορισμό του υλικού των τυλιγμάτων, ενώ τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του υλικού των τυλιγμάτων του βέλτιστου μετασχηματιστή με βάση όχι μόνο τις συνολικές υποψήφιες παραμέτρους εισόδου αλλά και τις επιλεγμένες παραμέτρους από τα δέντρα απόφασης. Επιπλέον, τα δέντρα απόφασης παρέχουν χρήσιμους κανόνες για την επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών.

Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν τα δέντρα απόφασης, τα οποία επέλεξαν τις σημαντικότερες ιδιότητες ανάμεσα από τις 13 ιδιότητες που παρουσιάζει ο Πίνακας 3.2. Το σύνολο εκπαίδευσης και το σύνολο ελέγχου περιείχαν 1350 και 1296 βέλτιστες σχεδιάσεις, αντίστοιχα. Το δέντρο απόφασης που σχεδιάστηκε αυτόματα, χρησιμοποιώντας τις 1350 βέλτιστες σχεδιάσεις με τις 13 ιδιότητες, για την επιλογή του υλικού των τυλιγμάτων, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9 Δέντρο απόφασης για την επιλογή του υλικού των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών διανομής.

Κάθε τερματικός κόμβος του δέντρου απόφασης ισοδυναμεί με ένα κανόνα απόφασης. Για παράδειγμα, ο τερματικός κόμβος 17, ισοδυναμεί με τον κανόνα: εάν το $I_3 > 0.6886$ και το $I_5 > 0.5255$ και το $I_7 > 860$, τότε επιλέγεται το αλουμίνιο ως υλικό κατασκευής των τυλιγμάτων, εφόσον ο δείκτης χαλκού του κόμβου 17 είναι 0.0, καθώς και οι 343 σχεδιάσεις μετασχηματιστών του κόμβου 17 κατασκευάζονται με τυλίγματα αλουμινίου.

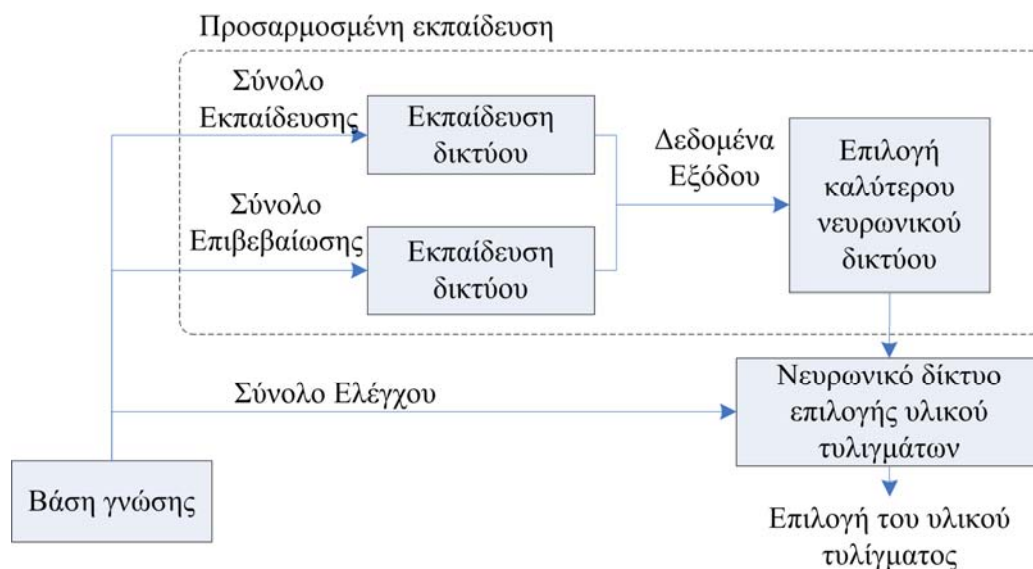
Επίσης, είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι ανάμεσα στις 13 ιδιότητες, το δέντρο απόφασης επέλεξε αυτόματα μόνο τις έξι πιο σημαντικές (I_3 , I_4 , I_5 , I_7 , I_8 και I_{13}), οι οποίες εμφανίζονται στους διάφορους ενδιάμεσους κόμβους (κόμβους ελέγχου) του δέντρου απόφασης που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.9. Η επιλογή των συγκεκριμένων ιδιοτήτων είναι λογική και αναμενόμενη, διότι όλες συνδέονται με την επιλογή του υλικού των τυλιγμάτων.

Πράγματι, σύμφωνα και με τα δεδομένα που παραθέτει ο Πίνακας 3.2, η ιδιότητα I_3 αντιστοιχεί στο λόγο του μοναδιαίου κόστους του χαλκού προς το μοναδιαίο κόστος του αλουμινίου, η ιδιότητα I_4 αντιστοιχεί στο μοναδιαίο κόστος του μαγνητικού υλικού, η ιδιότητα I_5 αντιστοιχεί στο λόγο του μοναδιαίου κόστους του μαγνητικού υλικού προς το μοναδιαίο κόστος του χαλκού, η ιδιότητα I_7 αντιστοιχεί στις εγγυημένες απώλειες του κενού φορτίου, η ιδιότητα I_8 αντιστοιχεί στις εγγυημένες απώλειες του φορτίου και η ιδιότητα I_{13} αντιστοιχεί στο λόγο των εγγυημένων απωλειών του φορτίου προς την εγγυημένη τάση βραχυκύκλωσης. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των έξι επιλεχθέντων ιδιοτήτων, το δέντρο απόφασης (Σχήμα 3.9) προβλέπει ποιο είναι το καταλληλότερο υλικό (χαλκός ή αλουμίνιο) με το οποίο πρέπει να σχεδιαστεί ο μετασχηματιστής διανομής.

Ο βαθμός επιτυχίας ταξινόμησης του συγκεκριμένου δέντρου απόφασης είναι 90.92% στο σύνολο ελέγχου, ποσοστό που καθιστά την μεθοδολογία των δέντρων απόφασης κατάλληλη για την επιλογή του υλικού στους μετασχηματιστές διανομής.

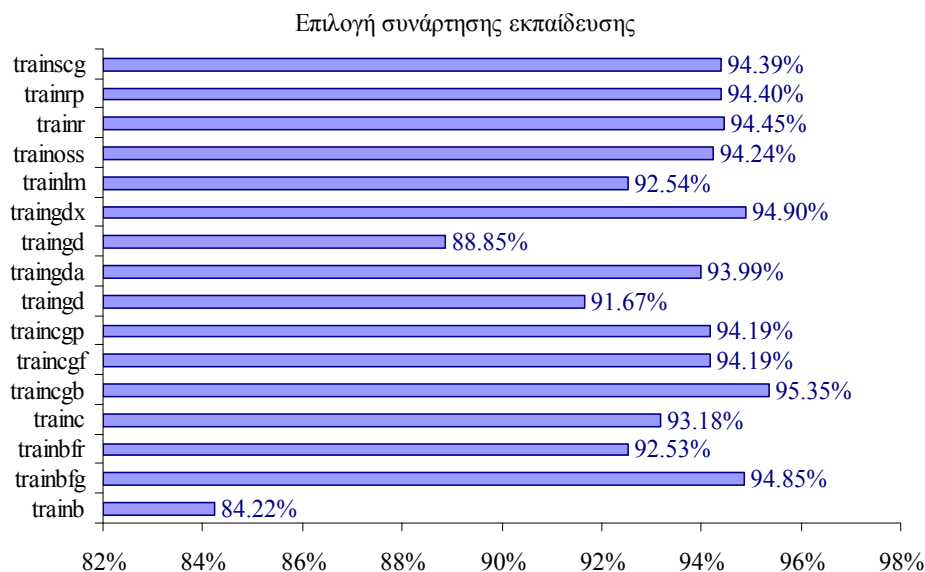
Στο συγκεκριμένο πρόβλημα της επιλογής του υλικού των τυλιγμάτων, στο οποίο δεν υπάρχει αναλυτική σχέση ανάμεσα στις παραμέτρους, η μεθοδολογία των τεχνητών νευρωνικών δικτύων μπορεί να εφαρμοστεί επιτυχώς, εξαιτίας του γεγονότος ότι μπορούν εύκολα να μοντελοποιήσουν τέτοιους είδους προβλήματα. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να επιλυθεί το πρόβλημα της ταξινόμησης σε δύο κλάσεις: χαλκός ή αλουμίνιο. Στο στάδιο της εκπαίδευσης, επιλέγεται το κατάλληλο νευρωνικό δίκτυο, δηλαδή επιλέγονται ο αριθμός των κρυφών επιπέδων, ο αριθμός των νευρώνων σε κάθε επίπεδο και ο τύπος νευρώνων. Επίσης, χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης προτεινόμενης μεθόδου είναι ότι χρησιμοποιεί ένα *προσαρμοσμένο μηχανισμό εκπαίδευσης*, ο οποίος επιτρέπει στο νευρωνικό δίκτυο να μαθαίνει από τα λάθη του, αναπροσαρμόζοντας τις τιμές των βαρών κάθε νευρώνα και κατά επέκταση βελτιώνοντας το ποσοστό επιτυχίας της ταξινόμησης. Πολύ σημαντικό είναι το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων έχει πραγματοποιηθεί *κανονικοποίηση (normalization)* των δεδομένων, αυξάνοντας την απόδοση του νευρωνικού δικτύου.

Ακόμη, διαμερίστηκε η βάση γνώσης σε τρία διαφορετικά σύνολα: το *σύνολο εκπαίδευσης*, το *σύνολο επιβεβαίωσης* και το *σύνολο ελέγχου*. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στην αύξηση της απόδοσης του νευρωνικού δικτύου είναι η κατάλληλη επιλογή του μεγέθους για κάθε σύνολο. Ένας μεγάλος αριθμός από διαφορετικά τεχνητά νευρωνικά δίκτυα εκπαιδεύτηκαν και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για την ταξινόμηση των σχεδιάσεων του συνόλου ελέγχου. Βέλτιστο είναι εκείνο το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο με το μέγιστο βαθμό επιτυχίας ταξινόμησης στο σύνολο ελέγχου (Σχήμα 3.10). Να σημειωθεί ότι η παραπάνω έρευνα διεκπεραιώθηκε με τη βοήθεια της εργαλειοθήκης των νευρωνικών δικτύων της Matlab [3.23].

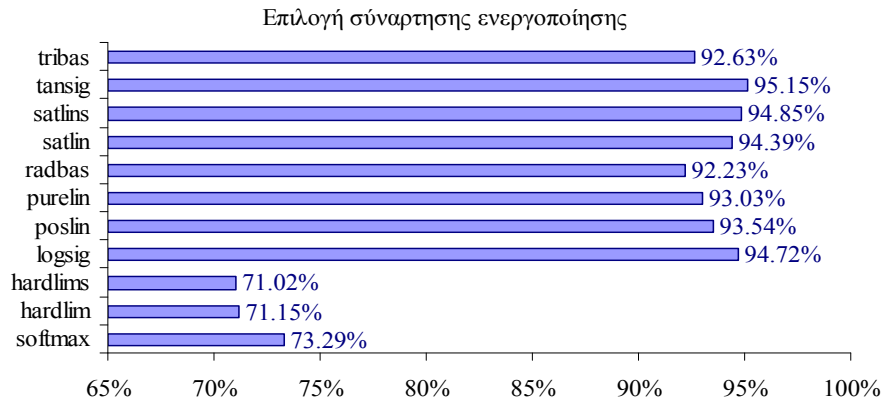


Σχήμα 3.10 Μηχανισμός προσαρμοσμένης εκπαίδευσης για την επιλογή του υλικού των τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές.

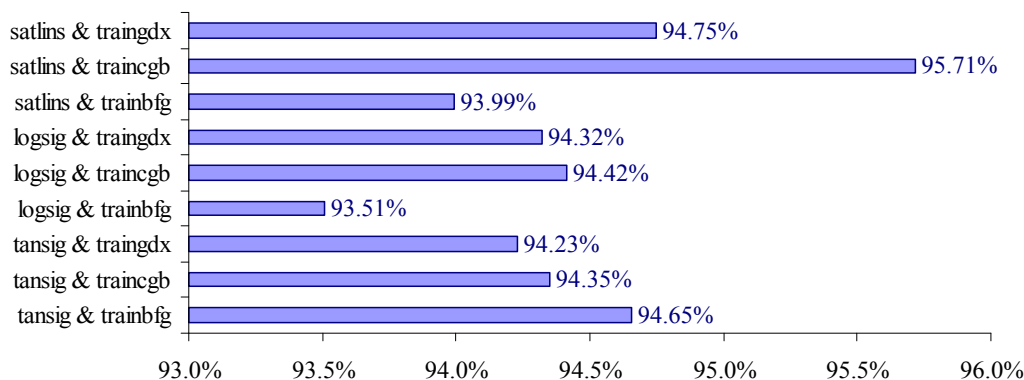
Για τη επιλογή της καλύτερης συνάρτησης εκπαίδευσης και ενεργοποίησης του νευρωνικού δικτύου, υλοποιήθηκε η παρακάτω διαδικασία. Λαμβάνοντας υπόψη προγενέστερη έρευνα (§ 3.4.3), βάσει της οποίας αποδείχθηκε ότι η αρχιτεκτονική του δικτύου με 13 νευρώνες εισόδου, 13 νευρώνες στο κρυφό στρώμα και 1 νευρώνα εξόδου επιτυγχάνει τον υψηλότερο βαθμό επιτυχίας ταξινόμησης στο σύνολο ελέγχου, χρησιμοποιήθηκαν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί των συναρτήσεων εκπαίδευσης και ενεργοποίησης της εργαλειοθήκης των νευρωνικών δικτύων της Matlab για να επιτευχθεί το καλύτερο αποτέλεσμα [3.23]. Το Σχήμα 3.11 και το Σχήμα 3.12 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα για την επιλογή της συνάρτησης εκπαίδευσης και ενεργοποίησης αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας 675 βέλτιστες σχεδιάσεις ως σύνολο μάθησης και 675 διαφορετικές βέλτιστες σχεδιάσεις ως σύνολο ελέγχου. Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα σχήματα, οι τρεις καλύτερες συναρτήσεις εκπαίδευσης είναι οι *traincgb*, *traingdx* και *trainbfg*, και οι τρεις καλύτερες συναρτήσεις ενεργοποίησης είναι οι *tansig*, *satlins* και *logsig*. Λαμβάνοντας υπόψη τις τρεις καλύτερες συναρτήσεις εκπαίδευσης και ενεργοποίησης, διεξήχθησαν νέες δοκιμές ανάμεσα σε όλους τους πιθανούς συνδυασμούς τους. Μεταξύ λοιπόν των εννέα διαφορετικών συνδυασμών, προέκυψε ότι ο υψηλότερος βαθμός επιτυχίας ταξινόμησης (95.71%) επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας την *traincgb* ως συνάρτηση εκπαίδευσης και την *satlins* ως συνάρτηση ενεργοποίησης (Σχήμα 3.13). Η συνάρτηση εκπαίδευσης (*traincgb*) ανήκει σε μια οικογένεια αλγορίθμων που ονομάζεται *αλγόριθμοι συζυγών κλίσεων* λειτουργώντας με αναλυτικό υπολογισμό δευτέρων παραγώγων (*Powell-Beale restarts*), οι οποίοι αλγόριθμοι σε κάθε βήμα εκτελούν τοπική αναζήτηση προσπαθώντας να βρουν τη βέλτιστη τιμή αλλά και τη βέλτιστη κατεύθυνση μεταβολής των βαρών. Η συνάρτηση ενεργοποίησης (*satlins*) είναι μια συμμετρική γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης, η οποία παρουσίασε πολύ καλή συμπεριφορά στο υπό εξέταση πρόβλημα. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα προέκυψαν από το μέσο όρο δέκα διαφορετικών εκτελέσεων του αλγόριθμου.



Σχήμα 3.11 Βαθμός επιτυχίας ταξινόμησης στο σύνολο ελέγχου χρησιμοποιώντας 16 διαφορετικές συναρτήσεις εκπαίδευσης της εργαλειοθήκης της Matlab.



Σχήμα 3.12 Βαθμός επιτυχίας ταξινόμησης στο σύνολο ελέγχου χρησιμοποιώντας 11 διαφορετικές συναρτήσεις ενεργοποίησης της εργαλειοθήκης της Matlab.



Σχήμα 3.13 Όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των τριών καλύτερων συναρτήσεων ενεργοποίησης και εκπαίδευσης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών για τη επιλογή υλικού τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές διανομής. Ο Πίνακας 3.4 παρουσιάζει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της έρευνας. Αναλυτικότερα, παρατηρείται ότι το καλύτερο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποίησε και τις 13 ιδιότητες ως νευρώνες εισόδου ήταν εκείνο με ένα κρυφό στρώμα, το οποίο διαμέρισε το σύνολο μάθησης στο 50% της βάσης γνώσης και το υπόλοιπο 50% στο σύνολο ελέγχου, αποδίδοντας την καλύτερη συμπεριφορά με βαθμό επιτυχίας ταξινόμησης ίσο με 95.92%. Από την άλλη μεριά, το καλύτερο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποίησε τις 6 ιδιότητες (που προέκυψαν από το δέντρο απόφασης) ως νευρώνες εισόδου ήταν εκείνο με δύο κρυφά στρώματα, το οποίο διαμέρισε το σύνολο μάθησης στο 50% της βάσης γνώσης και το υπόλοιπο 50% στο σύνολο ελέγχου, αποδίδοντας βαθμό επιτυχίας ταξινόμησης ίσο με 94.58%.

Πίνακας 3.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα της έρευνας για την επιλογή του υλικού των τυλιγμάτων.

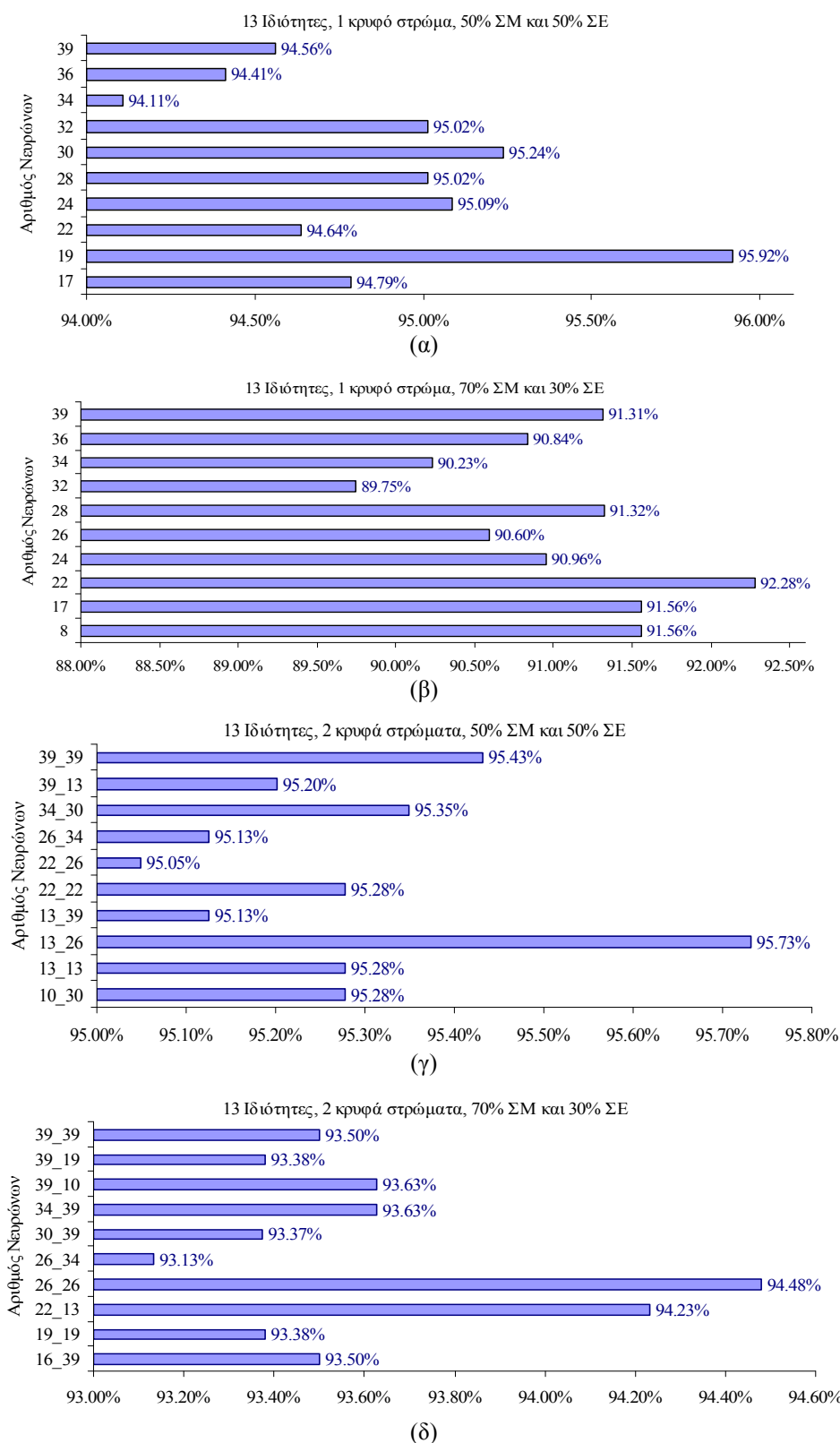
13 Ιδιότητες		6 Ιδιότητες	
ένα κρυφό επίπεδο	BET στο ΣΕ	ένα κρυφό επίπεδο	BET στο ΣΕ
70% ΣΜ - 30% ΣΕ :	92.28%	70% ΣΜ - 30% ΣΕ :	92.16%
50% ΣΜ - 50% ΣΕ :	95.92%	50% ΣΜ - 50% ΣΕ :	94.28%
δύο κρυφά επίπεδα	BET στο ΣΕ	δύο κρυφά επίπεδα	BET στο ΣΕ
70% ΣΜ - 30% ΣΕ :	94.48%	70% ΣΜ - 30% ΣΕ :	92.59%
50% ΣΜ - 50% ΣΕ :	95.73%	50% ΣΜ - 50% ΣΕ :	94.58%

ΣΜ: Σύνολο Μάθησης, ΣΕ: Σύνολο Ελέγχου, BET: Βαθμός Επιτυχίας Ταξινόμησης

Βασικός στόχος είναι η εύρεση της βέλτιστης αρχιτεκτονικής ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου, το οποίο παρουσιάζει το μεγαλύτερο βαθμό επιτυχίας ταξινόμησης στο σύνολο ελέγχου, επιλύοντας επιτυχημένα το πρόβλημα επιλογής του υλικού των τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές. Για τη επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου, πραγματοποιήθηκε εκτενής έρευνα. Αναλυτικότερα, διεξήχθησαν πειράματα μελετώντας τη συμπεριφορά των τεχνητών νευρωνικών δικτύων σε δύο υποπροβλήματα. Το πρώτο υποπρόβλημα χρησιμοποιούσε και τις 13 ιδιότητες (Πίνακας 3.2) ως νευρώνες εισόδου, ενώ το άλλο υποπρόβλημα χρησιμοποιούσε τις 6 ιδιότητες (I_3 , I_4 , I_5 , I_7 , I_8 και I_{13}) που είχαν προκύψει από την έρευνα των δέντρων απόφασης. Να αναφερθεί ότι και τα δύο υποπροβλήματα είχαν ένα νευρώνα εξόδου που αναπαριστούσε το υλικό των τυλιγμάτων (χαλκός ή αλουμίνιο) κάθε μιας τελικής βέλτιστης σχεδίασης. Ανάλογα με το πλήθος των κρυφών επιπέδων, διεξάγεται μια εκτενής έρευνα, διερευνώντας μεγάλο πλήθος από διαφορετικές τοπολογίες νευρωνικών δικτύων. Συγκεκριμένα, εξετάζονται αρχιτεκτονικές δικτύων με ένα ή δύο κρυφά στρώματα, όπου το κάθε επίπεδο περιλαμβάνει μια σειρά δοκιμών από διαφορετικό αριθμό νευρώνων.

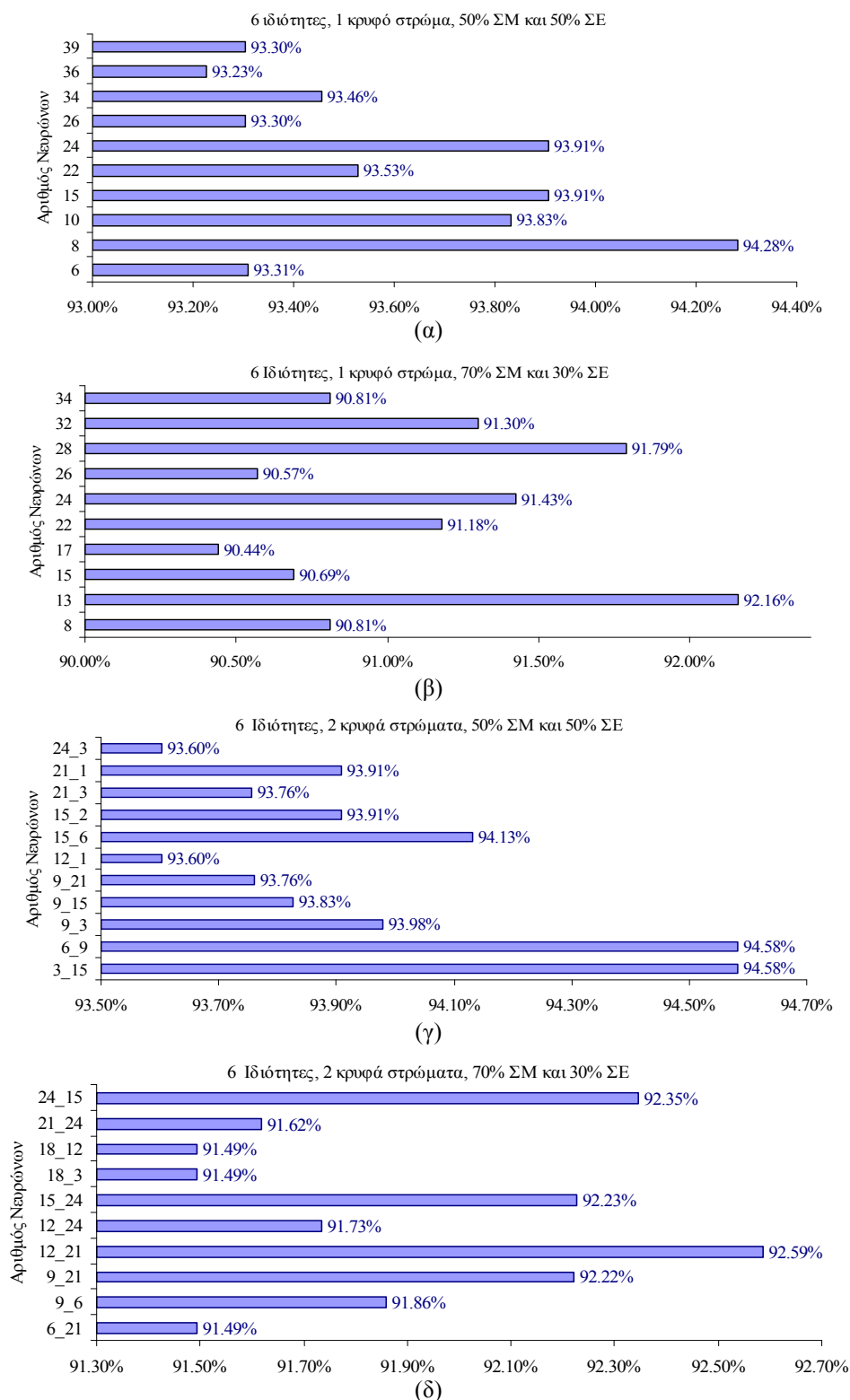
Αναλυτικότερα, στην περίπτωση που υπάρχει ένα κρυφό επίπεδο υπολογίζεται ο βαθμός επιτυχίας ταξινόμησης χρησιμοποιώντας 18 διαφορετικούς αριθμούς νευρώνων (2, 4, 6, 8, 10, 13, 15, 17, 19, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, και 39 νευρώνες) και για τα δύο υποπροβλήματα. Στην περίπτωση που υπάρχουν και τα δύο κρυφά επίπεδα και οι 13 νευρώνες εισόδου, υπολογίζεται ο βαθμός επιτυχίας ταξινόμησης χρησιμοποιώντας 81 διαφορετικούς συνδυασμούς αριθμών νευρώνων, δηλαδή εξετάζονται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των παρακάτω εννέα διαφορετικών αριθμών νευρώνων: 10, 13, 16, 19, 22, 26, 30, 34, και 39 νευρώνες. Στη περίπτωση των 6 νευρώνων εισόδου (με τα δύο κρυφά επίπεδα), υπολογίζεται ο βαθμός επιτυχίας ταξινόμησης χρησιμοποιώντας 64 διαφορετικούς συνδυασμούς αριθμών νευρώνων, δηλαδή εξετάζονται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των παρακάτω οκτώ διαφορετικών αριθμών νευρώνων: 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, και 24 νευρώνες. Στην δεύτερη περίπτωση, η έρευνα περιλαμβάνει λιγότερους συνδυασμούς νευρώνων διότι οι νευρώνες εισόδου είναι 6, σε αντίθεση με την πρώτη περίπτωση που είναι 13. Με άλλα λόγια, η έρευνα που πραγματοποιήθηκε οδήγησε στο συμπέρασμα ότι δεν έχει νόημα η μελέτη κρυφών επιπέδων που διαθέτουν περισσότερους νευρώνες από περίπου τον τριπλάσιο αριθμό των νευρώνων εισόδου. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα προέκυψαν από το μέσο όρο δέκα διαφορετικών εκτελέσεων του αλγόριθμου.

Επίσης, ο διαμερισμός της βάσης γνώσης στο σύνολο μάθησης (το οποίο αποτελείται από το σύνολο εκπαίδευσης και το σύνολο επιβεβαίωσης) και στο σύνολο ελέγχου ερευνήθηκε υλοποιώντας τις εξής δύο περιπτώσεις: στην πρώτη περίπτωση το σύνολο μάθησης περιείχε το 50% της βάσης γνώσης και το υπόλοιπο 50% αποτελούσε το σύνολο ελέγχου, ενώ στην δεύτερη περίπτωση, το σύνολο μάθησης περιείχε το 70% της βάσης γνώσης και το υπόλοιπο 30% αποτελούσε το σύνολο ελέγχου. Να υπογραμμιστεί ότι εξετάστηκε και η περίπτωση που το σύνολο μάθησης περιείχε το 30% της βάσης γνώσης και το υπόλοιπο 70% το σύνολο ελέγχου, αλλά η συμπεριφορά των τεχνητών νευρωνικών δικτύων ήταν ασταθής και ο βαθμός επιτυχίας ταξινόμησης κυμαινόταν κοντά στο 80%, το οποίο είναι αρκετά χαμηλό σε σύγκριση με τις δυο άλλες περιπτώσεις. Το αποτέλεσμα αυτό είναι απόλυτα λογικό διότι το νευρωνικό δίκτυο δεν εκπαιδεύεται με αρκετά μεγάλο ποσοστό συνόλου μάθησης, έχοντας χαμηλές επιδόσεις στο σύνολο ελέγχου, το οποίο είναι αρκετά μεγαλύτερο σε όγκο δεδομένων σε σχέση με το σύνολο μάθησης.



Σχήμα 3.14 Τα 10 καλύτερα αποτελέσματα με βάση τον υψηλότερο βαθμό επιτυχίας ταξινόμησης χρησιμοποιώντας τους δεκατρείς νευρώνες εισόδου, ένα ή δύο κρυφά στρώματα, και δυο διαφορετικές περιπτώσεις όσον αφορά το μέγεθος του συνόλου μάθησης και ελέγχου. (α) ένα κρυφό στρώμα με 50% ΣΜ και 50% ΣΕ, (β) ένα κρυφό στρώμα με 70% ΣΜ και 30% ΣΕ, (γ) δύο κρυφά στρώματα με 50% ΣΜ και 50% ΣΕ, και (δ) δύο κρυφά στρώματα με 70% ΣΜ και 30% ΣΕ.

ΣΜ: Σύνολο Μάθησης, ΣΕ: Σύνολο Ελέγχου

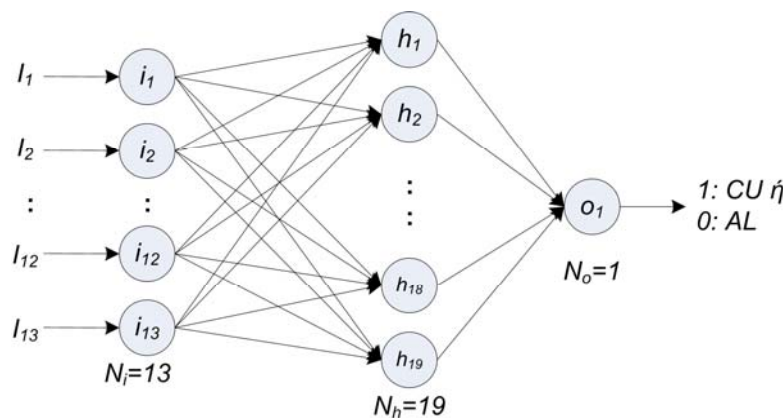


Σχήμα 3.15 Τα 10 καλύτερα αποτελέσματα με βάση τον υψηλότερο βαθμό επιτυχίας ταξινόμησης χρησιμοποιώντας τους έξι νευρώνες εισόδου, ένα ή δύο κρυφά στρώματα, και δυο διαφορετικές περιπτώσεις όσον αφορά το μέγεθος του συνόλου μάθησης και ελέγχου. (α) ένα κρυφό στρώμα με 50% ΣΜ και 50% ΣΕ, (β) ένα κρυφό στρώμα με 70% ΣΜ και 30% ΣΕ, (γ) δύο κρυφά στρώματα με 50% ΣΜ και 50% ΣΕ, και (δ) δύο κρυφά στρώματα με 70% ΣΜ και 30% ΣΕ.

ΣΜ: Σύνολο Μάθησης, ΣΕ: Σύνολο Ελέγχου

Το Σχήμα 3.14 παρουσιάζει τα δέκα καλύτερα αποτελέσματα σύμφωνα με το ποσοστό επιτυχίας ταξινόμησης για την περίπτωση των 13 ιδιοτήτων, με ένα ή δύο κρυφά στρώματα και δύο διαφορετικές διαμερίσεις της βάσης γνώσης (α. 50%ΣΜ - 50%ΣΕ και β. 70%ΣΜ - 30%ΣΕ). Να σημειωθεί ότι όταν εξετάζεται η περίπτωση με τα δύο κρυφά στρώματα, τότε ακολουθείται ο συμβολισμός 13_26, ο οποίος σημαίνει ότι το πρώτο και το δεύτερο κρυφό στρώμα περιέχουν 13 και 26 νευρώνες αντίστοιχα. Συνεπώς, όταν για παράδειγμα εξετάζεται η αρχιτεκτονική του νευρωνικού δικτύου 13_13_26_1, τότε το επίπεδο εισόδου περιλαμβάνει 13 νευρώνες, το πρώτο και το δεύτερο κρυφό επίπεδο περιλαμβάνουν 13 και 26 νευρώνες αντίστοιχα, και το επίπεδο εξόδου περιλαμβάνει 1 νευρώνα.

Σύμφωνα με το Σχήμα 3.14 (α), το μεγαλύτερο ποσοστό επιτυχίας ταξινόμησης στο σύνολο ελέγχου (95.92%) επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ένα πλήρως συνδεδεμένο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο με τρία συνολικά επίπεδα (απλής τροφοδότησης) με την εξής τοπολογία: 13_19_1 (13 νευρώνες στο επίπεδο εισόδου, 19 νευρώνες στο πρώτο κρυφό επίπεδο και ένα νευρώνα στο επίπεδο εξόδου). Το Σχήμα 3.16 απεικονίζει το συγκεκριμένο δίκτυο, το οποίο χρησιμοποιεί το 50% της βάσης γνώσης ως σύνολο μάθησης και το υπόλοιπο ως σύνολο ελέγχου. Επιπροσθέτως, στην περίπτωση με τα δύο κρυφά στρώματα, η τοπολογία που αποδίδει το μεγαλύτερο βαθμό επιτυχίας ταξινόμησης (95.73%, Σχήμα 3.14 (γ)) είναι η 13_13_26_1. Συμπερασματικά, οι δύο παραπάνω περιπτώσεις παρουσίασαν πολύ καλή και ισορροπημένη συμπεριφορά, επιτυγχάνοντας εξαιρετικό ποσοστό επιτυχίας ταξινόμησης στο σύνολο ελέγχου.



Σχήμα 3.16 Η βέλτιστη αρχιτεκτονική του προτεινόμενου τεχνητού νευρωνικού δικτύου.

Επίσης, στην περίπτωση που το 50% της βάσης γνώσης χρησιμοποιείται ως σύνολο μάθησης και το υπόλοιπο ως σύνολο ελέγχου, τα αποτελέσματα δεν είναι τόσο υψηλά, όπως στην προηγούμενη κατάσταση. Για παράδειγμα, το νευρωνικό δίκτυο με την τοπολογία 13_22_1 επιτυγχάνει ποσοστό επιτυχίας ταξινόμησης ίσο με 92.28% στο σύνολο ελέγχου (το καλύτερο με ένα κρυφό στρώμα), ενώ το νευρωνικό δίκτυο με την τοπολογία 13_26_26_1 επιτυγχάνει λίγο μεγαλύτερο ποσοστό επιτυχίας ταξινόμησης (94.48%) στο σύνολο ελέγχου (το καλύτερο με δύο κρυφά στρώματα).

Το Σχήμα 3.15 παρουσιάζει τα δέκα καλύτερα αποτελέσματα σύμφωνα με το ποσοστό επιτυχίας ταξινόμησης για την περίπτωση των 6 ιδιοτήτων (οι οποίες προέκυψαν από τη μέθοδο των δέντρων απόφασης), με ένα ή δύο κρυφά στρώματα και δύο διαφορετικές διαμερίσεις της βάσης γνώσης (α. 50% ΣΜ - 50% ΣΕ και β. 70% ΣΜ - 30% ΣΕ). Σε αυτήν την περίπτωση, τα αποτελέσματα είναι ελαφρώς χειρότερα σε σύγκριση με την περίπτωση των 13 ιδιοτήτων. Το Σχήμα 3.15 (α) και (γ) παρουσιάζει ότι το καλύτερο νευρωνικό δίκτυο με ένα κρυφό επίπεδο επιτυγχάνει ποσοστό επιτυχίας ταξινόμησης ίσο με 94.28% (αρχιτεκτονική νευρωνικού δικτύου 6_8_1), ενώ το καλύτερο νευρωνικό δίκτυο με δύο κρυφά επίπεδα επιτυγχάνει ποσοστό επιτυχίας ταξινόμησης ίσο με 94.58% (αρχιτεκτονικές 6_6_9_1 και 6_3_15_1), χρησιμοποιώντας και στις δύο περιπτώσεις το 50% της βάσης γνώσης ως σύνολο μάθησης και το υπόλοιπο ως σύνολο ελέγχου. Παρόλο που χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τοπολογίες, η απόδοση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων

ήταν σχεδόν παραπλήσια, γεγονός που αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Όμως, στην περίπτωση που εξετάστηκε το σύνολο μάθησης να αποτελείται από το 70% της βάσης γνώσης και το υπόλοιπο ως σύνολο ελέγχου, τα αποτελέσματα ήταν περίπου 2% χειρότερα, σύμφωνα και με το Σχήμα 3.15 (β) και (δ).

3.4.5 Αριθμητική Επιβεβαίωση της Προτεινόμενης Μεθόδου με Χρήση της Υβριδικής Τεχνικής Πεπερασμένων-Οριακών Στοιχείων

Για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων και την αύξηση της αξιοπιστίας της προτεινόμενης τεχνικής των νευρωνικών δικτύων-δέντρων απόφασης, αναπτύχθηκε μία υβριδική τεχνική τεχνητής νοημοσύνης-αριθμητικής μεθόδου για την επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών. Συγκεκριμένα, το προτεινόμενο μοντέλο ενσωματώνει την υβριδική τεχνική πεπερασμένων στοιχείων-οριακών στοιχείων για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών της κάθε εξεταζόμενης σχεδίασης μετασχηματιστή στο μοντέλο τεχνητής νοημοσύνης που αναπτύχθηκε για την επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων του [3.21]. Η ακρίβεια της προτεινόμενης τεχνικής είναι 96%, δηλαδή ο βαθμός επιτυχίας ταξινόμησης για την επιλογή υλικού τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές παραμένει υψηλός, ενώ η υπολογιστική επιβάρυνση λόγω της ενσωμάτωσης των αριθμητικών τεχνικών είναι μικρή, γεγονός που την αναδεικνύει ως μια μέθοδο πολύ αποδοτική, ειδικά για βιομηχανική χρήση.

Η υψηλή απόδοση των αριθμητικών τεχνικών, σε συνδυασμό με τη σημαντική βελτίωση της επίδοσης των υπολογιστικών συστημάτων που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια, ενισχύει τη δυνατότητα ενσωμάτωσής τους σε μεθόδους αναζήτησης βέλτιστης λύσης σε πολυδιάστατο χώρο μεταβλητών. Δεδομένου ότι η εκτίμηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή πραγματοποιείται αναγωγικά κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης, αυξάνοντας σημαντικά τις υπολογιστικές απαιτήσεις, η υιοθέτηση της υβριδικής τεχνικής πεπερασμένων στοιχείων-οριακών στοιχείων για την τρισδιάστατη αναπαράσταση του μετασχηματιστή μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του συνολικού χρόνου που απαιτείται για την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης, ενώ παρουσιάζει το σημαντικό πλεονέκτημα της αυξημένης ακρίβειας η οποία παρέχεται από τη μικτή τεχνική πεπερασμένων στοιχείων-οριακών στοιχείων. Κατά συνέπεια, το συγκεκριμένο μοντέλο που χρησιμοποιείται για την πεδιακή ανάλυση κάθε εξεταζόμενης σχεδίασης παίζει καθοριστικό ρόλο στην απόδοση της προτεινόμενης τεχνικής τεχνητής νοημοσύνης, αφού αποτελεί το συνδετικό κρίκο μεταξύ του αλγόριθμου αναζήτησης βέλτιστου και του αλγόριθμου επίλυσης και προσδιορισμού των κατασκευαστικών παραμέτρων του μετασχηματιστή.

Αναλυτικότερα, η μικτή τεχνική πεπερασμένων στοιχείων-οριακών στοιχείων εμπλέκεται στη διαδικασία βελτιστοποίησης στο σημείο όπου υπολογίζονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της σχεδίασης. Με αυτόν τον τρόπο, η υβριδική αυτή αριθμητική τεχνική χρησιμοποιείται ως βασικό εργαλείο ανάλυσης, αποτελώντας σημαντικό κομμάτι του σκελετού της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Επιπλέον, συνδέεται άμεσα με τις προτεινόμενες τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης, καθώς χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της βάσης γνώσης, η οποία περιλαμβάνει τη βάση γνώσης των δέντρων απόφασης και των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Εκτενής παρουσίαση των αριθμητικών μεθόδων και ειδικότερα της τεχνικής των πεπερασμένων στοιχείων και του τρόπου με τον οποίο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των λειτουργικών χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή δίνονται στο Κεφάλαιο 4. Ο συνδυασμός της τεχνικής πεπερασμένων στοιχείων με τα οριακά στοιχεία επιλέχθηκε στη συγκεκριμένη εφαρμογή (σε αντίθεση με την ολική βελτιστοποίηση που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4, όπου χρησιμοποιείται μόνο η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων) λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητας που προσφέρει στους υπολογισμούς (σε σχέση με τη μέθοδο των αμιγώς πεπερασμένων στοιχείων) η οποία είναι καθοριστική λόγω του μεγάλου αριθμού σχεδιάσεων που εξετάζονται από τα νευρωνικά δίκτυα. Περισσότερες λεπτομέρειες για τη μέθοδο των οριακών στοιχείων και για τη σύζευξη των δύο αριθμητικών τεχνικών μπορούν να αναζητηθούν στην αναφορά [3.22].

3.5 ΣΥΝΟΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύχθηκαν καινοτομικές μεθοδολογίες τεχνητής νοημοσύνης, ικανές να επιλέγουν αυτόματα το υλικό των τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές, το οποίο αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο για τη μείωση του κατασκευαστικού κόστους, χωρίς να χρειάζεται να γίνει δύο φορές η βελτιστοποίηση της σχεδίασης: μία με τυλίγματα χαλκού και μία φορά με τυλίγματα αλουμινίου.

Αρχικά, δημιουργήθηκε μια πλούσια βάση γνώσης που περιείχε 2646 βέλτιστες σχεδιάσεις. Για κάθε μία από τις 2646 μελέτες μετασχηματιστών υπολογίστηκαν 13 ιδιότητες εισόδου (Πίνακας 3.2). Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και τα δέντρα απόφασης επιλέχθηκαν ως οι πλέον κατάλληλες τεχνικές επίλυσης του προβλήματος επιλογής του υλικού των τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές, χρησιμοποιώντας με επιτυχία τη προαναφερθείσα βάση γνώσης.

Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε μια πρώτη προσέγγιση του προβλήματος με την τεχνική των νευρωνικών δικτύων, αναπτύσσοντας ένα πλήθος από διαφορετικές τοπολογίες νευρωνικών δικτύων, αναζητώντας εκείνη με το μεγαλύτερο βαθμό επιτυχίας ταξινόμησης στο σύνολο ελέγχου [3.17]. Το συμπέρασμα της συγκεκριμένης έρευνας ήταν ότι ένα πλήρως συνδεδεμένο, τριών επιπέδων, τεχνητό νευρωνικό δίκτυο με απλή ανατροφοδότηση που εκπαιδεύτηκε με τον αλγόριθμο ανάστροφης διάδοσης λάθους, περιλαμβάνοντας 13 νευρώνες εισόδου, 13 νευρώνες στο πρώτο κρυφό επίπεδο και 1 νευρώνα στο επίπεδο εξόδου αποτελούσε το βέλτιστο νευρωνικό δίκτυο. Το συγκεκριμένο δίκτυο εμφάνισε πολύ καλή συμπεριφορά, επιλέγοντας το σωστό υλικό τυλιγμάτων με ποσοστό επιτυχίας 94.7% στο σύνολο ελέγχου.

Η έρευνα επεκτάθηκε με την ανάπτυξη ενός καινοτομικού μοντέλου επιλογής του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών [3.20]. Το συγκεκριμένο μοντέλο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα δύο μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης, των δέντρων απόφασης και των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Τα δέντρα απόφασης επιλέγουν αυτόματα τις πιο σημαντικές παραμέτρους εισόδου που επηρεάζουν τον προσδιορισμό του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων, ενώ τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για την επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών με βάση όχι μόνο τις συνολικές υποψήφιες παραμέτρους εισόδου αλλά και τις επιλεγμένες παραμέτρους από τα δέντρα απόφασης. Επίσης, διεξήχθησαν πειράματα με τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα τα οποία αποτελούνταν από ένα ή δύο κρυφά στρώματα και δύο διαφορετικές διαμερίσεις της βάσης γνώσης (α. 50% σύνολο μάθησης - 50% σύνολο ελέγχου και β. 70% σύνολο μάθησης - 30% σύνολο ελέγχου). Εξετάστηκε και η περίπτωση που το σύνολο μάθησης περιείχε το 30% της βάσης γνώσης και το υπόλοιπο 70% το σύνολο ελέγχου, αλλά η συμπεριφορά των τεχνητών νευρωνικών δικτύων ήταν ασταθής και ο βαθμός επιτυχίας ταξινόμησης κυμαινόταν κοντά στο 80%, το οποίο είναι αρκετά χαμηλό σε σύγκριση με τις δυο άλλες περιπτώσεις. Καταλήγοντας, παρατηρήθηκε ότι το καλύτερο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποίησε και τις 13 ιδιότητες ως νευρώνες εισόδου ήταν εκείνο με ένα κρυφό στρώμα, το οποίο διαμέρισε το σύνολο μάθησης στο 50% της βάσης γνώσης και το υπόλοιπο 50% στο σύνολο ελέγχου, αποδίδοντας την καλύτερη συμπεριφορά με βαθμό επιτυχίας ταξινόμησης ίσο με 95.92%. Από την άλλη μεριά, το καλύτερο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποίησε τις 6 ιδιότητες (που προέκυψαν από το δέντρο απόφασης) ως νευρώνες εισόδου ήταν εκείνο με δύο κρυφά στρώματα, το οποίο διαμέρισε το σύνολο μάθησης στο 50% της βάσης γνώσης και το υπόλοιπο 50% στο σύνολο ελέγχου, αποδίδοντας βαθμό επιτυχίας ταξινόμησης ίσο με 94.58%.

Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε μία υβριδική τεχνική τεχνητής νοημοσύνης-αριθμητικής μεθόδου για την επιβεβαίωση της προτεινόμενης μεθόδου επιλογής του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών, χρησιμοποιώντας τα δέντρα απόφασης για την επιλογή των παραμέτρων εισόδου, την υβριδική τεχνική πεπερασμένων στοιχείων-οριακών στοιχείων για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή και τα νευρωνικά δίκτυα για την επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών [3.21]. Στόχος της τεχνικής ήταν να συνδυάσει την ακρίβεια της αριθμητικής μεθόδου στην πρόβλεψη των χαρακτηριστικών κάθε σχεδίασης, με όσο το δυνατόν μικρότερη υπολογιστική

επιβάρυνση, λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε η υβριδική μέθοδος πεπερασμένων-οριακών στοιχείων. Η ακρίβεια της προτεινόμενης τεχνικής είναι 96%, δηλαδή ο βαθμός επιτυχίας ταξινόμησης στο σύνολο ελέγχου για την επιλογή υλικού τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές είναι 96%, γεγονός που την αναδεικνύει ως μια μέθοδο πολύ αποδοτική, ειδικά για βιομηχανική χρήση.

Οι παραπάνω μεθοδολογίες βοηθούν τον κατασκευαστή να μη χρειάζεται να εξετάσει για κάθε σχεδίαση ενός μετασχηματιστή ποιο υλικό τυλιγμάτων είναι το οικονομικότερο, ο χαλκός ή το αλουμίνιο, οπότε αποφεύγεται η βελτιστοποίηση της σχεδίασης του μετασχηματιστή δύο φορές (μία με τυλίγματα χαλκού και μία με τυλίγματα αλουμινίου). Συνεπώς, οι συγκεκριμένες μεθοδολογίες αποτελούν αποτελεσματικά εργαλεία επιλογής του υλικού των τυλιγμάτων στη βιομηχανία κατασκευής μετασχηματιστών εξαιτίας των υψηλών βαθμών επιτυχίας ταξινόμησης, παρέχοντας ευέλικτη και αξιόπιστη μεθοδολογία επίλυσης του συγκεκριμένου υποπροβλήματος της σχεδίασης.

3.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] Παύλος Ραϊτσίου, *Μελέτη Μετασχηματιστών*, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα, 2000.
- [3.2] J. R. Quinlan, "Learning efficient classification procedures and their application to chess endgames," *Machine Learning: An artificial intelligence approach*, (R. S. Michalski, J. Carbonell, and T. Mitchell, eds.), Morgan Kaufman, pp. 463-482, 1983.
- [3.3] Π. Σ. Γεωργιάκης, "Συμβολή μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης στη μείωση των απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών διανομής," Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2000.
- [3.4] L. Wehenkel, and M. Pavella, "Decision trees and transient stability of electric power systems," *Automatica*, vol. 27, no. 1, pp. 115-134, 1991.
- [3.5] L. Wehenkel, *Automatic Learning Techniques in Power Systems*, Kluwer Academic, Boston, 1998.
- [3.6] L. Wehenkel, "On uncertainty measures used for decision tree induction," in *Proc. of Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems* (Granada), pp. 413-418, 1996.
- [3.7] Z. Daróczy, "Generalized information functions," *Information and Control*, vol. 16, pp. 36-51, 1970.
- [3.8] L. Wehenkel, *Une approche de l'intelligence artificielle appliquée à l'évaluation de la stabilité transitoire des réseaux électriques*, Ph.D. thesis, University of Liège, May 1990.
- [3.9] L. Wehenkel, "An information quality based decision tree pruning method," in *Proc. 4th International Congress on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*, pp. 581-584, Jul. 1992.
- [3.10] L. Wehenkel, *Decision tree pruning using an additive information quality measure*, Uncertainty in Intelligent Systems (B. Bouchon-Meunier, L. Valverde, and R. R. Yager, eds.), Elsevier, North Holland, pp. 397-411, 1993.
- [3.11] T. O. Kvålseth, "Entropy and correlation: some comments," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-17, no. 3, pp. 517-519, 1987.
- [3.12] L. Wehenkel, T. Van Cutsem, and M. Ribbens-Pavella, "An artificial intelligence framework for on-line transient stability assessment of power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. PWR-4, pp. 789-800, 1989.
- [3.13] J. R. Quinlan, *The effect of noise on concept learning*, Machine Learning II. (R. S. Michalski, J. Carbonell, and T. Mitchell, eds.), Morgan Kaufman, pp. 149-166, 1986.

- [3.14] S. Haykin, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, 2nd Edition. Prentice-Hall, 1999.
- [3.15] B. Kröse, P. van der Smagt, *An Introduction to Neural Networks*, University of Amsterdam, 1996.
- [3.16] J. L. McClelland, D. E. Rumelhart, *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*, The MIT Press, 1986.
- [3.17] E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, A. T. Gioulekas, “An artificial neural network for the selection of winding material in power transformers,” *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Springer-Verlag, LNAI 3955, pp. 465-468, 2006.
- [3.18] Α. Γκιουλέκας, *Ανάπτυξη μεθοδολογίας δένδρων απόφασης για την επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών ισχύος*, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2005.
- [3.19] CENELEC Harmonization Document, HD 428.1 S1:1992.
- [3.20] P. S. Georgilakis, E. I. Amoiralis, “Spotlight on transformer design,” *IEEE Power & Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 40-50, 2007.
- [3.21] E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, T. D. Kefalas, M. A. Tsili, A. G. Kladas, “Artificial Intelligence combined with Hybrid FEM-BE Techniques for Global Transformer Optimization”, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 4, 2007.
- [3.22] M. A. Tsili, A. G. Kladas, P. S. Georgilakis, A. T. Souflaris, C. P. Pitsilis, J. A. Bakopoulos, D. G. Paparigas, “Hybrid Numerical Techniques for Power Transformer Modeling: A Comparative Analysis Validated by Measurements,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 40, no 2, pp. 842-845, Mar. 2004.
- [3.23] H. Demuth, M. Beale, *Neural network toolbox for use with MATLAB*, user’s guide, version 4. MA: MathWorks, 2001.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΜΙΚΤΟΥ ΑΚΕΡΑΙΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΔΙΑΚΛΑΔΩΣΗΣ ΚΑΙ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της σχεδίασης του μετασχηματιστή έχει ως στόχο την εύρεση των βέλτιστων τιμών των μεταβλητών σχεδίασης (κατασκευαστικών παραμέτρων), οι οποίες οδηγούν στη σχεδίαση του μετασχηματιστή με το ελάχιστο δυνατό κόστος των οκτώ κύριων υλικών κατασκευής με ταυτόχρονη ικανοποίηση όλων των περιορισμών σχεδίασης, δηλαδή των τεχνικών προδιαγραφών και των ιδιαίτερων απαιτήσεων του χρήστη του μετασχηματιστή, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2. Η υφιστάμενη μεθοδολογία σχεδίασης μετασχηματιστών διανομής τύπου τυλιγμένου πυρήνα αδυνατεί να εντοπίσει τον ολικά βέλτιστο μετασχηματιστή, διότι βασίζεται στη θεώρηση πεπερασμένου πλήθους εναλλακτικών τιμών των μεταβλητών σχεδίασης, δηλαδή αναζητεί τη βέλτιστη λύση σε ένα υποχώρο του συνολικού χώρου αναζήτησης. Για το λόγο αυτό στο κεφάλαιο αυτό προτείνεται μια καινοτομική υβριδική μεθοδολογία εύρεσης της ολικά βέλτιστης σχεδίασης, η οποία συνδυάζει την τεχνική του μικτού ακεραίου μη γραμμικού προγραμματισμού με την τεχνική της διακλάδωσης και φράγματος. Ταυτόχρονα χρησιμοποιείται και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, επιβεβαιώνοντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ολικού βέλτιστου της σχεδίασης του μετασχηματιστή. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την υπεροχή της προτεινόμενης μεθόδου.

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Έχοντας ορίσει το πρόβλημα της βέλτιστης σχεδίασης του μετασχηματιστή διανομής (Κεφάλαιο 2) και μετά την επιτυχημένη προσπάθεια επίλυσης υποπροβλήματος της σχεδίασης (επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων χαμηλής και υψηλής τάσης) (Κεφάλαιο 3), βασικός σκοπός του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας που θα επιλύει επιτυχώς το πρόβλημα της βέλτιστης σχεδίασης του μετασχηματιστή στο ελάχιστο συνολικό κόστος υλικών.

Ο χώρος της βελτιστοποίησης αποτελεί ένα πολύ μεγάλο και σημαντικό κλάδο των μαθηματικών. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες: τις αιτιοκρατικές (*deterministic methods*) και τις στοχαστικές (*stochastic methods*). Στην πρώτη κατηγορία μεθόδων, η πορεία προς τη λύση καθορίζεται με βάση μαθηματικούς κανόνες (κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης) κάνοντας χρήση παραγώγων, ενώ στις στοχαστικές μεθόδους το βέλτιστο προσεγγίζεται με τυχαίο τρόπο χωρίς τη χρήση παραγώγων. Και οι δύο κατηγορίες βελτιστοποίησης έχουν ανάλογα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Το πλεονέκτημα των στοχαστικών μεθόδων είναι ότι μένουν ανεπηρέαστες από αρχικές συνθήκες, χωρίς να θέτουν περιορισμούς για τον χώρο λύσεων, έχοντας αρκετές πιθανότητες εύρεσης του απόλυτου βέλτιστου χωρίς να εγκλωβίζονται σε τοπικά βέλτιστα, ενώ το κύριο μειονέκτημά τους είναι η ταχύτητα σύγκλισης τους. Όσον αφορά την κατηγορία των αιτιοκρατικών μεθόδων, το κύριο πλεονέκτημά τους είναι η απλότητα στην εφαρμογή τους, παρέχοντας πολύ γρήγορα τη βέλτιστη λύση της αντικειμενικής εξίσωσης, ενώ το

μειονέκτημά τους είναι ότι παγιδεύονται σε τοπικά βέλτιστα. Ωστόσο, σύγχρονες τεχνικές επίλυσης μη γραμμικών προβλημάτων έχουν επιτύχει τη μείωση της επίδρασης των παραπάνω αρνητικών χαρακτηριστικών, όπως για παράδειγμα οι διαδικασίες που διαθέτουν μηχανισμούς απομάκρυνσης από τα τοπικά βέλτιστα για την αναζήτηση του γενικού βέλτιστου, ένα χαρακτηριστικό που είναι διαθέσιμο και στους ντετερμινιστικούς επαναληπτικούς αλγόριθμους, όπου ο χρήστης μπορεί να ορίσει διαφορετικές αρχικές τιμές έτσι ώστε να ελέγξει αν ο αλγόριθμος συγκλίνει στην ίδια λύση.

Βάσει των παραπάνω, ο προσδιορισμός μίας αποτελεσματικής μεθόδου για την επίλυση του προβλήματος συνολικής σχεδίασης μετασχηματιστή, στηρίζεται στην εύρεση μίας μεθόδου που παρέχει τη δυνατότητα εύρεσης του βέλτιστου αλλά μπορεί να εξασφαλίσει εφικτές λύσεις όταν ο δοσμένος χρόνος είναι περιορισμένος, χαρακτηριστικό αναγκαίο για την ενσωμάτωσή της σε βιομηχανικό περιβάλλον σχεδίασης. Συνεπώς, από τις δυο κατηγορίες μεθόδων επίλυσης, η πιο υποσχόμενη κατηγορία είναι εκείνη με τις αιτιοκρατικές μεθόδους, όπου το κύριο πλεονέκτημα της σε σχέση με την κατηγορία των στοχαστικών μεθόδων είναι ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος. Παρόλα αυτά, η αποτελεσματικότητα της κάθε μεθόδου περιορίζεται πάντα από τις υπολογιστικές δυνατότητες και την ικανότητα αποθήκευσης των εκάστοτε χρησιμοποιούμενων υπολογιστικών συστημάτων.

Έπειτα από εκτενή έρευνα και λαμβάνοντας υπόψη ότι η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί περιέχουν μη γραμμικές συναρτήσεις καθώς επίσης και ορισμένες μεταβλητές λαμβάνουν ακέραιες τιμές, προέκυψε ότι η τεχνική του μικτού ακεραίου μη γραμμικού προγραμματισμού αποτελεί την πλέον ενδεδειγμένη τεχνική για το πρόβλημα της βέλτιστης σχεδίασης του μετασχηματιστή, παρέχοντας καλύτερα αποτελέσματα από την υφιστάμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία. Παράλληλα, αναπτύχθηκε λογισμικό για τη βέλτιστη σχεδίαση του μετασχηματιστή (Παράρτημα Α), εφαρμόζοντας το μαθηματικό μοντέλο του μικτού ακεραίου προγραμματισμού με τη βοήθεια της μεθόδου διακλάδωσης και φράγματος και των πεπερασμένων στοιχείων.

Ο μικτός ακεραίος μη γραμμικός προγραμματισμός έχει σημαντικές πρακτικές εφαρμογές και αποτελεί ένα ισχυρό πλαίσιο μοντελοποίησης που παρέχει μεγάλη ευελιξία στην έκφραση διακριτών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Στο χώρο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, η χρησιμοποίηση του μικτού ακεραίου προγραμματισμού έχει εφαρμοστεί για την επίλυση πολλών προβλημάτων. Ενδεικτικότερα, με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία, η συγκεκριμένη τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί για τη βέλτιστη σχεδίαση δικτύων διανομής [4.1]-[4.3], για την επίλυση του προβλήματος προγραμματισμού ένταξης μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [4.4][4.5], ή ειδικότερα υδροηλεκτρικών μονάδων [4.6][4.7]. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η μέθοδος μικτού ακεραίου προγραμματισμού χρησιμοποιείται από τους διαχειριστές συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας διαφόρων χωρών για τη βελτιστοποίηση της κατανομής των μονάδων παραγωγής κατά τον ημερήσιο ενεργειακό προγραμματισμό (*day ahead scheduling*) [4.8]. Μικτός ακεραίος προγραμματισμός χρησιμοποιείται και για την επιλογή της βέλτιστης τοπολογίας συσκευών αντιστάθμισης σε μεγάλα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας [4.9] ή για την πρόβλεψη και ελαχιστοποίηση της πιθανότητας εμφάνισης διαδοχικών διακοπών ρεύματος (*black-out*), σε συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [4.10].

4.2 ΜΙΚΤΟΣ ΑΚΕΡΑΙΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΚΛΑΔΩΣΗΣ ΚΑΙ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Στην ενότητα αυτή αναλύεται η μεθοδολογία του μικτού ακεραίου μη γραμμικού προγραμματισμού, η οποία επιλύεται με τη βοήθεια της τεχνικής διακλάδωσης και φράγματος.

4.2.1 Μικτός Ακεραίος Μη Γραμμικός Προγραμματισμός

Έπειτα από διερεύνηση προέκυψε ότι το μαθηματικό μοντέλο του ακεραίου μη γραμμικού προγραμματισμού επιλύει με επιτυχία το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της σχεδίασης του μετασχηματιστή. Το συγκεκριμένο μοντέλο του ακεραίου μη γραμμικού

προγραμματισμού είναι ακριβώς το μοντέλο του μη γραμμικού προγραμματισμού με τον επιπρόσθετο περιορισμό ότι όλες (γνήσιος ακέрайος προγραμματισμός) ή κάποιες (μικτός ακέрайος προγραμματισμός) μεταβλητές πρέπει να έχουν ακέραιες τιμές [4.11][4.12].

Ένα τυπικό πρόβλημα μικτού ακέрайου μη γραμμικού προγραμματισμού απαιτεί την ελαχιστοποίηση της ακόλουθης αντικειμενικής συνάρτησης:

$$\min f(x_n, x_m) \quad (4.1)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$H(x_n, x_m) = 0 \quad (4.2)$$

$$G(x_n, x_m) \leq 0 \quad (4.3)$$

$$x_n \in \mathbb{R}^n \text{ και } x_m \in \mathbb{Z}^m \quad (4.4)$$

όπου x_n είναι το διάνυσμα με n συνεχείς μεταβλητές και x_m είναι το διάνυσμα με m ακέραιες μεταβλητές ($\mathbb{R}$ δηλώνει του πραγματικούς αριθμούς και $\mathbb{Z}$ δηλώνει τους ακέραιους αριθμούς). Η συνάρτηση f είναι η αντικειμενική συνάρτηση, ενώ οι διανυσματικές συναρτήσεις H και G εκφράζουν τους περιορισμούς.

Για την επίλυση του προβλήματος μικτού ακέрайου προγραμματισμού, χρησιμοποιούνται μέθοδοι οι οποίες διαχωρίζουν (*decompose*) το μη γραμμικό τμήμα από το ακέрайο τμήμα. Ο συγκεκριμένος διαχωρισμός πραγματοποιείται από τη μέθοδο *Outer Approximation* [4.13]-[4.15] και *Benders Decomposition* [4.16][4.17], όπου λαμβάνονται μια ακολουθία από διαφορετικά κύρια προβλήματα μικτού ακέрайου γραμμικού προγραμματισμού και υποπροβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού μέσω καθορισμού των ακέрайων μεταβλητών [4.18]. Η πρόσφατη τεχνική της διακλάδωσης και αποκοπής (*branch and cut*) για 0-1 κυρτά προβλήματα μικτού ακέрайου μη γραμμικού προγραμματισμού που παρουσιάστηκε από τους Stubbs και Mehrotra [4.19], διαχωρίζει επίσης το μη γραμμικό τμήμα (κατώτατο όριο και δημιουργία αποκοπής) και το ακέрайο τμήμα από το πρόβλημα. Ακόμη, και στην τεχνική της διακλάδωσης και φράγματος (*branch and bound*) [4.20] μπορεί να θεωρηθεί ότι πραγματοποιείται διαχωρισμός κατά τον οποίο η διαδικασία εύρεσης βέλτιστου συνίσταται στην αναζήτηση ενός δέντρου (οι κόμβοι του οποίου αντιπροσωπεύουν τις πιθανές τιμές των μεταβλητών του ακέрайου τμήματος) η οποία είναι αρκετά διαχωρισμένη από την επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος σε κάθε κόμβο (μη γραμμικό τμήμα). Συνεπώς, η μέθοδος επίλυσης του προβλήματος μικτού ακέрайου μη γραμμικού προγραμματισμού χαρακτηρίζεται από την τεχνική διαχωρισμού και την τεχνική επίλυσης του μη γραμμικού τμήματος. Ο συνδυασμός της μεθόδου διακλάδωσης και φράγματος με τον ακολουθιακό τετραγωνικό προγραμματισμό παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους, για αυτό και επιλέχθηκε για το πρόβλημα βελτιστοποίησης της σχεδίασης μετασχηματιστή [4.21]. Η επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος βασίζεται στην τεχνική του ακολουθιακού τετραγωνικού προγραμματισμού μέσω μιας ακολουθίας προσέγγισης προβλημάτων τετραγωνικού προγραμματισμού.

Αναλυτική περιγραφή της μεθόδου η μέθοδος *διακλάδωσης και φράγματος*, δίνεται στη επόμενη υποενότητα. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις μεθοδολογίες επίλυσης του μικτού ακέрайου προγραμματισμού ο αναγνώστης παραπέμπεται στην αναφορά [4.13].

Στην εφαρμογή των μεθόδων βελτιστοποίησης σε προβλήματα πρακτικού ενδιαφέροντος, είναι εξαιρετικά δύσκολο να εξασφαλιστεί η εύρεση της ολικής βέλτιστης λύσης (ολικό ελάχιστο). Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη πολλαπλών υποβέλτιστων λύσεων του προβλήματος ή ενδεχομένως στην εξαιρετικά αργή σύγκλιση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης κατά την εφαρμογή τους σε ένα πρόβλημα. Από πρακτική σκοπιά, η καλύτερη προσέγγιση ενός προβλήματος είναι να ξεκινήσει η διαδικασία βελτιστοποίησης από διαφορετικές αρχικές διευθύνσεις αναζήτησης και αν καταλήξει τελικά στην ίδια λύση, είναι πιο σίγουρο ότι αυτή αποτελεί την πραγματική βέλτιστη λύση. Ωστόσο, είναι δυνατόν να ελεγχθεί μαθηματικά αν υπάρχει τουλάχιστον σχετικό ελάχιστο. Με άλλα λόγια, μπορούν να οριστούν αναγκαίες συνθήκες για την ύπαρξη βέλτιστης λύσης και κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες να

αποδειχθεί ότι αυτές είναι και ικανές ώστε να εξασφαλιστεί ότι η λύση αποτελεί ολικό ελάχιστο. Οι συνθήκες αυτές εξηγούνται παρακάτω.

Έστω ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς. Είναι γνωστό ότι η αντικειμενική συνάρτηση $f(x)$ ελαχιστοποιείται όταν η πρώτη παράγωγός της ως προς το διάνυσμα x μηδενίζεται. Αν η αντικειμενική συνάρτηση εξαρτάται από περισσότερες μεταβλητές σχεδίασης, τότε αντίστοιχα η κλίση της συνάρτησης πρέπει να μηδενίζεται, δηλαδή:

$$\nabla f(x) = 0 \quad (4.5)$$

Ωστόσο, αυτή η συνθήκη είναι μόνο αναγκαία και έτσι δεν εξασφαλίζει την ύπαρξη ελαχίστου. Για παράδειγμα, η παράγωγος (κλίση) της συνάρτησης σε τρία σημεία της μπορεί να μηδενίζεται, αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι και τα τρία σημεία είναι ελάχιστα. Είναι γνωστό όμως ότι για να έχει μία συνάρτηση μιας μεταβλητής ελάχιστο, θα πρέπει η δεύτερη παράγωγός της ως προς την ανεξάρτητη μεταβλητή να είναι θετική, και αυτό ισχύει μόνο για ένα από τα τρία σημεία. Γενικότερα, για μια συνάρτηση n μεταβλητών, η ικανή συνθήκη αφορά τον πίνακα των δευτέρων μερικών παραγώγων της συνάρτησης που ονομάζεται Εσιανός πίνακας (*Hessian matrix*) και ορίζεται ως εξής:

$$Hessian = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_1 \cdot \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_1 \cdot \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_2 \cdot \partial x_1} & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_2 \cdot \partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_n \cdot \partial x_1} & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_n \cdot \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_n^2} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Αν ο Εσιανός πίνακας είναι θετικά ορισμένος (δηλαδή όλες οι κύριες ελάσσονες ορίζουσές του είναι θετικές) για όλες τις πιθανές τιμές του διανύσματος των μεταβλητών σχεδίασης x , τότε εξασφαλίζεται ότι η σχεδίαση αντιστοιχεί σε σημείο που είναι ολικό ελάχιστο.

Όμως, το πρόβλημα της σχεδίασης του μετασχηματιστή αποτελεί ένα πρόβλημα με περιορισμούς. Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, θα ήταν λογικό να θεωρηθεί ότι ο προσδιορισμός του ελαχίστου εξαρτάται αποκλειστικά από την αντικειμενική συνάρτηση $f(x)$ [4.22]. Αυτό όμως δεν είναι αλήθεια. Οι συναρτήσεις των περιορισμών παίζουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης.

Οι αναγκαίες συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται για τον εντοπισμό της βέλτιστης λύσης είναι τρεις. Οι τρεις αυτές σχέσεις διατυπώνονται παρακάτω και αποτελούν τις αναγκαίες συνθήκες *Karush-Kuhn-Tucker* [4.13]. Η έννοιά τους είναι ότι αν ένα σημείο x^* αποτελεί τη βέλτιστη λύση ενός προβλήματος, θα πρέπει να ικανοποιεί αυτές τις τρεις σχέσεις:

$$H \text{ σχεδίαση που αντιστοιχεί στο } x^* \text{ είναι επιτρεπτή} \quad (4.7)$$

$$\lambda_j \nabla G_j(x^*) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (4.8)$$

$$\nabla f(x^*) + \sum_{j=1}^p \lambda_j \nabla G_j(x^*) + \sum_{k=1}^l \lambda_{k+p} \nabla H_k(x^*) = 0 \quad (4.9)$$

όπου λ_j και λ_{p+k} είναι οι πολλαπλασιαστές *Lagrange* με $\lambda_j \geq 0$ και λ_{k+p} ελεύθερο προσήμου.

Η σχέση (4.7) διατυπώνει την προφανή απαίτηση η βέλτιστη σχεδίαση να ικανοποιεί όλους του περιορισμούς. Η εξίσωση (4.8) σημαίνει ότι αν ένας περιορισμός δεν είναι ενεργός, δηλαδή $G_j(x) < 0$, τότε ο αντίστοιχος πολλαπλασιαστής *Lagrange* μηδενίζεται, δηλαδή $\lambda_j = 0$. Η σχέση (4.9) εκφράζει ουσιαστικά την απαίτηση το διάνυσμα κλίσης της αντικειμενικής συνάρτησης στη βέλτιστη λύση x^* να έχει αντίθετη φορά από το άθροισμα

των διανυσμάτων κλίσης των ενεργών περιορισμών. Είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι οι πολλαπλασιαστές *Lagrange* είναι μονοσήμαντα ορισμένοι βάσει των κλίσεων της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών, έτσι ώστε να ικανοποιείται η (4.9).

Συνοψίζοντας, αν η f είναι κοίλη και οι περιορισμοί κυρτές συναρτήσεις και έχουν συνεχείς μερικές παραγώγους, τότε η λύση του προβλήματος είναι το βέλτιστο διάνυσμα αν και μόνο αν ικανοποιούνται οι παραπάνω τρεις συνθήκες *Karush-Kuhn-Tucker*.

4.2.2 Μέθοδος Διακλάδωσης και Φράγματος

Η μέθοδος διακλάδωσης και φράγματος χρησιμοποιεί μια προσέγγιση του τύπου «διαίρει και βασίλευε» για να διερευνήσει το σύνολο των εφικτών ακέραιων λύσεων. Όμως, αντί να διερευνά ολόκληρο το σύνολο εφικτών λύσεων, χρησιμοποιεί φράγματα στο βέλτιστο κόστος, για να αποφύγει να ερευνήσει συγκεκριμένα κομμάτια του συνόλου των εφικτών ακέραιων λύσεων. Με άλλα λόγια, η μέθοδος διακλάδωσης και φράγματος περιλαμβάνει τη διαδικασία φραγμού με την οποία διαγράφονται αρκετά ημιτελή προβλήματα και τα παρακλάδια τους, με αποτέλεσμα να μειώνεται το υπολογιστικό φορτίο.

Η συγκεκριμένη μέθοδος επιλύει το πρόβλημα του μικτού ακεραίου μη γραμμικού προγραμματισμού επιλύοντας μια ακολουθία από μη γραμμικά προβλήματα, τα οποία προκύπτουν «χαλαρώνοντας» τις υπάρχουσες συνθήκες και περιλαμβάνοντας επιπρόσθετους περιορισμούς. Το πλήθος των επιπρόσθετων περιορισμών αυξάνει όσο η μέθοδος διακλάδωσης και φράγματος εξελίσσεται.

Αρχικά, η τεχνική διακλάδωσης και φράγματος ορίζει κατώτερο και ανώτερο φράγμα ή όριο για τη βέλτιστη λύση. Η στρατηγική της διακλάδωσης επαναληπτικά μειώνει το ανώτερο όριο και αυξάνει το κατώτερο όριο. Η διαφορά μεταξύ αυτών των ορίων είναι μια εκτίμηση του πόσο πλησιάζει η τρέχουσα λύση τη βέλτιστη λύση, εφόσον αυτή υπάρχει.

Κατά τη διάρκεια της ελαχιστοποίησης ενός προβλήματος, το κατώτερο όριο για τη βέλτιστη λύση μπορεί να βρεθεί «χαλαρώνοντας» όλους τους περιορισμούς του αρχικού προβλήματος του μικτού ακεραίου προγραμματισμού και στη συνέχεια επιλύοντας το νέο πρόβλημα με τους «χαλαρούς» περιορισμούς. Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε λύση (ικανοποιώντας όλες τις συνθήκες) του αρχικού προβλήματος του μικτού ακεραίου προγραμματισμού είναι ένα ανώτερο όριο της βέλτιστης λύσης. Ως δεδομένο εισόδου λαμβάνεται υπόψη το προς επίλυση πρόβλημα του μικτού ακεραίου προγραμματισμού και ως έξοδος λαμβάνεται είτε η λύση του προβλήματος είτε μήνυμα που ενημερώνει ότι το πρόβλημα είναι αδύνατο ή εκτός ορίων.

Ο αλγόριθμος την τεχνικής διακλάδωσης και φράγματος υλοποιείται σε έξι βήματα, τα οποία αναλύονται παρακάτω [4.13].

Βήμα 1. (Αρχικοποίηση). Καθορίζεται το ανώτερο όριο (∞) και το κατώτερο όριο ($-\infty$) της βέλτιστης λύσης. Επιλύεται το αρχικό πρόβλημα του μικτού ακεραίου προγραμματισμού «χαλαρώνοντας» τις υπάρχουσες συνθήκες, θεωρώντας ότι όλες οι μεταβλητές είναι πραγματικές. Συνεπώς, το πρόβλημα του μικτού ακεραίου προγραμματισμού μετατρέπεται σε απλό πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο επιλύεται με τη μέθοδο που περιγράφεται στην ενότητα 4.2.2.1. Εάν το «χαλαρό» πρόβλημα είναι αδύνατο, τότε και το αρχικό πρόβλημα του μικτού ακεραίου προγραμματισμού είναι αδύνατο και δεν υπάρχει λύση. Εάν η αποκτηθείσα λύση ικανοποιεί όλες τις συνθήκες και αντιστοιχεί σε ακέραιη τιμή για τις ακέραιες μεταβλητές, τότε είναι η βέλτιστη. Διαφορετικά, το κατώτερο όριο λαμβάνει την τιμή της βέλτιστης λύσης που βρέθηκε.

Βήμα 2. (Διακλάδωση). Χρησιμοποιώντας έναν υποθετικό ακέραιο περιορισμό x_k ο οποίος δεν είναι ακέραιος (δηλαδή τη μη ακέραιη τιμή μιας από τις ακέραιες μεταβλητές¹ που αντιστοιχεί στο βέλτιστο του Βήματος 1), δημιουργούνται δύο υποπροβλήματα διακλάδωσης από το αρχικό πρόβλημα, τα οποία είναι τα εξής: εάν η τιμή του υποθετικού ακέραιου περιορισμού x_k είναι $a.b$, όπου a και b είναι το ακέραιο και το δεκαδικό μέρος ενός αριθμού, αντίστοιχα, το πρώτο πρόβλημα διακλάδωσης είναι το «χαλαρό» αρχικό πρόβλημα του μικτού ακέραιου προγραμματισμού, προσθέτοντας τον περιορισμό $x_k \leq a$ και το δεύτερο πρόβλημα διακλάδωσης είναι το «χαλαρό» αρχικό πρόβλημα του μικτού ακέραιου προγραμματισμού, προσθέτοντας τον περιορισμό $x_k \geq a+1$. Αυτά τα δύο υποπροβλήματα τοποθετούνται σε μια λίστα επεξεργασίας² και μελετώνται σειριακά ή παράλληλα. Στα υποπροβλήματα αυτά θεωρείται ότι η εξεταζόμενη ακέραιη μεταβλητή παίρνει τιμές ίσες με a ή $a+1$, αντίστοιχα, ενώ οι υπόλοιπες μεταβλητές είναι πραγματικές και μεταβάλλονται στα διαστήματα που καθορίζονται από τους περιορισμούς. Σε αυτό το σημείο πρέπει να προστεθεί ότι η προτεινόμενη στρατηγική διακλάδωσης καλύπτει ολόκληρο το χώρο των λύσεων. Επιπλέον, με την παραπάνω διαδικασία, η αρχική εκτίμηση της βέλτιστης λύσης του «χαλαρού» προβλήματος χρησιμοποιείται ως κριτήριο για την καταμέριση του χώρου των πιθανών λύσεων και τον καθορισμό των πιθανών ακέραιων τιμών της μεταβλητής (περί τη μη ακέραια τιμή της αρχικής λύσης) που μπορεί να οδηγήσουν σε βέλτιστη λύση.

Βήμα 3. (Λύση). Επιλύεται το επόμενο πρόβλημα της λίστας επεξεργασίας (όπως και στο Βήμα 1, το πρόβλημα του μικτού ακέραιου προγραμματισμού μετατρέπεται και πάλι σε απλό πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο επιλύεται με τη μέθοδο που περιγράφεται στην Παράγραφο 4.2.2.1).

Βήμα 4. (Ενημέρωση των ορίων). Εάν η λύση του τρέχοντος υποπροβλήματος ικανοποιεί όλες τις συνθήκες και η τιμή της αντίστοιχης αντικειμενικής συνάρτησης είναι μικρότερη από το τρέχον ανώτερο όριο, τότε το ανώτερο όριο λαμβάνει την τιμή της τρέχουσας αντικειμενικής συνάρτησης και η τρέχουσα λύση αποθηκεύεται ως η τρέχουσα καλύτερη λύση. Από την άλλη πλευρά, εάν η λύση δεν ικανοποιεί όλες τις συνθήκες και η τιμή της αντίστοιχης αντικειμενικής συνάρτησης είναι μεταξύ του ανώτερου και κατώτερου ορίου, τότε το κατώτερο όριο λαμβάνει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Στη συνέχεια, το τρέχον πρόβλημα διακλαδίζεται και τα προκύπτοντα υποπροβλήματα προσθέτονται στη λίστα επεξεργασίας.

Βήμα 5. (Αποκοπή). Εάν η λύση που προκύπτει από το τρέχον πρόβλημα ικανοποιεί όλες τις συνθήκες, τότε δεν πραγματοποιείται περαιτέρω διακλάδωση. Επομένως, το συγκεκριμένο κλαδί ή διαφορετικά η συγκεκριμένη διακλάδωση αποκόπτεται ως αποτέλεσμα της ικανοποίησης των περιορισμών. Εάν η λύση δεν ικανοποιεί όλες τις συνθήκες και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι μεγαλύτερη από το τρέχον ανώτερο όριο, τότε δεν μπορεί να προκύψει καλύτερη λύση από τη συγκεκριμένη διακλάδωση. Επομένως, η συγκεκριμένη διακλάδωση αποκόπτεται εξαιτίας των ορίων. Εάν το τρέχον πρόβλημα είναι αδύνατο, τότε δε χρειάζεται περαιτέρω διακλάδωση στο συγκεκριμένο κλαδί. Επομένως, η συγκεκριμένη διακλάδωση αποκόπτεται εξαιτίας μη εφικτής λύσης.

Βήμα 6. (Εύρεση βέλτιστης λύσης). Εάν η λίστα επεξεργασίας δεν είναι κενή, τότε εκτελείται το βήμα 3. Διαφορετικά, η διαδικασία τερματίζει. Εάν υπάρχει εφικτή λύση που έχει αποθηκευτεί από προηγούμενη διακλάδωση ως τρέχουσα καλύτερη λύση, τότε αυτή είναι και η βέλτιστη λύση. Διαφορετικά, το πρόβλημα είναι αδύνατο.

¹ Εάν η συνάρτηση f περιλαμβάνει περισσότερες από μία ακέραιες μεταβλητές, η σειρά με την οποία επιλέγεται ποια από τις ακέραιες μεταβλητές θα είναι το κριτήριο για τη διαδικασία διακλάδωσης εξαρτάται από τη σειρά με την οποία εμφανίζεται η μεταβλητή στο διάνυσμα x . Αυτό σημαίνει ότι η σειρά με την οποία δηλώνονται οι ακέραιες μεταβλητές του προβλήματος επηρεάζει τον τρόπο διακλάδωσης και τον τρόπο με τον οποίο διατρέχεται ο χώρος των λύσεων, οδηγώντας ενδεχομένως σε διαφορετικό τρόπο σύγκλισης της μεθόδου και διαφορετική ποιότητα βέλτιστης λύσης, ανάλογα με τη σειρά που έχουν δηλωθεί οι μεταβλητές.

² Τα υποπροβλήματα που βρίσκονται στη λίστα επεξεργασίας μπορούν να επιλυθούν χρησιμοποιώντας τη στρατηγική πλάτους (*breadth-first*) ή τη στρατηγική βάθους (*depth-first*) ή συνδυασμό αυτών των δύο στρατηγικών.

Ο αλγόριθμος διακλάδωσης και φράγματος επιστρέφει την βέλτιστη λύση ή ενημερώνει ότι δεν υπάρχει εφικτή λύση είτε στο βήμα 1, είτε στο βήμα 6.

Η διαδικασία διακλάδωσης μπορεί να τερματιστεί για τρεις λόγους:

1. Το τρέχον πρόβλημα είναι αδύνατο.
2. Η τρέχουσα λύση ικανοποιεί όλες τις συνθήκες.
3. Το κατώτερο όριο που βρέθηκε είναι μεγαλύτερο από το ανώτερο όριο.

Η διακλάδωση επομένως αποκόπτεται εξαιτίας μη εφικτής λύσης, περιορισμών ή λόγω ορίων.

4.2.2.1 Ακολουθιακός Τετραγωνικός Προγραμματισμός

Για την επιτυχή επίλυση των υποπροβλημάτων που προκύπτουν (Βήμα 1 ή Βήμα 3 διαδικασίας διακλάδωσης και φράγματος), χρησιμοποιείται ο *Ακολουθιακός Τετραγωνικός Προγραμματισμός* (*Sequential Quadratic Programming*) [4.21][4.22], ο οποίος ενισχύει τη γρήγορη αναζήτηση και περαιώση των μη εφικτών ή κατώτερων λύσεων μη γραμμικού προγραμματισμού. Βάσει της συγκεκριμένης τεχνικής, πραγματοποιείται προσέγγιση, σε κάθε επανάληψη, της αντικειμενικής συνάρτησης $f(x)$ (η σύνθεση του διανύσματος x καθορίζεται από τα βήματα της μεθόδου διακλάδωσης και φράγματος) μέσω μιας τετραγωνικής προσέγγισης της συνάρτησης και των περιορισμών της, σύμφωνα με την εξίσωση (4.10). Με τον τρόπο αυτόν έχουμε προς επίλυση σε κάθε επανάληψη ένα πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού. Περισσότερες πληροφορίες για τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η τετραγωνική προσέγγιση υπάρχουν στις εργασίες [4.22][4.23][4.24].

$$L(x, \lambda) = f(x) + \sum_{j=1}^p \lambda_j \cdot G_j(x) + \sum_{k=1}^l \lambda_{k+p} \cdot H_k(x) \quad (4.10)$$

Αναλυτικότερα, η υλοποίηση του Ακολουθιακού Τετραγωνικού Προγραμματισμού πραγματοποιείται σε κάθε κύρια επανάληψη από μια θετικά καθορισμένη σχεδόν-Newton (*Quasi-Newton*) προσέγγιση του Εσιανού (*Hessian*) πίνακα χρησιμοποιώντας μόνο πρώτες παραγώγους, σύμφωνα με τον αλγόριθμο Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (*BFGS*). Κατόπιν, ο συγκεκριμένος πίνακας λαμβάνεται υπόψη για να δημιουργηθεί το υποπρόβλημα του τετραγωνικού προγραμματισμού (*QP subproblem*), του οποίου η λύση χρησιμοποιείται για να σχηματιστεί η κατεύθυνση αναζήτησης για την διαδικασία αναζήτησης επί γραμμής (*line search procedure*).

Η *BFGS* είναι μία σχεδόν-Newton μέθοδος, με μετρικές μεταβλητές (*Variable Metric-VM*), βασισμένη στη βαθμωτή μεταβολή. Οι σχεδόν-Newton μέθοδοι *VM* έχουν επίσης την ιδιότητα της τετραγωνικής σύγκλισης. Καθώς η λύση προσεγγίζεται, συμπεριφέρονται όπως η μέθοδος Newton (Μέθοδος Δεύτερης Τάξης). Τα πλεονεκτήματα της σχεδόν-Newton μεθόδου σε σχέση με τη μέθοδο Newton είναι ότι κατά τον υπολογισμό του Εσιανού Πίνακα, όπως επίσης και του αντιστρόφου του, μειώνεται το υπολογιστικό κόστος της διαδικασίας βελτιστοποίησης, υπολογίζοντας μόνο την πρώτη παράγωγο της αντικειμενικής συνάρτησης όπως επίσης ο Εσιανός πίνακας είναι πάντα θετικά ορισμένος. Ο τρόπος ενημέρωσης του Εσιανού πίνακα πραγματοποιείται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις ((4.11)-(4.13)).

$$S_i = -\text{Hessian}_i^{-1} \cdot \nabla f(x_i) \quad (4.11)$$

$$Y = \nabla f(x_{i+1}) + \sum_{j=1}^p \lambda_j \nabla G_j(x_{i+1}) + \sum_{k=1}^l \lambda_{k+p} \nabla H_k(x_{i+1}) - \left(\nabla f(x_i) + \sum_{j=1}^p \lambda_j \nabla G_j(x_i) + \sum_{k=1}^l \lambda_{k+p} \nabla H_k(x_i) \right) \quad (4.12)$$

$$\text{Hessian}_{i+1} = \text{Hessian}_i + \frac{Y \cdot Y^T}{Y^T \cdot S_i} - \frac{\text{Hessian}_i^T \cdot \text{Hessian}_i}{S_i^T \cdot \text{Hessian}_i \cdot S_i} \quad (4.13)$$

$$\Delta x = a^* \cdot S_i \quad (4.14)$$

Η κατεύθυνση αναζήτησης βέλτιστου (4.14) (δηλαδή η διαφορά Δx μεταξύ της επόμενης και της τρέχουσας τιμής του διανύσματος των μεταβλητών), αλλά και ο τρόπος ενημέρωσης του Εσιανού πίνακα προκύπτει από το διάνυσμα S_i και το βαθμωτό μέγεθος a^* τα οποία προσδιορίζονται από την επίλυση του υποπροβλήματος τετραγωνικού προγραμματισμού, σύμφωνα με τις σχέσεις (4.15)-(4.17).

$$\min_{Y \in \mathbb{R}^n} Y(S_i) = \frac{1}{2} \cdot Y^T \cdot \text{Hessian} \cdot Y + \nabla f(x_i)^T \cdot Y \quad (4.15)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$\nabla H_j(x_i) \cdot Y + H_j(x_i) = 0, \quad j = p+1, \dots, p+l \quad (4.16)$$

$$\nabla G_j(x_i) \cdot Y + G_j(x_i) \leq 0 \quad j = 1, \dots, p \quad (4.17)$$

Ανακεφαλαιώνοντας, η επίλυση του μαθηματικού μοντέλου του μικτού ακεραίου μη γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο αντιπροσωπεύει το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της σχεδίασης του μετασχηματιστή επιλύεται με τη μέθοδο διακλάδωσης και φράγματος, βρίσκοντας λύση σε μια ακολουθία από μη γραμμικά προβλήματα, τα οποία προκύπτουν «χαλαρώνοντας» τις υπάρχουσες συνθήκες και περιλαμβάνοντας επιπρόσθετους περιορισμούς. Στη συνέχεια, τα υποπροβλήματα που προκύπτουν από τη μέθοδο διακλάδωσης και φράγματος επιλύονται με τον ακολουθιακό τετραγωνικό προγραμματισμό, ο οποίος λύνει μια σειρά από υποπροβλήματα τετραγωνικού προγραμματισμού για τον καθορισμό της κατεύθυνσης αναζήτησης βέλτιστου.

4.3 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η επιστήμη των μηχανικών επιτρέπει την περιγραφή της συμπεριφοράς φυσικών συστημάτων με τη βοήθεια μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μία από τις πλέον χρησιμοποιούμενες μεθόδους για την αποδοτική επίλυση αυτών των εξισώσεων. Είναι μία μέθοδος πολύ γενική, η οποία εφαρμόζεται στην πλειοψηφία των προβλημάτων που συναντώνται στην πράξη: προβλήματα στατικά και μη στατικά, γραμμικά και μη γραμμικά, ορισμένα σε γεωμετρικό χώρο μίας, δύο ή τριών διαστάσεων. Επιπλέον, προσαρμόζεται με μεγάλη ευκολία σε διάφορα ετερογενή προβλήματα τα οποία μπορεί να αντιμετωπίσει ένας μηχανικός [4.25].

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, το εξεταζόμενο πεδίο αναπαρίσταται από μια ομάδα πεπερασμένων στοιχείων. Η διακριτοποίηση του χώρου πραγματοποιείται με τρίγωνα ή τετράεδρα, εάν το πρόβλημα είναι δισδιάστατο ή τρισδιάστατο, αντίστοιχα. Συνεπώς, ένα συνεχές φυσικό πρόβλημα μετατρέπεται σε διακριτό πρόβλημα πεπερασμένων στοιχείων με άγνωστες τιμές πεδίου στους κόμβους των κορυφών τους. Η επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος ανάγεται σε ένα αλγεβρικό σύστημα εξισώσεων και οι τιμές του πεδίου στο εσωτερικό των στοιχείων μπορούν να ανακτηθούν με τη χρήση των υπολογισμένων τιμών των κορυφών τους. Για την πραγματοποίηση των παραπάνω βημάτων, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων εμπλέκει τις παρακάτω μεθοδολογίες:

- μεθόδους μοντελοποίησης που χρησιμοποιούνται στην επιστήμη του μηχανικού για την κατάστρωση των μερικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν το εξεταζόμενο πρόβλημα,
- αριθμητικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την κατάστρωση και επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων,
- προγραμματισμό ηλεκτρονικού υπολογιστή για την αποδοτική εκτέλεση των υπολογισμών της μεθόδου.

Στην περίπτωση του μετασχηματιστή, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για την επίλυση του μαγνητοστατικού του πεδίου και την εξαγωγή του πεδίου σκέδασης και της τάσης βραχυκύκλωσης. Η ακριβής εκτίμηση της τάσης βραχυκύκλωσης κατά τη φάση σχεδίασης των μετασχηματιστών είναι ζωτικής σημασίας, καθώς, 1) αυξάνει την αξιοπιστία των μετασχηματιστών, 2) μειώνει το κόστος των υλικών, δεδομένου ότι χρησιμοποιείται μικρότερο περιθώριο ασφαλείας, 3) ελαχιστοποιεί την ανάγκη κατασκευής πρωτοτύπου μετασχηματιστών (για την επιβεβαίωση της ακρίβειας της σχεδίασης) καθώς και των δοκιμών βραχυκύκλωσης υπό ονομαστική τάση, οι οποίες είναι επίπονες και δαπανηρές, και 4) μειώνει το χρόνο παράδοσης των μετασχηματιστών.

Παρά το γεγονός ότι η δισδιάστατη μοντελοποίηση είναι κατάλληλη για την επίλυση πολλών προβλημάτων σχεδίασης, μπορεί να κριθεί ανεπαρκής για λεπτομερή ανάλυση και υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου, οπότε και απαιτείται η τρισδιάστατη μοντελοποίηση. Ειδικότερα, στην περίπτωση του εξεταζόμενου μετασχηματιστή διανομής τύπου τυλιγμένου πυρήνα, λόγω των ιδιαίτερων γεωμετρικών χαρακτηριστικών των πηνίων του (τα οποία δεν είναι κυκλικά, όπως στην περίπτωση των μετασχηματιστών τύπου στοιβαχτού πυρήνα), η υιοθέτηση τρισδιάστατης μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων συμβάλλει σημαντικά στην αύξηση της ακρίβειας πρόβλεψης των λειτουργικών χαρακτηριστικών του.

4.3.1 Εξισώσεις Πεδίου

Μαγνητοστατικά είναι τα προβλήματα στα οποία το μαγνητικό πεδίο είναι χρονικά αμετάβλητο. Σε αυτήν την περίπτωση, η ένταση ($\mathbf{H}$) και η πυκνότητα ($\mathbf{B}$) του μαγνητικού πεδίου (ή μαγνητική επαγωγή) ικανοποιούν τις σχέσεις:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (\text{διαφορική μορφή νόμου Ampere}) \quad (4.18)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{διαφορική μορφή νόμου Gauss}) \quad (4.19)$$

ενώ εν γένει συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση³:

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \quad (4.20)$$

όπου μ η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού, η οποία συνδέεται με τη μαγνητική διαπερατότητα του κενού μ_0 με τη σχέση:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (4.21)$$

όπου μ_r η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του υλικού.

Αν το μαγνητικό υλικό που εξετάζεται είναι μη γραμμικό, η μαγνητική διαπερατότητα είναι συνάρτηση της μαγνητικής επαγωγής και δίνεται από τη σχέση:

$$\mu = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{H}(\mathbf{B})} \quad (4.22)$$

Η επίλυση των εξισώσεων (4.18) και (4.19) στις τρεις διαστάσεις γίνεται με χρήση βαθμωτού μαγνητικού δυναμικού Φ (το οποίο χρησιμοποιείται συνήθως στην επίλυση τρισδιάστατων προβλημάτων). Στο μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκε για την επίλυση του μαγνητοστατικού πεδίου του μετασχηματιστή, υιοθετήθηκε μια ειδική μέθοδος βασισμένη σε βαθμωτό δυναμικό [4.26], σύμφωνα με την οποία, η ένταση του μαγνητικού πεδίου $\mathbf{H}$ χωρίζεται σε μία περιστροφική και μία μη περιστροφική συνιστώσα, ως εξής:

$$\mathbf{H} = \mathbf{K} - \nabla \Phi \quad (4.23)$$

όπου το Φ είναι το βαθμωτό δυναμικό σε όλο το χώρο του εξεταζόμενου προβλήματος το οποίο ικανοποιεί την εξίσωση (4.24) (εξίσωση Laplace), ενώ το $\mathbf{K}$ είναι ένα διάνυσμα (εικονική κατανομή πεδίου), το οποίο αντιστοιχεί στο χώρο του πεδίου των πηγών ρεύματος (δηλαδή στο χώρο των πηνίων):

³ Εκτός από την περίπτωση μονίμων μαγνητών.

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (4.24)$$

όπου Φ είναι το βαθμωτό μαγνητικό δυναμικό.

Το παραπάνω διάνυσμα ικανοποιεί το νόμο του Ampere $\oint_C \mathbf{K} d\mathbf{l} = NI$, για οποιαδήποτε τυχαία διαδρομή εντός του υποχώρου των πηνίων (οπότε και δεν υπάρχει ανάγκη υπολογισμού του πεδίου των πηγών με το νόμο *Biot-Savart*), οδηγώντας σε μεγαλύτερη ακρίβεια και μικρότερο υπολογιστικό φόρτο κατά την εκτέλεση των υπολογισμών της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

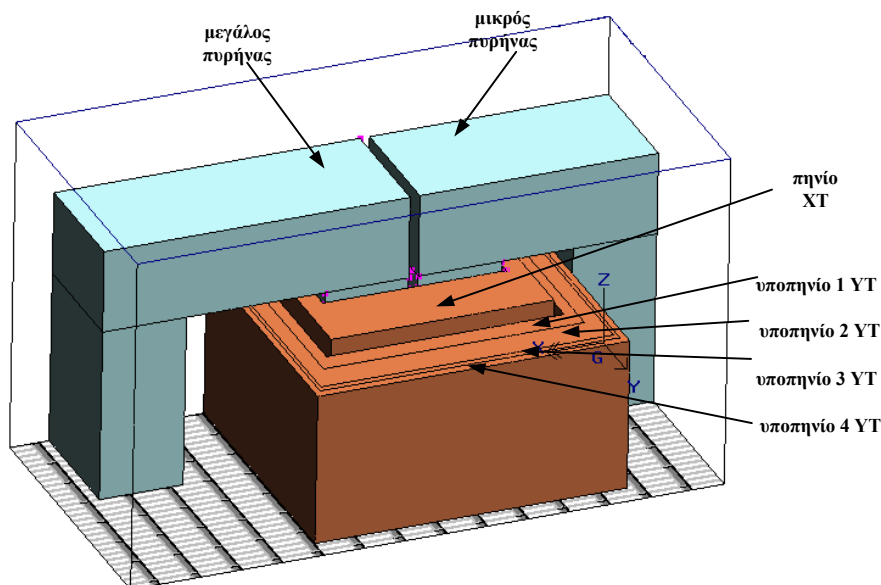
4.3.2 Οριακές Συνθήκες

Η μοναδικότητα της λύσης που προκύπτει από τη μερική διαφορική εξίσωση (4.24) εξασφαλίζεται με ορισμό των κατάλληλων οριακών συνθηκών, των τιμών δηλαδή του Φ ή της κάθετης παραγώγου του $\frac{\partial \Phi}{\partial n}$ στο σύνορο του εξεταζόμενου πεδίου. Οι οριακές συνθήκες μπορεί να είναι τριών ειδών:

1. *Dirichlet*: στην περίπτωση του βαθμωτού δυναμικού, η επιβολή αυτής της συνθήκης σε ένα σύνορο περιγράφεται με την επιβολή μηδενικής τιμής για το δυναμικό ($\Phi=0$) πάνω σε αυτό το σύνορο.
2. *Neumann*: η οριακή συνθήκη Neumann επιβάλλεται με μηδενισμό της κάθετης παραγώγου του βαθμωτού δυναμικού στο αντίστοιχο σύνορο ($\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$).
3. *Robin (ή μικτές)*: αποτελεί συνδυασμό των παραπάνω οριακών συνθηκών.

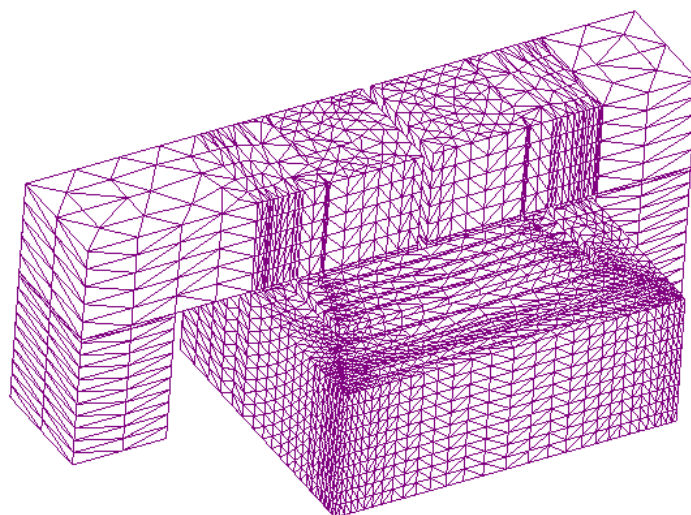
4.3.3 Γεωμετρία Μοντέλου Μετασχηματιστή

Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την αναπαράσταση της γεωμετρίας των πραγματικών τριφασικών μετασχηματιστών [4.27]. Το μοντέλο περιλαμβάνει τα τυλίγματα υψηλής (YT) και χαμηλής τάσης (XT) μιας φάσης, καθώς και το μικρό και μεγάλο πυρήνα που τα περιβάλλει. Το ενεργό μέρος περικλείεται σε κουτί αέρα, με διαστάσεις ίσες με αυτές του δοχείου του μετασχηματιστή, περιορίζοντας έτσι τον υπολογισμό του πεδίου σε αυτό το χώρο. Το επίπεδο xy του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων είναι το επίπεδο συμμετρίας του προβλήματος, ενώ ο άξονας z διέρχεται από το επίπεδο συμμετρίας των πυρήνων. Λόγω των συμμετριών του προβλήματος, το πεδίο ορισμού μειώνεται στο ένα όγδοο της διάταξης. Οι συμμετρίες λαμβάνονται υπόψη με την επιβολή της οριακής συνθήκης *Dirichlet* ($\Phi=0$) κατά μήκος του επιπέδου xy και *Neumann* ($\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$) κατά μήκος των επιπέδων yz , xz και των τριών εξωτερικών όψεων του κουτιού αέρα. Όσον αφορά στα χαρακτηριστικά του σιδήρου θεωρήθηκε ότι η καμπύλη μαγνητικής του $B-H$ είναι γραμμική με τιμή σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας $\mu_r = 1000$. Η παραδοχή της γραμμικότητας είναι απόλυτα δικαιολογημένη δεδομένου ότι κατά το βραχυκύκλωμα η μαγνητική επαγωγή στον πυρήνα είναι πολύ μικρότερη από εκείνη του γόνατου κορεσμού της χαρακτηριστικής του σιδήρου [4.27], ενώ η τιμή μαγνητικής διαπερατότητας που χρησιμοποιείται είναι τυπική για την περίπτωση βραχυκυκλώματος.



Σχήμα 4.1 Προοπτική όψη της μίας φάσης του τριφασικού μετασχηματιστή που χρησιμοποιήθηκε για τη διαμόρφωση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.

Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στη λεπτομερή κατασκευή του πλέγματος, ιδιαίτερα στην περιοχή των πηνίων η οποία επηρεάζει σημαντικά τον υπολογισμό του πεδίου σκέδασης. Η μοντελοποίηση των καναλιών επηρεάζει τόσο τον υπολογισμό της εικονικής κατανομής πεδίου όσο και την κατασκευή του πλέγματος του ενεργού μέρους του μετασχηματιστή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Κατά την κατασκευή του πλέγματος στο οποίο λαμβάνονται υπόψη τα κανάλια ψύξης, το τμήμα του πηνίου το οποίο βγαίνει από το παράθυρο του πυρήνα πρέπει να χωριστεί σε περισσότερες στρώσεις πεπερασμένων στοιχείων, κάποιες από τις οποίες θα αναπαριστούν το χώρο των καναλιών.



Σχήμα 4.2 Πλέγμα μετασχηματιστή με αναπαράσταση των καναλιών.

4.3.4 Διακριτοποίηση των Εξισώσεων Πεδίου και Αναπαράστασή τους στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μερική διαφορική εξίσωση (4.24) σε συνδυασμό με την εξίσωση (4.23) διακριτοποιούνται υπό τη μορφή πινάκων, οι οποίοι δίνουν την παράγωγο της συναρτησιακής ως προς μεταβολές του δυναμικού όλων των κόμβων που αποτελούν το πλέγμα των

πεπερασμένων στοιχείων του εξεταζόμενου χώρου. Συνεπώς, εξισώνοντας τις παραγώγους με μηδέν, προκύπτει σύστημα της μορφής:

$$[S] \cdot [\Phi] = [F] \quad (4.25)$$

όπου $[S]$ είναι τετραγωνικός πίνακας, διάστασης ίσης με τον αριθμό των κόμβων του πλέγματος, ο οποίος καλείται πίνακας ακαμψίας, ενώ $[\Phi]$ είναι το διάνυσμα των τιμών του δυναμικού στους κόμβους και $[F]$ το διάνυσμα των πηγών. Η επίλυση της παραπάνω εξίσωσης δίνει την τιμή του βαθμωτού δυναμικού Φ σε κάθε κόμβο του πλέγματος, η οποία χρησιμοποιείται για την εξαγωγή όλων των υπολοίπων μεγεθών του πεδίου (ένταση του μαγνητικού πεδίου, μαγνητική επαγωγή) τα οποία είναι αναγκαία για τον υπολογισμό των απωλειών και του πεδίου σκέδασης του μετασχηματιστή.

4.3.5 Υπολογισμός Τάσης Βραχυκύκλωσης με τη Χρήση των Αποτελεσμάτων της Τρισδιάστατης Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων

Ο υπολογισμός της τάσης βραχυκύκλωσης στηρίζεται στη συνολική μαγνητική ενέργεια του μετασχηματιστή κατά τη δοκιμή βραχυκύκλωσης, με τη διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια. Η συνολική μαγνητική ενέργεια προκύπτει από την ένταση του μαγνητικού πεδίου (H) και τη μαγνητική επαγωγή (B) σε κάθε τετράεδρο του πλέγματος αθροίζοντας το γινόμενο $\frac{1}{2} B \cdot H \cdot V_{\text{τετράεδρου}}$ όλων των τετραέδρων (πραγματοποιώντας έτσι ουσιαστικά

ολοκλήρωση της στοιχειώδους πυκνότητας μαγνητικής ενέργειας $\frac{dW_m}{dV}$ σε όλο τον όγκο του πλέγματος).

Σε συνθήκες δοκιμής βραχυκύκλωσης ισχύει:

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot (L_{\sigma 1} \cdot I_1^2 + L_{\sigma 2} \cdot I_2^2) \quad (4.26)$$

όπου W_m η συνολική αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια, I_1 και I_2 τα ρεύματα πρωτεύοντος και δευτερεύοντος και $L_{\sigma 1}$ και $L_{\sigma 2}$ οι αντιδράσεις σκέδασης του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος, αντίστοιχα. Αν $a = n_1/n_2$ είναι ο λόγος σπειρών πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος, η (4.26) μετασχηματίζεται ως εξής:

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot \left(L_{\sigma 1} \cdot \frac{I_2^2}{n_1^2} + L_{\sigma 2} \cdot I_2^2 \right) \quad (4.27)$$

καταλήγοντας έτσι στη μορφή

$$\frac{2 \cdot W_m}{n_2^2 \cdot I_2^2} = \frac{L_{\sigma 1}}{n_1^2} + \frac{L_{\sigma 2}}{n_2^2} \quad (4.28)$$

Αν $N \cdot I$ είναι τα αμπερελίγματα του πηνίου χαμηλής τάσης (ίσα με τα αμπερελίγματα του πηνίου υψηλής τάσης στην περίπτωση του βραχυκυκλώματος), η (4.28) γράφεται ως εξής:

$$\frac{2 \cdot W_m}{(N \cdot I)^2} = \frac{L_{\sigma 1}}{n_1^2} + \frac{L_{\sigma 2}}{n_2^2} \quad (4.29)$$

οπότε η συνολική αυτεπαγωγή σκέδασης των τυλιγμάτων δίνεται από την (4.30):

$$L_{\sigma \text{ολ}} = \frac{2 \cdot W_m}{(N \cdot I)^2} \quad (4.30)$$

Έχοντας υπολογίσει τη συνολική αυτεπαγωγή σκέδασης των τυλιγμάτων, η αντίστοιχη επαγωγική πτώση τάσης (ανηγμένη στο δευτερεύον τύλιγμα, το οποίο στην περίπτωση του εξεταζόμενου μετασχηματιστή είναι το τύλιγμα χαμηλής τάσης) δίνεται από τη σχέση:

$$IX = \frac{I_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot n_2^2 \cdot L_{\sigma\sigma\lambda}}{V_2} \quad (4.31)$$

οπότε η τάση βραχυκύκλωσης U_{sc} υπολογίζεται από την (4.32):

$$U_{sc} (\%) = \sqrt{(IX)^2 + (IR)^2} \quad (4.32)$$

όπου IR είναι η ωμική πτώση τάσης των τυλιγμάτων.

4.4 ΜΕΘΟΔΟΣ ΜΙΚΤΟΥ ΑΚΕΡΑΙΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΛΑΔΩΣΗΣ ΚΑΙ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ ΤΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

4.4.1 Βήματα/Πορεία Επίλυσης του Προβλήματος Βέλτιστης Σχεδίασης Μετασχηματιστή Διανομής

Για την εύρεση κατάλληλης μεθοδολογίας η οποία να είναι ικανή να επιλύσει με επιτυχία το πολύπλοκο πρόβλημα της βέλτιστης σχεδίασης ενός μετασχηματιστή, ελαχιστοποιώντας το κόστος κατασκευής του με ταυτόχρονη ικανοποίηση όλων των περιορισμών, πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική έρευνα (Κεφάλαιο 1).

Λαμβάνοντας υπόψη την υφιστάμενη μεθοδολογία της βιομηχανίας κατασκευής μετασχηματιστών αρχικά έγινε μια προσπάθεια να αντιμετωπισθούν επιτυχώς τα μειονεκτήματά της, τα οποία παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2. Συγκεκριμένα, αναπτύχθηκε μία καινοτομική μεθοδολογία σε συνδυασμό με τη μέθοδο των δέντρων απόφασης για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης των μετασχηματιστών. Η μεθοδολογία στηριζόταν στο σκελετό των αναλυτικών υπολογισμών της υφιστάμενης ευρετικής μεθόδου σχεδίασης (όπως αυτές παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2), αξιοποιώντας τα δέντρα απόφασης ως μέσο για τον καθορισμό των τιμών πληθώρας παραμέτρων εισόδου οι οποίες χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς αυτούς. Συνεπώς, η μεθοδολογία χρησιμοποιεί μόνο 10 παραμέτρους εισόδου. Η προτεινόμενη μεθοδολογία συγκρίθηκε με την υφιστάμενη μεθοδολογία που χρησιμοποιεί 134 παραμέτρους εισόδου. Το βασικότερο πλεονέκτημα της προτεινόμενης τεχνικής αποτελεί το γεγονός ότι έχει τη δυνατότητα να βρίσκει πάντα μία σχεδόν βέλτιστη λύση, σε ελάχιστο υπολογιστικό χρόνο. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία έχει αναπτυχθεί σε λογισμικό με κατάλληλο γραφικό περιβάλλον (με τη βοήθεια της γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic), η χρήση του οποίου δεν απαιτεί εμπειρία στη σχεδίαση μετασχηματιστών [4.28]. Όμως, οι παραπάνω αλλαγές που υλοποιήθηκαν οδήγησαν σε βέλτιστες σχεδιάσεις μετασχηματιστών με κατασκευαστικό κόστος κατά μέσο όρο 4.23% περίπου μεγαλύτερο σε σχέση με την υφιστάμενη μεθοδολογία σχεδίασης. Συνεπώς, παρόλο που αντιμετωπίστηκαν κάποια από τα μειονεκτήματα της υφιστάμενης μεθοδολογίας, με κυριότερο το σημαντικό αριθμό παραμέτρων εισόδου, το τίμημα για αυτό ήταν η προτεινόμενη τεχνική να εντοπίζει βέλτιστη λύση περίπου 4.23% ακριβότερη από την υφιστάμενη μεθοδολογία. Αυτό οδήγησε στην ανάγκη αναζήτησης καταλληλότερης μεθόδου επίλυσης του προβλήματος της βέλτιστης σχεδίασης των μετασχηματιστών που να μειώνει το κόστος κατασκευής, δίνοντας ολικά βέλτιστες σχεδιάσεις, οι οποίες δε μπορούν να εντοπιστούν από την ευρετική τεχνική που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2. Για το σκοπό αυτό, η έρευνα στράφηκε προς την επιλογή ντετερμινιστικής (αιτιοκρατικής) μεθόδου βελτιστοποίησης η οποία διατρέχει όλο το πεδίο ορισμού των μεταβλητών σχεδίασης, ξεπερνώντας τη δυσκολία των ευρετικών μεθόδων, οι οποίες περιορίζονται σε διακριτές τιμές των μεταβλητών αυτών.

Μετά το πέρας βιβλιογραφικής έρευνας, μεταξύ των υφιστάμενων αιτιοκρατικών μεθόδων βελτιστοποίησης, επιλέχθηκε η τεχνική του μικτού ακέραιου προγραμματισμού ως

η πλέον κατάλληλη μεθοδολογία επίλυσης του προβλήματος, βελτιστοποιώντας αρχικά το ενεργό μέρος του μετασχηματιστή και στη συνέχεια και το μηχανικό μέρος. Η μέθοδος επιλέχθηκε λόγω της ικανότητάς της να εξασφαλίζει τη σωστή πορεία εύρεσης της βέλτιστης σχεδίασης, ακολουθώντας τμηματική βελτιστοποίηση και λόγω της καταλληλότητάς της για το πρόβλημα της σχεδίασης μετασχηματιστή, το οποίο εμπλέκει τόσο συνεχείς όσο και διακριτές μεταβλητές σχεδίασης. Η νέα μοντελοποίηση του μετασχηματιστή υλοποιήθηκε με τη βοήθεια της μαθηματικής γλώσσας προγραμματισμού Matlab, δημιουργώντας ένα πλήρες πακέτο βελτιστοποίησης της σχεδίασης των μετασχηματιστών διανομής, ενσωματώνοντας μια πληθώρα εργαλείων σχεδίασης, ανάλυσης, βελτιστοποίησης και οπτικοποίησης της βέλτιστης λύσης (Παράρτημα Α). Παρακάτω περιγράφεται η πορεία που ακολουθήθηκε για την ολοκλήρωση της εφαρμογής της προτεινόμενης τεχνικής στη συνολική σχεδίαση του μετασχηματιστή διανομής.

Αρχικά η συγκεκριμένη τεχνική εφαρμόστηκε στη βελτιστοποίηση του κόστους του ενεργού μέρους του μετασχηματιστή, το οποίο αποτελεί και την καρδιά της σχεδίασης, και πραγματοποιήθηκε σύγκριση με την υφιστάμενη τεχνική που χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία κατασκευής μετασχηματιστών [4.29]. Τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά, επιτυγχάνοντας 2.67% φθηνότερο κόστος του ενεργού μέρους σε σύγκριση με αυτό που σχεδίαζε η βιομηχανία κατασκευής μετασχηματιστών.

Στη συνέχεια, έχοντας ως στόχο τη βελτίωση της προηγούμενης πρώτης προσέγγισης, η προτεινόμενη μεθοδολογία επίλυσης του προβλήματος της βέλτιστης σχεδίασης του μετασχηματιστή επεκτάθηκε με παράλληλες υλοποιήσεις του μικτού ακέραιου προγραμματισμού ενσωματώνοντας την τεχνική των πεπερασμένων στοιχείων, επιλύοντας ταυτόχρονα ένα πλήθος υποπροβλημάτων του κύριου προβλήματος, ανάλογα με τις αρχικές συνθήκες που έχει ορίσει ο χρήστης [4.30]. Τα αποτελέσματα και σε αυτήν την περίπτωση απέδειξαν την επιτυχή πορεία επίλυσης του προβλήματος της βέλτιστης σχεδίασης του μετασχηματιστή μέσω της εφαρμογής του μικτού ακέραιου προγραμματισμού, επιτυγχάνοντας 3.94% φθηνότερο κόστος του ενεργού μέρους σε σύγκριση με αυτό που σχεδίαζε η βιομηχανία.

Έχοντας τοποθετήσει τα θεμέλια της βέλτιστης σχεδίασης του μετασχηματιστή, το επόμενο βήμα ήταν να μοντελοποιηθεί ολόκληρη η σχεδίαση, ενσωματώνοντας στην αντικειμενική συνάρτηση του αλγόριθμου βελτιστοποίησης όχι μόνο το κόστος του ενεργού μέρους αλλά και το κόστος του μηχανικού μέρους του μετασχηματιστή. Αναλυτικότερα, η γενίκευση της προτεινόμενης μεθοδολογίας επίλυσης του προβλήματος της βέλτιστης σχεδίασης του μετασχηματιστή περιλάμβανε την εφαρμογή του μικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού σε συνδυασμό με κατάλληλο ορισμό των διαστημάτων και του τρόπου μεταβολής σημαντικών παραμέτρων της σχεδίασης (όπως είναι η πυκνότητα ρεύματος των πηνίων) και την τεχνική των πεπερασμένων στοιχείων, καταλήγοντας σε μία καινοτομική υβριδική τεχνική ικανή να εξασφαλίσει ολική βέλτιστη λύση [4.31]. Η ολοκληρωμένη αυτή μέθοδος [4.31] αναλύεται στις παρακάτω υποενότητες, παρουσιάζοντας τον τρόπο μοντελοποίησης της σχεδίασης του μετασχηματιστή ως ένα πρόβλημα μικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού και τη μέθοδο με την οποία επιλύεται.

4.4.2 Αντικειμενική Συνάρτηση

Στο πρόβλημα της βέλτιστης σχεδίασης του μετασχηματιστή χρησιμοποιούνται πέντε διαφορετικά είδη αντικειμενικών συναρτήσεων. Οι κατασκευαστές μετασχηματιστών ανάλογα με τις απαιτήσεις που θέτουν, χρησιμοποιούν τις αντίστοιχες αντικειμενικές συναρτήσεις. Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων είναι η συνάρτηση του κόστους των οκτώ κύριων υλικών.

4.4.2.1 Ελαχιστοποίηση Κόστους Ενεργού Μέρους Μετασχηματιστή

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος της βέλτιστης σχεδίασης του κόστους του ενεργού μέρους του μετασχηματιστή αποτελείται από το συνολικό κόστος των τεσσάρων κύριων υλικών του μετασχηματιστή, ACP (σε €):

$$\min ACP = \min \sum_{j=1}^4 c_j \cdot f_j(\underline{x}) \quad (4.33)$$

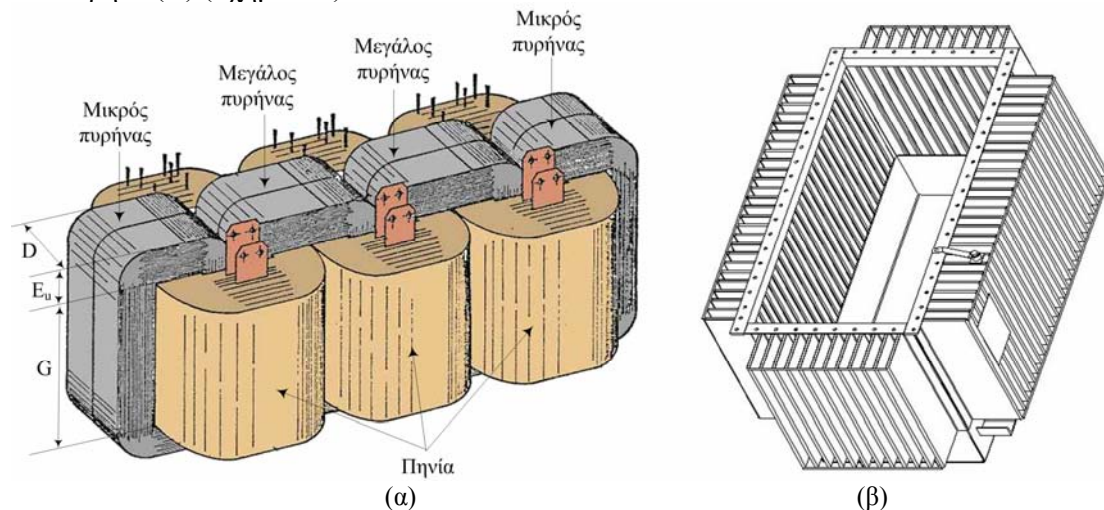
όπου c_j είναι το μοναδιαίο κόστος (€/kg) και $f_j(\underline{x})$ το βάρος (kg) του καθενός από τα τέσσερα κύρια υλικά του μετασχηματιστή (Σχήμα 4.3), και $\underline{x}$ είναι το διάνυσμα των τεσσάρων μεταβλητών σχεδίασης: 1) αριθμός σπειρών του πηνίου χαμηλής τάσης, 2) ονομαστική μαγνητική επαγωγή λειτουργίας, 3) πλάτος σκέλους του πυρήνα (D) και 4) ύψος παραθύρου του πυρήνα (G) (Σχήμα 4.3).

4.4.2.2 Ελαχιστοποίηση Κόστους Οκτώ Κύριων Υλικών

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος της βέλτιστης σχεδίασης του κόστους του ενεργού και μηχανικού μέρους του μετασχηματιστή αποτελείται από το συνολικό κόστος των οκτώ κύριων υλικών του μετασχηματιστή, MMC (σε €):

$$\min MMC = \min \sum_{j=1}^8 c_j \cdot f_j(\underline{x}) \quad (4.34)$$

όπου c_j είναι το μοναδιαίο κόστος (€/kg) και $f_j(\underline{x})$ το βάρος (kg) του καθενός από τα οκτώ κύρια υλικά του μετασχηματιστή (Σχήμα 4.3), και $\underline{x}$ είναι το διάνυσμα των τεσσάρων μεταβλητών σχεδίασης: 1) αριθμός σπειρών του πηνίου χαμηλής τάσης, 2) ονομαστική μαγνητική επαγωγή λειτουργίας, 3) πλάτος σκέλους του πυρήνα (D) και 4) ύψος παραθύρου του πυρήνα (G) (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3 (α) το ενεργό μέρος του μετασχηματιστή με τις βασικές διαστάσεις του πυρήνα, (β) το μηχανικό μέρος του μετασχηματιστή.

Αναλυτικότερα,

- f_1 είναι το συνολικό βάρος των τριών πηνίων χαμηλής τάσης (kg) και c_1 είναι το μοναδιαίο κόστος του αγωγού του πηνίου χαμηλής τάσης (€/kg)
- f_2 είναι το συνολικό βάρος των τριών πηνίων υψηλής τάσης (kg) και c_2 είναι το μοναδιαίο κόστος του αγωγού του πηνίου υψηλής τάσης (€/kg)
- f_3 είναι το συνολικό βάρος των τεσσάρων πυρήνων του μετασχηματιστή (kg) και c_3 είναι το μοναδιαίο κόστος μαγνητικής λαμαρίνας (€/kg)
- f_4 είναι το συνολικό βάρος των μονωτικών χαρτιών (kg) και c_4 είναι το μοναδιαίο κόστος του μονωτικού χαρτιού (€/kg)
- f_5 είναι το συνολικό βάρος των καναλιών (kg) και c_5 είναι το μοναδιαίο κόστος των καναλιών (€/kg)

- f_6 είναι το συνολικό βάρος του μονωτικού λαδιού (kg) και c_6 είναι το μοναδιαίο κόστος του μονωτικού λαδιού (€/kg)
- f_7 είναι το βάρος των πανέλων (kg) και c_7 είναι το μοναδιαίο κόστος του ψυκτικού πανέλου (€/kg)
- f_8 είναι το συνολικό βάρος του φύλλου λαμαρίνας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή συγκεκριμένων τμημάτων του μετασχηματιστή όπως για παράδειγμα τις πλευρικές επιφάνειες του δοχείου ή του δοχείου διαστολής και c_8 είναι το κόστος του σιδήρου (€/kg)
- f είναι το κόστος (€) των οκτώ κύριων υλικών του μετασχηματιστή.

4.4.2.3 Ελαχιστοποίηση Κατασκευαστικού Κόστους

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος της βέλτιστης σχεδίασης του κατασκευαστικού κόστους του μετασχηματιστή, TMC (σε €), αποτελείται από το παρακάτω άθροισμα:

$$\min TMC = \min(MMC + CRM + LC) \quad (4.35)$$

όπου MMC είναι το κόστος των οκτώ κύριων υλικών (σε €), CRM είναι το κόστος των υπόλοιπων υλικών του μετασχηματιστή (σε €) και LC είναι το κόστος των εργατικών (σε €).

4.4.2.4 Ελαχιστοποίηση Συνολικού Κόστους Κατοχής

Η αντικειμενική συνάρτηση του συνολικού κόστους κατοχής του μετασχηματιστή, TOC (σε €), δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\min TOC = \min \left(\underbrace{\left(\frac{TMC}{1 - SM} \right)}_{BP} + A \cdot NLL + B \cdot LL \right) \quad (4.36)$$

όπου TMC είναι το κατασκευαστικό κόστος του μετασχηματιστή (σε €), SM είναι το περιθώριο κέρδους από την πώληση του μετασχηματιστή (σε €), A είναι ο συντελεστής απωλειών κενού φορτίου του μετασχηματιστή (σε €/W), NLL είναι οι απώλειες κενού φορτίου του μετασχηματιστή (σε W), B είναι ο συντελεστής απωλειών φορτίου του μετασχηματιστή (σε €/W), και LL είναι οι απώλειες φορτίου του μετασχηματιστή (σε W). Να επισημανθεί ότι BP είναι η τιμή πώλησης του μετασχηματιστή (σε €).

Επίσης, πρέπει να αναφερθεί ότι οι συντελεστές απωλειών κενού φορτίου και φορτίου (A και B), στην περίπτωση που δεν είναι δεδομένοι, μπορούν να υπολογιστούν σύμφωνα με τις τεχνικές που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5.

4.4.2.5 Ελαχιστοποίηση Συνολικού Κόστους Κατοχής με Περιβαλλοντικό κόστος

Η αντικειμενική συνάρτηση του συνολικού κόστους κατοχής του μετασχηματιστή λαμβάνοντας υπόψη το περιβαλλοντογικό κόστος, TOC_e (σε €), δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\min TOC_e = \min(TOC + A_e \cdot \Delta P_{NLL} + B_e \cdot \Delta P_{LL}) \quad (4.37)$$

όπου TOC είναι το συνολικό κόστος κατοχής του μετασχηματιστή (σε €), A_e είναι ο συντελεστής περιβαλλοντογικού κόστους λόγω των απωλειών κενού φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή (σε €/kW), B_e είναι ο συντελεστής περιβαλλοντογικού κόστους λόγω των απωλειών φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή (σε €/kW), ΔP_{NLL} είναι η διαφορά απωλειών κενού φορτίου μεταξύ του αξιολογούμενου μετασχηματιστή και του μετασχηματιστή αναφοράς (σε kW) και ΔP_{LL} είναι η διαφορά απωλειών φορτίου μεταξύ του αξιολογούμενου μετασχηματιστή και του μετασχηματιστή αναφοράς (σε kW).

4.4.3 Περιορισμοί

Για την ορθή διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης σχεδίασης μετασχηματιστή απαιτείται η διατύπωση ενός συνόλου περιορισμών που θα εξασφαλίζει αποδεκτές λύσεις, δηλαδή λύσεις που θα ανταποκρίνονται στο περιγραφόμενο πρόβλημα. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, η πλειονότητα των περιορισμών εκφράζονται ως περιορισμοί ανισοτήτων. Το σύνολο των περιορισμών του προβλήματος θα πρέπει να ικανοποιείται ώστε η σχεδίαση να θεωρείται επιτρεπτή. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι περιορισμοί του προβλήματος της βέλτιστης σχεδίασης του μετασχηματιστή.

4.4.3.1 Περιορισμός Επαγόμενης Τάσης

Ο περιορισμός της επαγόμενης τάσης εκφράζει τη σχέση μεταξύ της επαγόμενης τάσης στο δευτερεύον τυλίγμα (τυλίγμα χαμηλής τάσης) και τη μαγνητική επαγωγή, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$E_2 = 4.44 \cdot f \cdot turns_{LV} \cdot B_G \cdot 2 \cdot CSF \cdot E_u \cdot D \quad (4.38)$$

4.4.3.2 Περιορισμός Λόγου Σπειρών

Ο λόγος των τάσεων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος ισούται με το λόγο του αριθμού των σπειρών των αντίστοιχων τυλιγμάτων (τυλίγματος υψηλής και χαμηλής τάσης), σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{U_{HV}}{U_{LV}} = \frac{turns_{HV}}{turns_{LV}} \quad (4.39)$$

όπου U_{HV} είναι η τάση του πηνίου υψηλής τάσης, U_{LV} είναι η τάση του πηνίου χαμηλής τάσης, $turns_{HV}$ είναι ο αριθμός των σπειρών του πηνίου υψηλής τάσης και $turns_{LV}$ είναι ο αριθμός των σπειρών του πηνίου χαμηλής τάσης.

4.4.3.3 Περιορισμός Απωλειών Κενού Φορτίου

Οι απώλειες κενού φορτίου (NLL) πρέπει να είναι μικρότερες από τις μέγιστες απώλειες κενού φορτίου (NLL_{max}), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$NLL < NLL_{max} \quad (4.40)$$

4.4.3.4 Περιορισμός Απωλειών Φορτίου

Οι απώλειες φορτίου (LL) απαιτείται να είναι μικρότερες από τις μέγιστες απώλειες φορτίου (LL_{max}), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$LL < LL_{max} \quad (4.41)$$

4.4.3.5 Περιορισμός Συνολικών Απωλειών (Κενού Φορτίου και Φορτίου)

Οι συνολικές απώλειες (OTL) (κενού φορτίου και φορτίου) απαιτείται να είναι μικρότερες από τις μέγιστες απώλειες (OTL_{max}), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$OTL < OTL_{max} \quad (4.42)$$

4.4.3.6 Περιορισμός Τάσης Βραχυκύκλωσης

Η σχεδιασμένη τάση βραχυκύκλωσης (U_{sc}) πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ της ελάχιστης ($U_{sc,min}$) και μέγιστης ($U_{sc,max}$) επιτρεπόμενης τάσης βραχυκύκλωσης, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$U_{sc,min} < U_{sc} < U_{sc,max} \quad (4.43)$$

4.4.3.7 Περιορισμός Μαγνητικής Επαγωγής

Ένας ακόμη περιορισμός που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι η σχεδιασμένη μαγνητική επαγωγή (B_G) επιβάλλεται να είναι μικρότερη από τη μαγνητική επαγωγή που αντιστοιχεί σε κορεσμό του υλικού του πυρήνα ($B_{\max}$), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$B_G < B_{\max} \quad (4.44)$$

4.4.3.8 Περιορισμός Μετάδοσης Θερμότητας

Οι συνολικές απώλειες του μετασχηματιστή (TTL) απαιτείται να είναι μικρότερες από τις απώλειες που απάγονται μέσω ακτινοβολίας από το δοχείο του μετασχηματιστή και των πτυχωτών ελασμάτων του ($TankLoss$), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$TTL < TankLoss \quad (4.45)$$

4.4.3.9 Περιορισμός Ανύψωσης Θερμοκρασίας

Η ανύψωση της θερμοκρασίας του μετασχηματιστή ($\Delta\Theta$) (εξαιτίας των απωλειών φορτίου και κενού φορτίου) πρέπει να είναι μικρότερη από τη μέγιστη επιτρεπόμενη ανύψωση της θερμοκρασίας του μετασχηματιστή ($\Delta\Theta_{\max}$), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\Delta\Theta < \Delta\Theta_{\max} \quad (4.46)$$

4.4.3.10 Περιορισμός Απόδοσης Μετασχηματιστή

Η απόδοση του μετασχηματιστή (n) πρέπει να είναι μεγαλύτερη από μια δεδομένη τιμή απόδοσης ($n_{\min}$), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$n > n_{\min} \quad (4.47)$$

4.4.3.11 Περιορισμός Ρεύματος Κενού Φορτίου (Ρεύματος Μαγνήτισης⁴)

Το ρεύμα κενού φορτίου (I_m)(ρεύμα μαγνήτισης) του μετασχηματιστή πρέπει να είναι μικρότερο από μια μέγιστη τιμή ρεύματος κενού φορτίου ($I_{m,\max}$) (ρεύματος μαγνήτισης), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$I_m < I_{m,\max} \quad (4.48)$$

4.4.3.12 Περιορισμός Ρύθμισης Τάσης

Η ρύθμιση τάσης (VR) στο μετασχηματιστή πρέπει να είναι μικρότερη από μια μέγιστη τιμή ρύθμισης τάσης ($VR_{\max}$), σύμφωνα με την εξίσωση:

$$VR < VR_{\max} \quad (4.49)$$

4.4.3.13 Περιορισμός Αντοχής των Μονωτικών

Το πάχος της μόνωσης πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να εξασφαλίζει αντοχή σε δοκιμή επαγόμενης και κρουστικής τάσης. Ειδικότερα η επαγόμενη τάση ($Induced_{LV}$ και $Induced_{HV}$) πρέπει να είναι μικρότερη από τη μέγιστη επαγόμενη τάση που μπορεί να αντέξει η μόνωση ($Induced_{LV,\max}$ και $Induced_{HV,\max}$), σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned} Induced_{LV} &< Induced_{LV,\max} \\ Induced_{HV} &< Induced_{HV,\max} \end{aligned} \quad (4.50)$$

⁴ Το ρεύμα κενού φορτίου ονομάζεται και ρεύμα μαγνήτισης και εκφράζει το ρεύμα που απορροφά ο μετασχηματιστής όταν δεν έχει φορτίο, είναι πολύ μικρό και είναι τόσο ώστε να μαγνητιστεί ο πυρήνας.

και η κρουστική τάση ($Impulse_{LV}$ και $Impulse_{HV}$) πρέπει να είναι μικρότερη από τη μέγιστη κρουστική τάση που μπορεί να αντέξει η μόνωση ($Impulse_{LV,max}$ και $Impulse_{HV,max}$), σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned} Impulse_{LV} &< Impulse_{LV,max} \\ Impulse_{HV} &< Impulse_{HV,max} \end{aligned} \quad (4.51)$$

4.4.3.14 Περιορισμός Διάστασης Δοχείου

Οι διαστάσεις του δοχείου πρέπει να μην υπερβαίνουν τις μέγιστες επιτρεπόμενες διαστάσεις του δοχείου του μετασχηματιστή, σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$TL < TL_{max} \quad (4.52)$$

$$TW < TW_{max} \quad (4.53)$$

$$TH < TH_{max} \quad (4.54)$$

όπου TL , TW και TH είναι η διάσταση μήκους, πλάτους και ύψους του δοχείου, αντίστοιχα, ενώ TL_{max} , TW_{max} και TH_{max} είναι η μέγιστη διάσταση μήκους, πλάτους και ύψους του δοχείου, αντίστοιχα.

4.4.3.15 Ειδικοί Περιορισμοί Διαστάσεων Πυρήνα

Σε αυτή την υποενότητα γίνεται λόγος για τις ειδικές προδιαγραφές των διαστάσεων του πυρήνα του μετασχηματιστή (σύμφωνα με την εμπειρία του κατασκευαστή των μετασχηματιστών):

$$0.5 \cdot D - 2 \cdot E_u \leq 0 \quad (4.55)$$

$$2 \cdot E_u - 0.9 \cdot D \leq 0 \quad (4.56)$$

$$D - G \leq 0 \quad (4.57)$$

όπου D , G , E_u είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ενεργού μέρους.

4.4.3.16 Περιορισμοί Μεταβλητών Σχεδίασης

Κάποιες από τις μεταβλητές σχεδίασης μπορούν να λαμβάνουν ακέραιες τιμές, ενώ οι υπόλοιπες μεταβλητές σχεδίασης λαμβάνουν πραγματικές τιμές, σύμφωνα με το άνω και κάτω όριο που έχει επιλεγεί, ενώ όλες οι μεταβλητές σχεδίασης πρέπει να έχουν θετική τιμή:

$$lb_j \leq x_j \leq ub_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4.58)$$

$$x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4.59)$$

όπου lb και ub είναι πίνακες μεγέθους $n \times 1$ που περιέχουν τις ανώτατες και κατώτατες τιμές των n μεταβλητών σχεδίασης, αντίστοιχα.

Ο χρήστης του μετασχηματιστή είναι εκείνος που καθορίζει τις μέγιστες επιτρεπτές τιμές για τις απώλειες φορτίου, τις απώλειες κενού φορτίου, τις συνολικές απώλειες και της τάσης βραχυκύκλωσης (εάν ακολουθήσει το πρότυπο IEC 60076-1 [4.32], οι τιμές αυτές είναι 15%, 15%, 10% και 10%, αντίστοιχα). Ο σχεδιαστής του μετασχηματιστή επιλέγει ποιες από τις μεταβλητές σχεδίασης επιθυμεί να λάβουν ακέραιες τιμές. Αν ο σχεδιαστής επιλέξει να λαμβάνουν ακέραιες τιμές όλες οι μεταβλητές σχεδίασης, τότε έχουμε γνήσιο ακέραιο προγραμματισμό, διαφορετικά πρόκειται για μικτό ακέραιο προγραμματισμό.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι παρά το γεγονός ότι και οι πέντε αντικειμενικές συναρτήσεις ((4.33)-(4.37)) καθώς και οι περιορισμοί τους (4.38)-(4.59) φαίνονται ως γραμμικοί, στην πραγματικότητα δεν ισχύει κάτι τέτοιο. Οι συγκεκριμένες εξισώσεις εμπεριέχουν μη γραμμικές σχέσεις των μεταβλητών, όπως αναλυτικά παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκε και ο μικτός ακεραίος μη γραμμικός προγραμματισμός ως η πλέον κατάλληλη μεθοδολογία βελτιστοποίησης.

4.4.4 Ανάλυση της Μεθόδου

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης της σχεδίασης του μετασχηματιστή με τη χρήση μικτού ακεραίου προγραμματισμού. Η παρουσίαση ξεκινά με την τεχνική παράλληλων υλοποιήσεων της μεθόδου για τη βελτιστοποίηση του ενεργού μέρους του μετασχηματιστή [4.30], η βελτίωση της οποίας οδήγησε στην τελική μορφή του μοντέλου βελτιστοποίησης, το οποίο εφαρμόζεται στη συνολική σχεδίαση του μετασχηματιστή [4.31]. Και στις δύο περιπτώσεις, ο μικτός ακεραίος προγραμματισμός χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, προτείνοντας μία υβριδική μεθοδολογία για τη σχεδίαση των μετασχηματιστών.

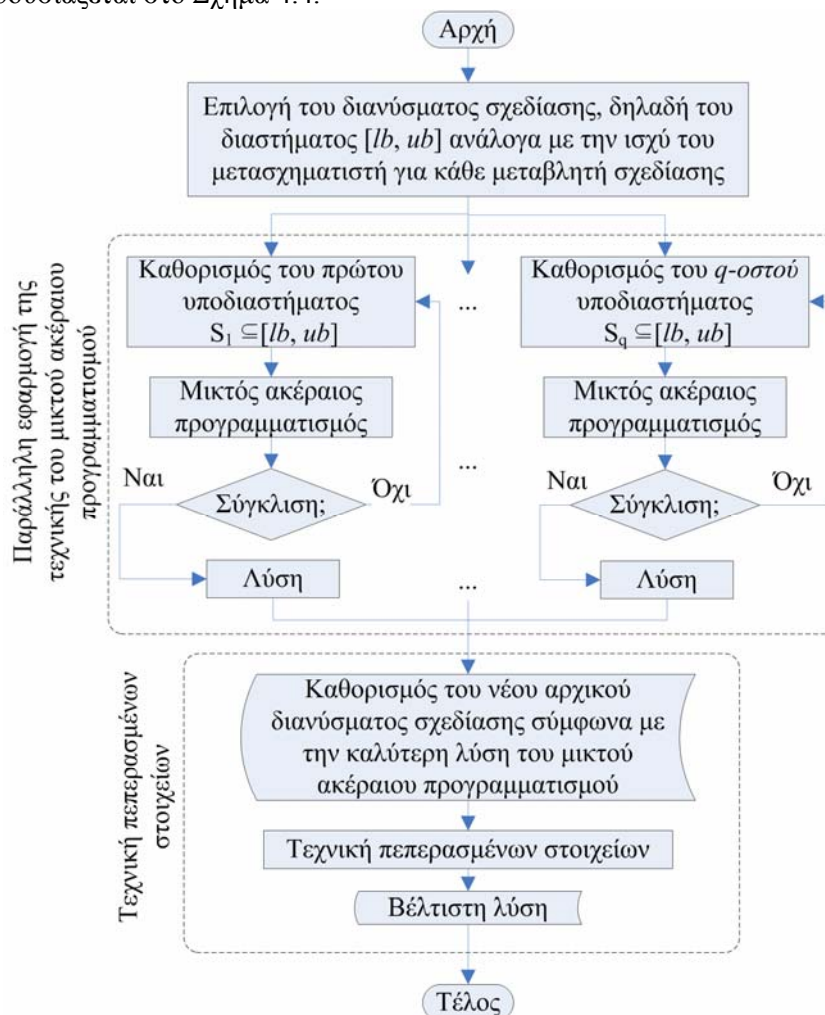
4.4.4.1 Ελαχιστοποίηση Κόστους Ενεργού Μέρους με Παράλληλες Υλοποιήσεις Μικτού Ακεραίου Μη Γραμμικού Προγραμματισμού σε Συνδυασμό με Τρισδιάστατη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων

Για την εξασφάλιση ολικής βελτιστοποίησης του ενεργού μέρους, προτείνεται αρχικά η εφαρμογή της μεθοδολογίας του μικτού ακεραίου μη γραμμικού προγραμματισμού, βελτιστοποιώντας ένα σύνολο από σχεδιάσεις μετασχηματιστών, οι οποίες προκύπτουν εισάγοντας διαφορετικές αρχικές τιμές στις μεταβλητές σχεδίασης. Οι προαναφερθείσες μεταβλητές σχεδίασης αποτελούνται από τέσσερις βασικές μεταβλητές, που είναι οι σπείρες χαμηλής τάσης, η μαγνητική επαγωγή, και οι διαστάσεις πυρήνα D και G (Σχήμα 4.3). Ο σχεδιαστής έχει το δικαίωμα να επιλέξει πριν τη βελτιστοποίηση του προβλήματος, ποιες από τις παραπάνω μεταβλητές σχεδίασης επιθυμεί να είναι συνεχείς και ποιες ακεραίες.

Σύμφωνα με την εργασία [4.30], έχοντας αρχικά ορίσει ο σχεδιαστής ποιες από τις μεταβλητές σχεδίασης επιθυμεί να είναι συνεχείς και ποιες ακεραίες, επιλέγονται τα ανώτερα και τα κατώτερα όρια για κάθε μεταβλητή σχεδίασης, ανάλογα με την ονομαστική ισχύ του μετασχηματιστή. Για κάθε μια από τις μεταβλητές σχεδίασης, το αρχικό σύνολο υποδιαιρείται σε ένα πλήθος από διαφορετικά υποσύνολα, τα οποία δημιουργούνται είτε τυχαία, είτε από το σχεδιαστή και κατόπιν διοχετεύονται σε αντίστοιχο πλήθος από εφαρμογές του μικτού ακεραίου προγραμματισμού (παράλληλη διαδικασία βελτιστοποίησης) (Σχήμα 4.4). Για παράδειγμα, έστω ότι ο σχεδιαστής καθορίζει το αρχικό σύνολο για τις σπείρες χαμηλής τάσης να είναι το $[8 \ 20]$. Στη συνέχεια και ανάλογα με την επιθυμία του σχεδιαστή, το διάστημα αυτό υποδιαιρείται σε ένα πλήθος από διαφορετικά υποσύνολα S_i με $i = 1$ έως q , όπου q ένας ακεραίος αριθμός που ορίζει ο χρήστης. Έστω $q = 3$, τότε ο χρήστης είτε επιλέγει ότι τα τρία αυτά υποσύνολα θα είναι, για παράδειγμα, τα $[8 \ 12]$, $[10 \ 15]$ και $[11 \ 20]$ (δημιουργία υποσυνόλων από τον ίδιο το χρήστη), είτε τα τρία αυτά υποσύνολα δημιουργούνται τυχαία από το πρόγραμμα. Πολύ σημαντικό γεγονός είναι ότι οι αρχικές τιμές κάθε εφαρμογής του μικτού ακεραίου προγραμματισμού προκύπτουν από το μέσο όρο της ανώτερης και κατώτερης τιμής του αντίστοιχου υποδιαστήματος, αποφεύγοντας την πιθανότητα να εγκλωβιστεί η μεθοδολογία σε τοπικό βέλτιστο. Με άλλα λόγια, στο προηγούμενο παράδειγμα, η αρχική τιμή των σπειρών της χαμηλής τάσης (ακεραία μεταβλητή) για τα υποσύνολα $[8 \ 12]$, $[10 \ 15]$ και $[11 \ 20]$, θα είναι 10, 12 και 15 για τα τρία υποπροβλήματα του μικτού ακεραίου προγραμματισμού, αντιστοίχως. Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθείται και για τις υπόλοιπες μεταβλητές σχεδίασης.

Η επίλυση γίνεται με παράλληλες υλοποιήσεις της μεθόδου για το κάθε ένα από τα υποσύνολα του χώρου λύσεων που έχουν οριστεί παραπάνω. Κατά τις υλοποιήσεις αυτές, ο υπολογισμός των τεχνικών χαρακτηριστικών της κάθε σχεδίασης που εξετάζεται γίνεται με τη χρήση των αναλυτικών σχέσεων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2. Μετά την

ολοκλήρωση του πρώτου σταδίου (παράλληλη εφαρμογή του μικτού ακεραίου προγραμματισμού), λαμβάνει χώρα το δεύτερο στάδιο, το οποίο επαναλαμβάνει τη διαδικασία του μη γραμμικού ακεραίου προγραμματισμού με αρχική τιμή διανύσματος των μεταβλητών σχεδίασης που αντιστοιχεί στη βέλτιστη λύση που παρήγαγε το πρώτο στάδιο. Στο στάδιο αυτό, χρησιμοποιείται η τεχνική των πεπερασμένων στοιχείων σε συνδυασμό με τους αναλυτικούς υπολογισμούς του Κεφαλαίου 2, για τον ακριβέστερο προσδιορισμό των τεχνικών χαρακτηριστικών της κάθε εξεταζόμενης σχεδίασης. Η καλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό των τεχνικών χαρακτηριστικών του βέλτιστου ενεργού μέρους του μετασχηματιστή βοηθάει στην επίτευξη εφικτής βέλτιστης σχεδίασης, ενώ ο συνδυασμός του πρώτου και δεύτερου σταδίου εξασφαλίζει τη σύγκλιση της μεθόδου σε ολικό βέλτιστο, για κάθε σύνολο τιμών των μεταβλητών σχεδίασης [4.30]. Ολόκληρη η παραπάνω προτεινόμενη τεχνική παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4 Διάγραμμα ροής της αρχικής προσέγγισης της προτεινόμενης μεθοδολογίας για τη σχεδίαση των μετασχηματιστών.

4.4.4.2 Ελαχιστοποίηση Κόστους Οκτώ Κύριων Υλικών Μετασχηματιστή με την Υβριδική Μέθοδο Μικτού Ακεραίου Μη Γραμμικού Προγραμματισμού σε Συνδυασμό με Τρισδιάστατη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων

Παρά τη δυνατότητα εύρεσης βέλτιστης λύσης με μικρότερο κόστος από αυτό που δίνει η υφιστάμενη μεθοδολογία του κατασκευαστή, η παράλληλη διαδικασία που περιγράφηκε στην ενότητα 4.4.4.1 είχε το μειονέκτημα ότι απαιτείται αρκετή υπολογιστική ισχύς, με αποτέλεσμα να είναι σε ορισμένες περιπτώσεις χρονοβόρα. Έχοντας υπόψη τη συγκεκριμένη αδυναμία και έχοντας ολοκληρώσει τη μοντελοποίηση της συνολικής σχεδίασης του μετασχηματιστή, η εφαρμογή του μικτού ακεραίου προγραμματισμού εμπλουτίστηκε με

καινοτομικές μεθόδους προσδιορισμού καίριων παραμέτρων εισόδου της σχεδίασης, οδηγώντας στην τελική μορφή του μοντέλου βελτιστοποίησης [4.31].

Αναλυτικότερα, εγκαταλείφθηκε το συγκεκριμένο μοντέλο της παράλληλης επεξεργασίας δεδομένων και υλοποίησης της μεθόδου μικτού ακέραιου προγραμματισμού, έχοντας ως στόχο δραστηκότερες επεμβάσεις στον ορισμό του εύρους των μεταβλητών σχεδίασης του μετασχηματιστή, τροποποιώντας τον τρόπο υπολογισμού ζωτικότερων μεταβλητών σχεδίασης. Μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους, αν όχι η σημαντικότερη, είναι ο προσδιορισμός της διατομής των αγωγών, ο οποίος πραγματοποιείται είτε με θερμική δοκιμή βραχυκυκλώματος, είτε με τη πυκνότητα ρεύματος του πηνίου υψηλής και χαμηλής τάσης. Με το δεύτερο τρόπο προσδιορισμού της διατομής των αγωγών, δηλαδή σύμφωνα με την πυκνότητα ρεύματος, σχεδιάζεται η πλειοψηφία των μετασχηματιστών διανομής. Για αυτόν τον προσδιορισμό των διατομών των αγωγών, αναπτύσσονται και προτείνονται τρεις καινοτομικές τεχνικές [4.31].

Στην πρώτη τεχνική, ο σχεδιαστής μετασχηματιστών έχει τη δυνατότητα να ορίσει απευθείας την τιμή της πυκνότητας ρεύματος για το πηνίο χαμηλής και υψηλής τάσης. Έχοντας σταθερή την πυκνότητα ρεύματος και για τις δύο τάσεις, λαμβάνει χώρα ο μικτός ακέραιος μη γραμμικός προγραμματισμός, ελαχιστοποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση κόστους των οκτώ κύριων υλικών του μετασχηματιστή. Όμως, το μειονέκτημα της συγκεκριμένης προσέγγισης είναι ότι απαιτεί από το σχεδιαστή μετασχηματιστών εμπειρία για να καθορίσει σωστά τις βέλτιστες πυκνότητες ρεύματος των πηνίων χαμηλής και υψηλής τάσης και κατόπιν να οδηγηθεί στη βέλτιστη σχεδίαση, ενώ το πλεονέκτημά της είναι η ταχύτητα σύγκλισης και εύρεσης της βέλτιστης σχεδίασης.

Στην δεύτερη τεχνική, ορίζεται ένα διάστημα τιμών με συγκεκριμένο πλήθος για τις πυκνότητες ρεύματος των πηνίων χαμηλής και υψηλής τάσης και ανάλογα με το πλήθος των τιμών πραγματοποιούνται ένα σύνολο από βέλτιστες σχεδιάσεις. Για παράδειγμα, ο χρήστης ορίζει τα διαστήματα [3.5 3.75 3.90] και [3.6 3.8 4 4.2] που αφορούν τις τιμές της πυκνότητας ρεύματος για το πηνίο χαμηλής και υψηλής τάσης, αντίστοιχα, έχοντας 3 και 4 τιμές πυκνότητας ρεύματος για τη χαμηλή και υψηλή τάση, αντίστοιχα. Όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί είναι $3 \cdot 4 = 12$ βέλτιστες σχεδιάσεις. Δηλαδή υλοποιείται 12 φορές ο μικτός ακέραιος μη γραμμικός προγραμματισμός, ελαχιστοποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση κόστους των οκτώ κύριων υλικών του μετασχηματιστή και στη συνέχεια επιλέγεται η καλύτερη από αυτές. Παρά το γεγονός ότι η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι χρονοβόρα (ανάλογα με το πλήθος των πιθανών συνδυασμών), διασφαλίζει την εύρεση της ολικής βέλτιστης σχεδίασης του μετασχηματιστή, χωρίς να απαιτεί εμπειρία από το σχεδιαστή των μετασχηματιστών.

Στην τρίτη τεχνική, ο σχεδιαστής έχει τη δυνατότητα να αυξήσει το διάνυσμα με τις μεταβλητές σχεδίασης και από τέσσερις να γίνουν έξι: 1) οι σπείρες χαμηλής τάσης, 2) οι διαστάσεις πυρήνα D και 3) G (Σχήμα 4.3), 4) η μαγνητική επαγωγή, 5) η πυκνότητα ρεύματος του πηνίου χαμηλής τάσης και 6) η πυκνότητα ρεύματος του πηνίου υψηλής τάσης. Σε αυτήν την περίπτωση, ο χρήστης θέτει τα όρια (ανώτατο και κατώτατο) καθώς επίσης και μια αρχική τιμή για κάθε μια από τις έξι μεταβλητές σχεδίασης. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αναλαμβάνει να εντοπίσει εκείνες τις βέλτιστες τιμές που θα αποδίδουν τη βέλτιστη σχεδίαση του μετασχηματιστή. Το μειονέκτημα που παρατηρήθηκε στη συγκεκριμένη τεχνική είναι ότι υπό συγκεκριμένες συνθήκες, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης εγκλωβίζεται σε τοπικά βέλτιστα εξαιτίας του γεγονότος ότι αυξάνει ο χώρος αναζήτησης των πιθανών βέλτιστων λύσεων. Επιπλέον, η αύξηση του αριθμού των μεταβλητών και η σειρά με την οποία εμφανίζονται στο διάνυσμα των μεταβλητών (σε σχέση με τις ακέραιες μεταβλητές) επηρεάζει τον τρόπο σύγκλισης και την ποιότητα βέλτιστης λύσης της μεθόδου, όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 4.2.2. Από την άλλη πλευρά, δίνει στο σχεδιαστή τη δυνατότητα να εισάγει ένα οποιοδήποτε διάστημα τιμών της επιλογής του και ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης εντοπίζει γρήγορα την υπό προϋπόθεση βέλτιστη σχεδίαση.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται στην περίπτωση αυτή μετά το πέρας του μικτού ακέραιου προγραμματισμού, για την επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών της βέλτιστης λύσης, και ειδικότερα της τάσης βραχυκύκλωσης [4.27] και της μέγιστης ανύψωσης θερμοκρασίας των τυλιγμάτων [4.34]. Εάν τα χαρακτηριστικά αυτά δεν

ικανοποιούν τους περιορισμούς, η διαδικασία της βελτιστοποίησης επαναλαμβάνεται με τροποποίηση του αρχικού διανύσματος των μεταβλητών σχεδίασης.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι κάθε μια από τις παραπάνω τρεις τεχνικές έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Όμως, είναι πλέον δεδομένο ότι ο συνδυασμός τους μπορεί να προσφέρει στο σχεδιαστή των μετασχηματιστών ένα ενιαίο ισχυρό εργαλείο, εύχρηστο και φιλικό προς το σχεδιαστή, διασφαλίζοντας ολική βέλτιστη λύση εύκολα και αρκετά γρήγορα.

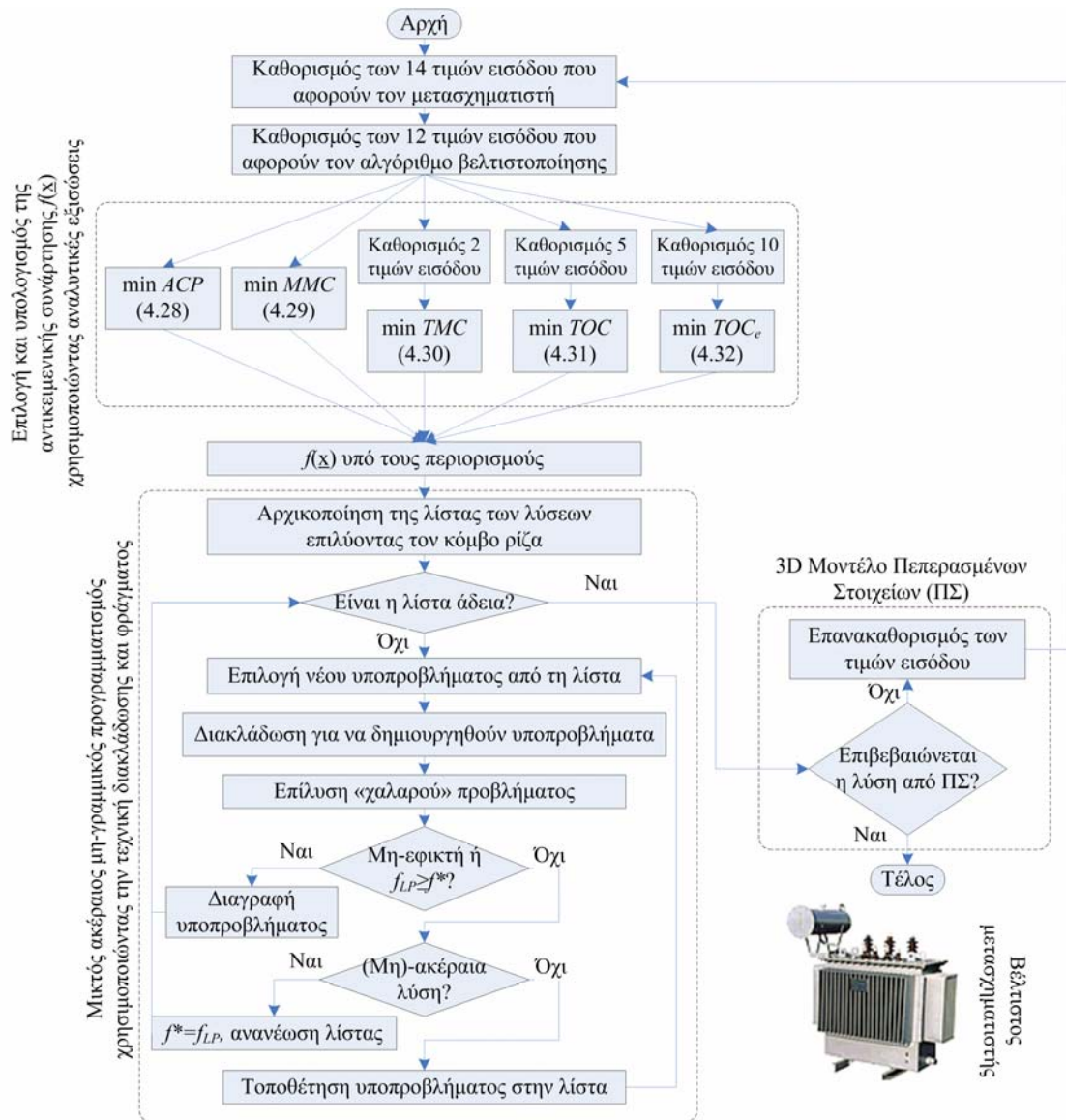
Πρέπει να αναφερθεί ότι τα ελάχιστα δεδομένα εισόδου που πρέπει να ορίσει ο χρήστης για τη βελτιστοποίηση κάθε σχεδίασης μετασχηματιστή είναι οι ακόλουθες 14 παράμετροι που αφορούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή: η ονομαστική ισχύς, το υλικό κατασκευής του πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης, η πολική τάση του πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης, το είδος συνδεσμολογίας του πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης, η επιλογή τύπου αγωγού του πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης, η συχνότητα, η επιλογή του μαγνητικού υλικού, η επιλογή της μεθόδου υπολογισμού της διατομής των αγωγών, οι απώλειες φορτίου και οι απώλειες κενού φορτίου. Οι 12 παράμετροι που αφορούν τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης είναι: για κάθε μια από τις τέσσερις βασικές μεταβλητές σχεδίασης (σπείρες χαμηλής τάσης, οι διαστάσεις πυρήνα D και G , και μαγνητική επαγωγή), ορίζεται το άνω και κάτω όριο καθώς επίσης και η αρχική τιμή. Με βάση τις 14 παράμετρους που αφορούν τον μετασχηματιστή και τις 12 παράμετρους που αφορούν τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, μπορεί να γίνει βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης που αφορά το κόστος του ενεργού μέρους (4.33) και της αντικειμενικής συνάρτησης που αφορά το κόστος των οκτώ κύριων υλικών του μετασχηματιστή (4.34). Με βάση το κόστος των οκτώ κύριων υλικών και τις παραμέτρους εισόδου, η μέθοδος μπορεί να επεκταθεί για τη βελτιστοποίηση οποιασδήποτε από τις αντικειμενικές συναρτήσεις που περιγράφηκαν στην ενότητα 4.4.2.

Όσον αφορά την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης του κατασκευαστικού κόστους (4.35), χρειάζονται οι παραπάνω 26 παράμετροι ($14+12=26$) λαμβάνοντας υπόψη επιπλέον δύο (στο σύνολο 28 παράμετροι): το κόστος των υπόλοιπων υλικών του μετασχηματιστή (CRM) και το κόστος των εργατικών (LC).

Όσον αφορά την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους κατοχής (4.36), ο χρήστης πρέπει να ορίσει επιπλέον τρεις παραμέτρους (στο σύνολο $14+12+2+3=31$ παράμετροι): το περιθώριο κέρδους από την πώληση του μετασχηματιστή (SM), το συντελεστή απωλειών κενού φορτίου του μετασχηματιστή (A), και το συντελεστή απωλειών φορτίου του μετασχηματιστή (B).

Τέλος, οι επιπλέον παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη όσον αφορά την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους κατοχής λαμβάνοντας υπόψη και το περιβαλλοντικό κόστος (4.37) είναι 5 (στο σύνολο $14+12+2+3+5=36$ παράμετροι): ο συντελεστής περιβαλλοντικού κόστους λόγω των απωλειών κενού φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή, ο συντελεστής περιβαλλοντικού κόστους λόγω των απωλειών φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή, οι απώλειες κενού φορτίου του μετασχηματιστή αναφοράς, οι απώλειες φορτίου του μετασχηματιστή αναφοράς και το ετήσιο κόστος εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Συνοψίζοντας, σκοπός είναι να ελαχιστοποιηθεί μια από τις πέντε αντικειμενικές συναρτήσεις ((4.33)-(4.37)), με την πλειοψηφία των περιπτώσεων να αφορούν το συνολικό κόστος των οκτώ κύριων υλικών (εξίσωση (4.34)), υπό τους περιορισμούς (4.38)-(4.59), αναζητώντας τις βέλτιστες τιμές των τεσσάρων μεταβλητών σχεδίασης. Για να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος στόχος, ως αλγόριθμος βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε ο μικτός ακέραιος προγραμματισμός σε συνδυασμό με την τεχνική της διακλάδωσης και φράγματος και την τεχνική των πεπερασμένων στοιχείων. Το διάγραμμα ροής της προτεινόμενης υβριδικής τεχνικής παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5 Διάγραμμα ροής της προτεινόμενης υβριδικής τεχνικής.

4.4.5 Εφαρμογή της Προτεινόμενης Μεθοδολογίας και Αποτελέσματα

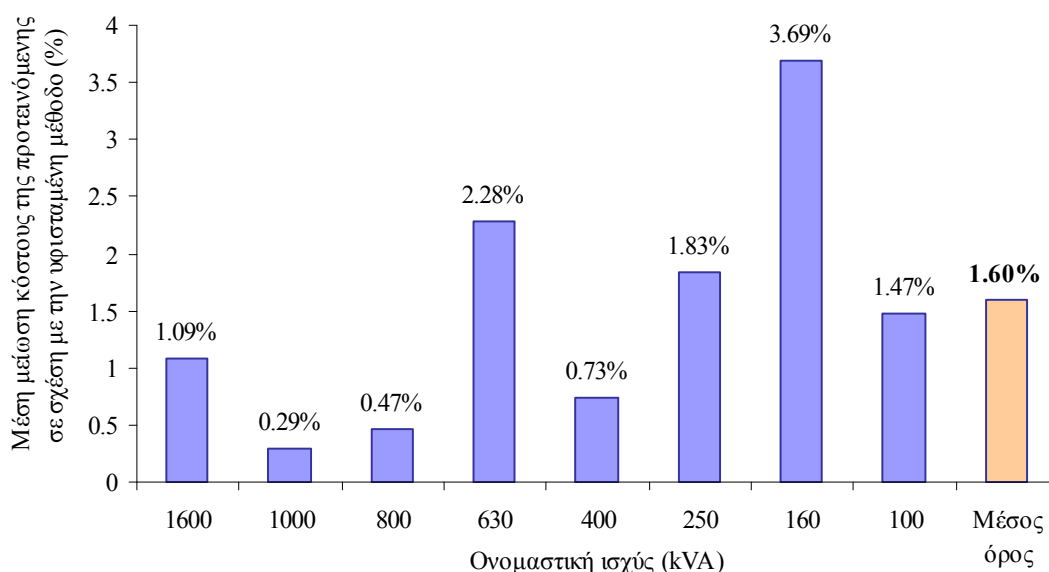
Η ευρωστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας παρουσιάζεται σε σύγκριση με την υφισταμένη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία μετασχηματιστών [4.33]. Η προτεινόμενη υβριδική μεθοδολογία ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος των οκτώ κύριων υλικών (4.34), υπό τους περιορισμούς (4.38)-(4.59), αναζητώντας τις βέλτιστες τιμές των τεσσάρων μεταβλητών σχεδίασης, δηλαδή τον αριθμό των σπειρών του πηνίου χαμηλής τάσης (διακριτή μεταβλητή), την ονομαστική μαγνητική επαγωγή λειτουργίας (συνεχής μεταβλητή), το πλάτος σκέλους του πυρήνα (D) (συνεχής μεταβλητή) και το ύψος παραθύρου του πυρήνα (G) (συνεχής μεταβλητή) (Σχήμα 4.3). Δύο ακόμη μεταβλητές σχεδίασης μπορούν να προστεθούν στις τέσσερις που μόλις αναφέρθηκαν: η τιμή της πυκνότητας ρεύματος για το πηνίο της χαμηλής και υψηλής τάσης (συνεχείς μεταβλητές).

Η προτεινόμενη μεθοδολογία έχει εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα από πραγματικούς μετασχηματιστές, διαφορετικών ονομαστικών τάσεων και κατηγοριών απωλειών. Συγκεκριμένα, βελτιστοποιήθηκαν 188 σχεδιάσεις μετασχηματιστών και στη συνέχεια συγκρίθηκαν με την υφισταμένη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία μετασχηματιστών [4.33]. Ο Πίνακας 4.1 παρουσιάζει τον αριθμό σχεδιάσεων που βελτιστοποιήθηκαν και τη μέση μείωση κόστους των οκτώ κύριων υλικών της προτεινόμενης

μεθόδου σε σχέση με την υφιστάμενη μεθοδολογία σχεδίασης, ενώ το Σχήμα 4.6 αναπαριστά γραφικά τις τιμές του παρουσιάζει ο Πίνακας 4.1. Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι και οι 188 βέλτιστες σχεδιάσεις μετασχηματιστών διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας σταθερή πυκνότητα ρεύματος στο πηνίο χαμηλής και υψηλής τάσης (πρώτη προσέγγιση, §4.4.4), επειδή η υφισταμένη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία μετασχηματιστών [4.33] δεν υποστηρίζει τις άλλες δύο τεχνικές (§4.4.4).

Πίνακας 4.1 Αριθμός σχεδιάσεων (ανά ισχύ) που βελτιστοποιήθηκαν και μέση μείωση κόστους των οκτώ κύριων υλικών της προτεινόμενης μεθόδου σε σχέση με την υφιστάμενη μέθοδο σχεδίασης.

Ονομαστική ισχύς	Αριθμός σχεδιάσεων	Μέση μείωση κόστους (%)
1600	14	1.09
1000	24	0.29
800	20	0.47
630	48	2.28
400	28	0.73
250	16	1.83
160	24	3.69
100	14	1.47
Σύνολο: 188		Μέσος όρος: 1.60



Σχήμα 4.6 Μέση μείωση κόστους της προτεινόμενης σε σχέση με την υφιστάμενη μέθοδο.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα πιο σημαντικά και τεχνικά χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών που εξετάστηκαν σε συνδυασμό με αναλυτικά αποτελέσματα για μια περίπτωση μετασχηματιστή καθώς και τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανά ισχύ. Ο Πίνακας 4.2 δίνει τα μοναδιαία κόστη που χρησιμοποιήθηκαν για όλες τις σχεδιάσεις (Πίνακας 4.1). Ο Πίνακας 4.3 δίνει τα τεχνικά του χαρακτηριστικά ενός μετασχηματιστή 400 kVA, του οποίου η σχεδίαση βελτιστοποιήθηκε με την προτεινόμενη μεθοδολογία. Ο Πίνακας 4.4 περιλαμβάνει το βάρος και το κόστος κάθε ενός από τα οκτώ κύρια υλικά του μετασχηματιστή, όπως υπολογίστηκαν από την προτεινόμενη μεθοδολογία ελάχιστου κόστους των οκτώ κύριων υλικών του μετασχηματιστή.

Πίνακας 4.2 Μοναδιαία κόστη των οκτώ κύριων υλικών του μετασχηματιστή που χρησιμοποιήθηκαν για τις 188 σχεδιάσεις που παρουσιάζει ο Πίνακας 4.1.

<i>Υλικό</i>	<i>Μοναδιαίο κόστος (€/kg)</i>
1) Αγωγός χαμηλής τάσης	7.7
2) Αγωγός υψηλής τάσης	7.7
3α) Μαγνητικό υλικό Μ4	3.5
3β) Μαγνητικό υλικό ΜΟΗ 0.27	3.9
4) Μονωτικό χαρτί	5.0
5) Κανάλια	5.5
6) Λάδι	1.1
7) Πτυχωτά πανέλα	0.8
8) Φύλλα λαμαρίνας	0.7

Πίνακας 4.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά μετασχηματιστή 400 kVA.

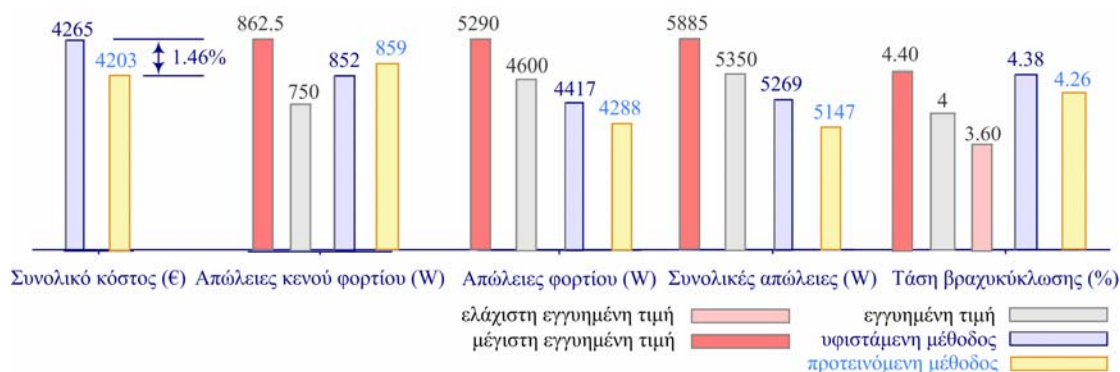
<i>Χαρακτηριστικό</i>	<i>Τιμή</i>	<i>Μονάδα</i>
Ονομαστική ισχύς	400	kVA
Υλικό πηνίου χαμηλής τάσης	Χαλκός	-
Υλικό πηνίου υψηλής τάσης	Χαλκός	-
Τιμή της πολικής τάσης του πηνίου χαμηλής τάσης	400	V
Τιμή της πολικής τάσης του πηνίου υψηλής τάσης	20000	V
Συνδεσμολογία	Dyn11	-
Εγγυημένες απώλειες κενού φορτίου	750	W
Εγγυημένες απώλειες φορτίου	4600	W
Εγγυημένη τάση βραχυκύκλωσης	4	%
Ονομαστική συχνότητα	50	Hz
Είδος μαγνητικού υλικού πυρήνα	ΜΟΗ 0.27	-

Πίνακας 4.4 Συνολικά κόστη υλικών για το μετασχηματιστή 400 kVA (Πίνακας 4.3) όπως υπολογίστηκαν από την προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης.

<i>Υλικό</i>	<i>Μοναδιαίο κόστος (€/kg)</i>	<i>Βάρος (kg)</i>	<i>Συνολικό κόστος (€)</i>
Αγωγός χαμηλής τάσης	7.7	85.26	656.49
Αγωγός υψηλής τάσης	7.7	134.62	1036.56
Μαγνητικό υλικό ΜΟΗ 0.27	3.9	458.12	1786.66
Μονωτικό χαρτί	5.0	18.94	94.72
Κανάλια	5.5	9.61	52.87
Λάδι	1.1	152.36	106.65
Πτυχωτά πανέλα	0.8	111.93	89.54
Φύλλα λαμαρίνας	0.7	344.99	379.48
Σύνολο:			4202.98

Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται τα κύρια αποτελέσματα της βέλτιστης σχεδίασης του μετασχηματιστή 400 kVA (Πίνακας 4.3) σε σύγκριση με την υφιστάμενη τεχνική που χρησιμοποιείται από την βιομηχανία. Βάσει του συγκεκριμένου σχήματος, αξίζει να

σημειωθεί ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία εντοπίζει όχι μόνο φθηνότερη λύση κατά 1.46% αλλά σχεδιάζει και μετασχηματιστή χαμηλότερων συνολικών απωλειών.



Σχήμα 4.7 Γραφική απεικόνιση των κύριων αποτελεσμάτων της σύγκρισης των δύο μεθόδων (προτεινόμενης και υφιστάμενης) για το μετασχηματιστή διανομής με ονομαστική ισχύ 400 kVA.

Ο Πίνακας 4.5 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των τριών καινοτομικών τεχνικών που αναπτύχθηκαν στην §4.4.4.

Στην πρώτη προσέγγιση, η πυκνότητα ρεύματος στο πηνίο χαμηλής και υψηλής τάσης έχει θεωρηθεί σταθερή και ίση με 3 A/mm^2 , οπότε η λύση στην οποία καταλήγει το προτεινόμενο μοντέλο είναι κατά 1.46 % φθηνότερη από αυτή που δίνει η υφιστάμενη μεθοδολογία της βιομηχανίας. Επομένως, με ακριβώς τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά, εντοπίστηκε σαφώς καλύτερη λύση από την προτεινόμενη μέθοδο. Το ερώτημα που τίθεται στη συνέχεια είναι: Ποια καλύτερη λύση μπορεί να εντοπισθεί, χρησιμοποιώντας τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά μετασχηματιστή και τροποποιώντας μόνο την τιμή της πυκνότητας ρεύματος;

Η απάντηση στο συγκεκριμένο ερώτημα προκύπτει χρησιμοποιώντας τη δεύτερη προσέγγιση. Πιο συγκεκριμένα, ορίζονται τα διαστήματα [3.0 3.2 3.4 3.6] και [3.0 3.15 3.3 3.45 3.6] που αφορούν τις τιμές της πυκνότητας ρεύματος για τη χαμηλή και υψηλή τάση, αντίστοιχα, έχοντας στο σύνολο 4 και 5 τιμές για τις πυκνότητες ρεύματος των πηνίων χαμηλής και υψηλής τάσης. Όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί είναι $4 \cdot 5 = 20$ βέλτιστες σχεδιάσεις. Δηλαδή υλοποιείται 20 φορές ο μικτός ακέрайος προγραμματισμός, ελαχιστοποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση κόστους των οκτώ κύριων υλικών του μετασχηματιστή και στη συνέχεια επιλέγεται η καλύτερη από αυτές. Σε αυτήν την περίπτωση, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης καθορίζει ότι η βέλτιστη λύση έχει πυκνότητα ρεύματος στο πηνίο χαμηλής και υψηλής τάσης ίση με 3.4 A/mm^2 και 3.6 A/mm^2 , αντίστοιχα, εντοπίζοντας κατά 9.36 % φθηνότερη λύση σε σχέση την υφιστάμενη μεθοδολογία.

Μήπως όμως ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης μπορεί να εντοπίσει ακόμη καλύτερη βέλτιστη λύση, με εισαγωγή των πυκνοτήτων ρεύματος στο διάνυσμα των μεταβλητών σχεδίασης; Η απάντηση προκύπτει εφαρμόζοντας την τρίτη προσέγγιση της §4.4.4. Αναλυτικότερα, ενσωματώνονται στο διάνυσμα των μεταβλητών σχεδίασης οι τιμές της πυκνότητας ρεύματος για το πηνίο χαμηλής και υψηλής τάσης, έχοντας σε αυτήν την περίπτωση έξι μεταβλητές σχεδίασης. Τα αποτελέσματα είναι ότι η προτεινόμενη τεχνική εντοπίζει κατά 7.29 % φθηνότερη λύση σε σύγκριση με την υφιστάμενη μεθοδολογία της βιομηχανίας. Αποδεικνύεται συνεπώς ότι η ενσωμάτωση των πυκνοτήτων ρεύματος στο διάνυσμα των μεταβλητών σχεδίασης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη βέλτιστη σχεδίαση σε σχέση με την υφιστάμενη μεθοδολογία, δεν είναι όμως βέβαιο ότι εντοπίζει το ολικό βέλτιστο, το οποίο στην παραπάνω περίπτωση δίνεται από τη δεύτερη προσέγγιση των πολλαπλών εκτελέσεων του μικτού ακέрайου προγραμματισμού για διάφορες πυκνότητες ρεύματος.

Μελετώντας τα αποτελέσματα των τριών παραπάνω καινοτομικών προσεγγίσεων, διαπιστώνεται ότι στην πρώτη προσέγγιση έχοντας σταθερή τιμή στις πυκνότητες ρεύματος και για την προτεινόμενη αλλά και για την υφιστάμενη τεχνική, ο προτεινόμενος αλγόριθμος

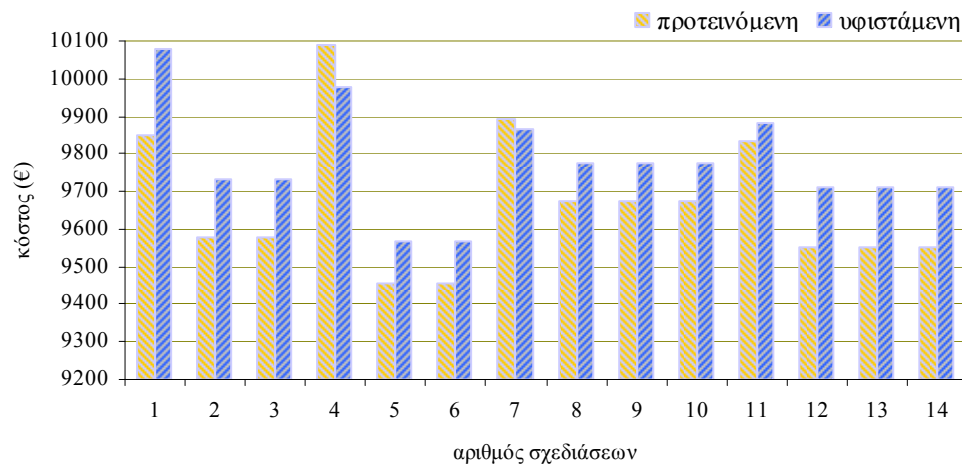
βρήκε φθηνότερη λύση κατά 1.46 %. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η προτεινόμενη υβριδική μεθοδολογία εξετάζει όλο το χώρο των υποψήφιων λύσεων (για ίδια πυκνότητα ρεύματος), επιτυγχάνοντας την εύρεση της ολικής βέλτιστης λύσης σε σχέση με την υφιστάμενη ευρετική (*heuristic*) μέθοδο, η οποία αναζητά τη λύση σε υποχώρο του χώρου αναζήτησης. Στη δεύτερη προσέγγιση, είναι χαρακτηριστικό ότι για τα ίδια δεδομένα εισόδου αλλά με βελτιστοποίηση 20 διαφορετικών σχεδιάσεων, δηλαδή ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης με 20 διαφορετικούς συνδυασμούς τιμών που αφορούν την πυκνότητα ρεύματος των πηνίων χαμηλής και υψηλής τάσης, εντοπίζεται βέλτιστη σχεδίαση η οποία είναι 9.36 % φθηνότερη από την υφιστάμενη μεθοδολογία. Ο χρόνος εντοπισμού είναι σαφώς μεγαλύτερος από την πρώτη προσέγγιση, καταλήγοντας όμως σε εντυπωσιακά καλύτερη λύση με τα ίδια δεδομένα εισόδου. Τέλος, όταν ο σχεδιαστής μετασχηματιστών δε γνωρίζει ή επιθυμεί να έχει μια πρώτη προσέγγιση για το που βρίσκεται η βέλτιστη λύση, χρησιμοποιεί την τρίτη προσέγγιση, η οποία αρκετές φορές μπορεί να καταλήξει και στην ολική βέλτιστη σχεδίαση. Στην παραπάνω προσέγγιση, εύκολα διαπιστώνεται ότι η κατά 7.29% φθηνότερη βέλτιστη που εντοπίζει η μεθοδολογία με τιμή της πυκνότητας ρεύματος 3.4 A/mm^2 και 3.3 A/mm^2 , δεν αποτελεί την ολική βέλτιστη λύση. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι ο χώρος των υποψήφιων λύσεων αυξήθηκε σημαντικά (δυσκολεύοντας την αναζήτηση), βρίσκοντας παρόλα αυτά μια αρκετά καλή λύση, αλλά όχι την ολικά βέλτιστη.

Σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι ο συνδυασμός των τριών αυτών καινοτομικών τεχνικών, έχει τη δυνατότητα να οδηγήσει το σχεδιαστή μετασχηματιστών στην ολικά βέλτιστη σχεδίαση, ελαχιστοποιώντας κατάλληλα την αντικειμενική συνάρτηση κόστους των κύριων υλικών, ικανοποιώντας παράλληλα όλους τους περιορισμούς του προβλήματος.

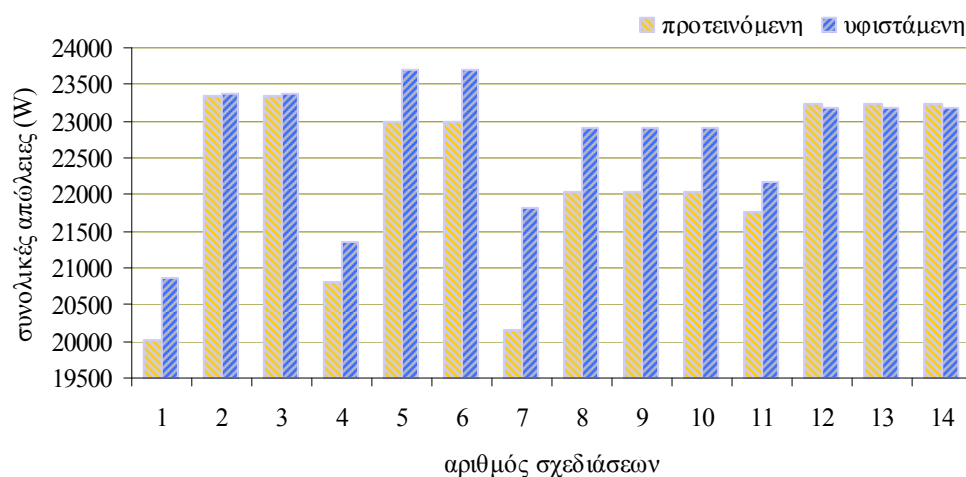
Πίνακας 4.5 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για το μετασχηματιστή ισχύος 400 kVA (Πίνακας 4.3) χρησιμοποιώντας τις τρεις καινοτομικές προσεγγίσεις υπολογισμού της πυκνότητας ρεύματος.

<i>Χαρακτηριστικά της βέλτιστης σχεδίασης</i>	<i>Καθορισμός τεχνικής υπολογισμού της πυκνότητας ρεύματος (§4.4.4)</i>		
	<i>Σταθερή πυκνότητα ρεύματος χαμηλής και υψηλής τάσης</i>	<i>Συγκεκριμένο σύνολο τιμών πυκνότητας ρεύματος χαμηλής και υψηλής τάσης</i>	<i>Προσθήκη των πυκνοτήτων ρεύματος στις μεταβλητές σχεδίασης</i>
Σπείρες πηνίου χαμηλής τάσης	18	18	19
D (mm) (Σχήμα 4.3)	239	219	230
G (mm) (Σχήμα 4.3)	248	237	261
B (Gauss) (Σχήμα 4.3)	18000	18000	18000
Πυκνότητα ρεύματος πηνίου χαμηλής τάσης (A/mm^2)	3	3.4	3.4
Πυκνότητα ρεύματος πηνίου υψηλής τάσης (A/mm^2)	3	3.6	3.3
Σχεδιασμένες απώλειες κενού φορτίου (W)	859	841	818
Σχεδιασμένες απώλειες φορτίου (W)	4288	4945	4890
Κόστος οκτώ κύριων υλικών (€)	4203	3866	3954
Μείωση κόστους υλικών σε σχέση με την υφιστάμενη μέθοδο (%)	1.46	9.36	7.29
Υπολογιστικός χρόνος (s)	72.87	1175.73	85.63

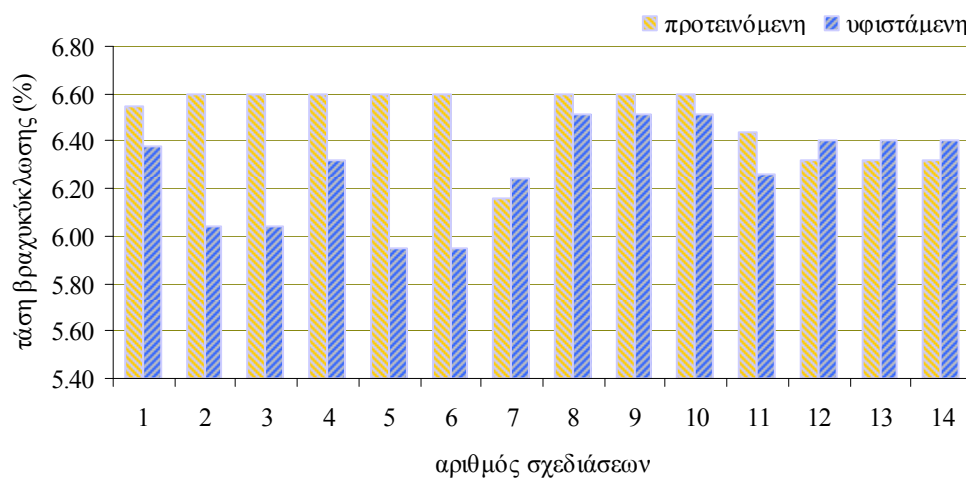
Στη συνέχεια απεικονίζονται αναλυτικότερα τα αποτελέσματα για τις 188 σχεδιάσεις που εξετάστηκαν (Πίνακας 4.1) σε γραφικές παραστάσεις. Για κάθε μια από τις οκτώ διαφορετικές κατηγορίες ισχύος που εξετάστηκαν (1600 kVA, 1000 kVA, 800 kVA, 630 kVA, 400 kVA, 250 kVA, 160 kVA και 100 kVA), παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις του κόστους των οκτώ κύριων υλικών, των συνολικών απωλειών και της τάσης βραχυκύκλωσης για την προτεινόμενη και την υφιστάμενη τεχνική. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα βοηθούν το σχεδιαστή μετασχηματιστών να αξιολογήσει ποιοτικά τη βέλτιστη λύση. Συγκεκριμένα, το Σχήμα 4.8 έως το Σχήμα 4.10 αφορά τις σχεδιάσεις μετασχηματιστών ισχύος 1600 kVA, στο Σχήμα 4.11 έως το Σχήμα 4.13 δίνονται τα αποτελέσματα των σχεδιάσεων μετασχηματιστών ισχύος 1000 kVA, το Σχήμα 4.14 έως το Σχήμα 4.16 περιλαμβάνει τη σύγκριση των σχεδιάσεων μετασχηματιστών ισχύος 800 kVA, το Σχήμα 4.17 έως το Σχήμα 4.19 αφορά τις σχεδιάσεις μετασχηματιστών ισχύος 630 kVA, το Σχήμα 4.20 έως το Σχήμα 4.22 απεικονίζει τα χαρακτηριστικά των σχεδιάσεων μετασχηματιστών ισχύος 400 kVA, το Σχήμα 4.23 έως το Σχήμα 4.25 αφορά τις σχεδιάσεις μετασχηματιστών ισχύος 250 kVA, το Σχήμα 4.26 έως το Σχήμα 4.28 αφορά τις σχεδιάσεις μετασχηματιστών ισχύος 160 kVA και το Σχήμα 4.29 έως το Σχήμα 4.31 παραθέτει τα χαρακτηριστικά των σχεδιάσεων μετασχηματιστών ισχύος 100 kVA.



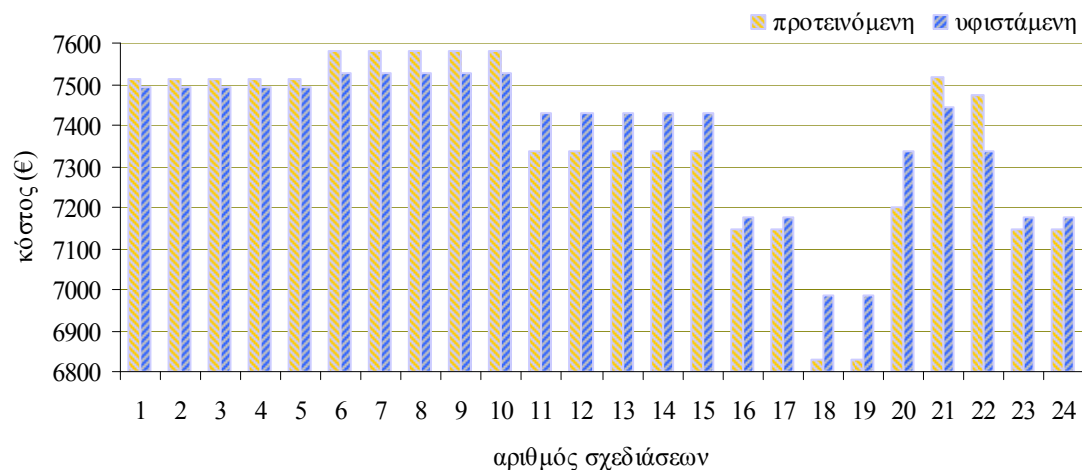
Σχήμα 4.8 Συνολικό κόστος των οκτώ κύριων υλικών για κάθε μια από τις 14 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 1600 kVA.



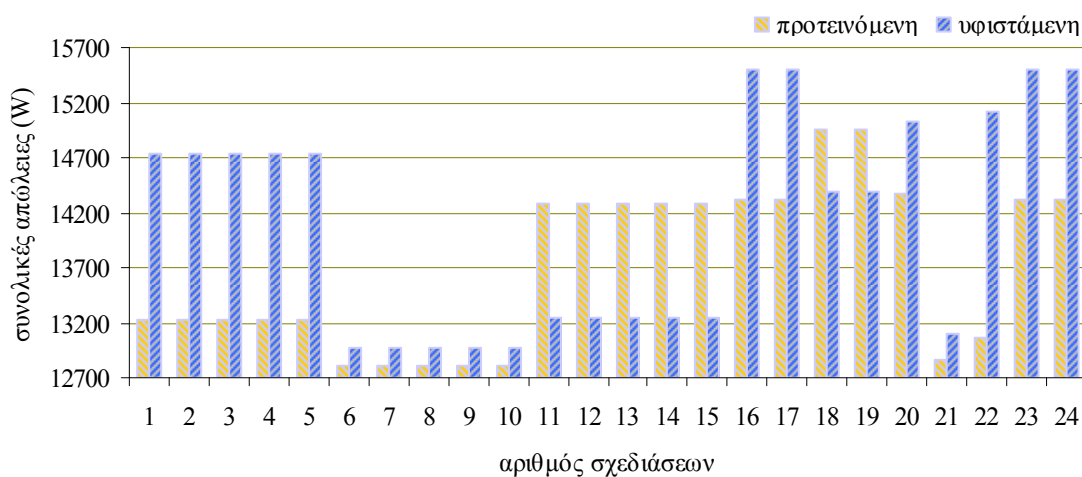
Σχήμα 4.9 Συνολικές απώλειες για κάθε μια από τις 14 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 1600 kVA.



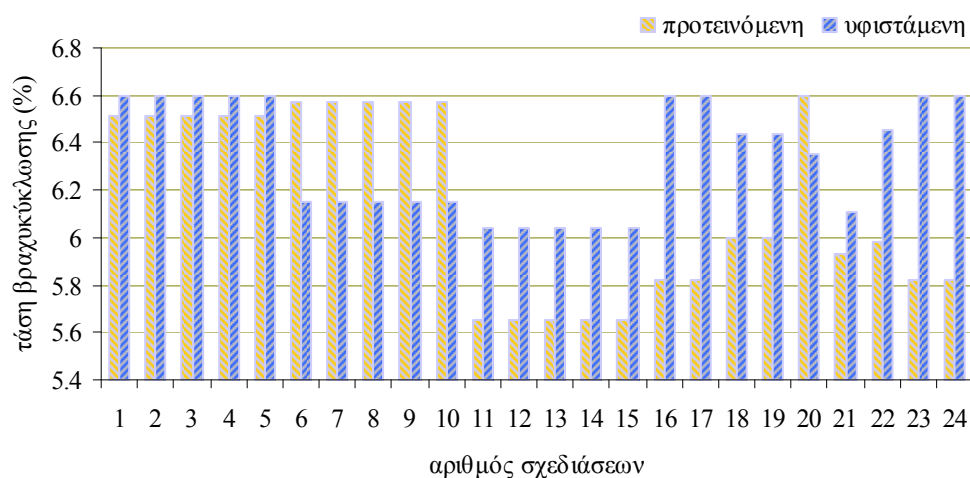
Σχήμα 4.10 Τάση βραχυκύκλωσης για κάθε μια από τις 14 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 1600 kVA.



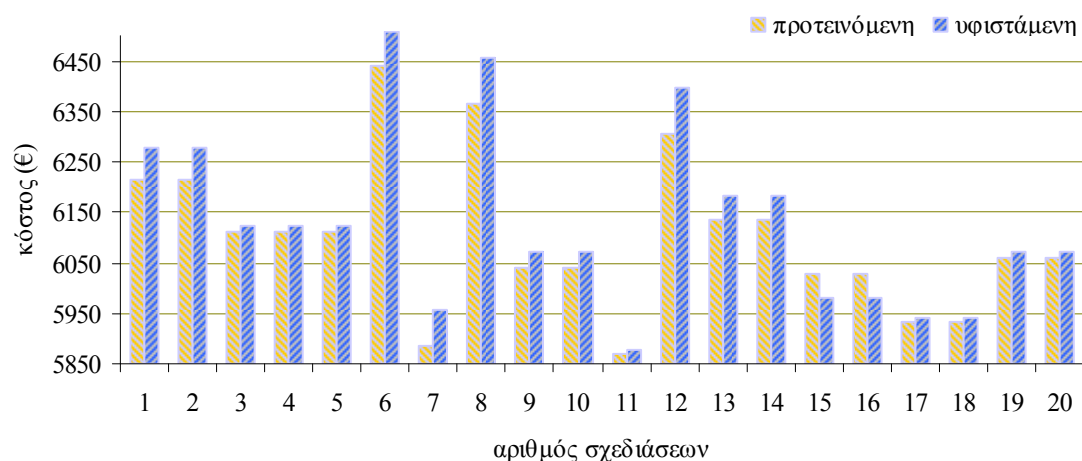
Σχήμα 4.11 Συνολικό κόστος των οκτώ κύριων υλικών για κάθε μια από τις 24 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 1000 kVA.



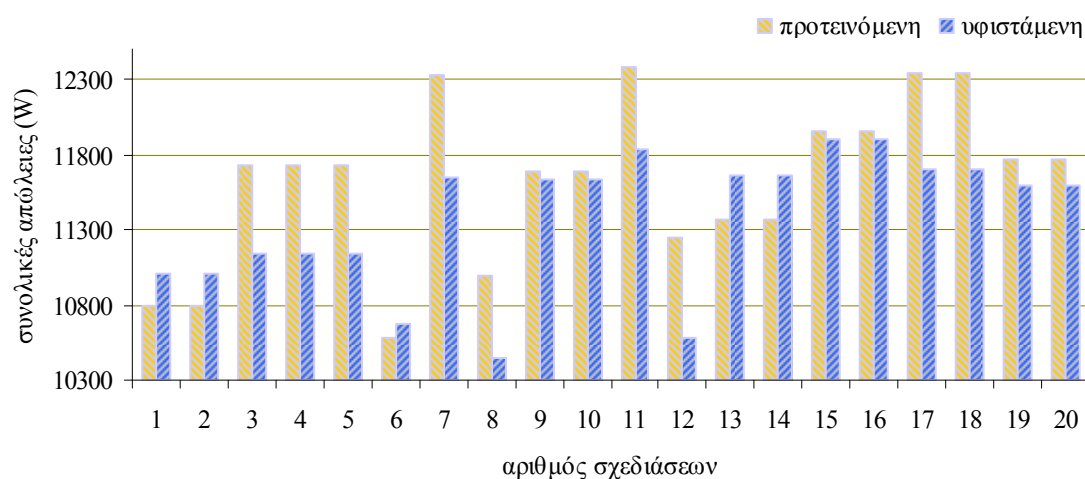
Σχήμα 4.12 Συνολικές απώλειες για κάθε μια από τις 24 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 1000 kVA.



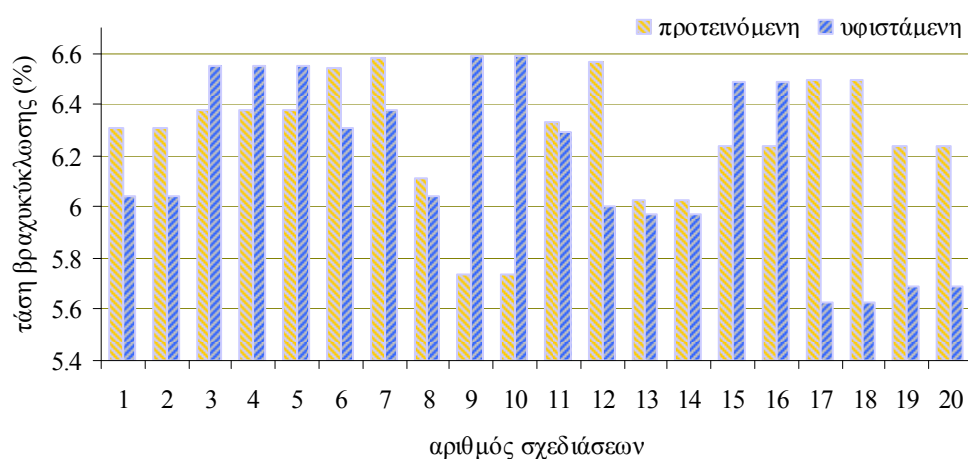
Σχήμα 4.13 Τάση βραχυκύκλωσης για κάθε μια από τις 24 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 1000 kVA.



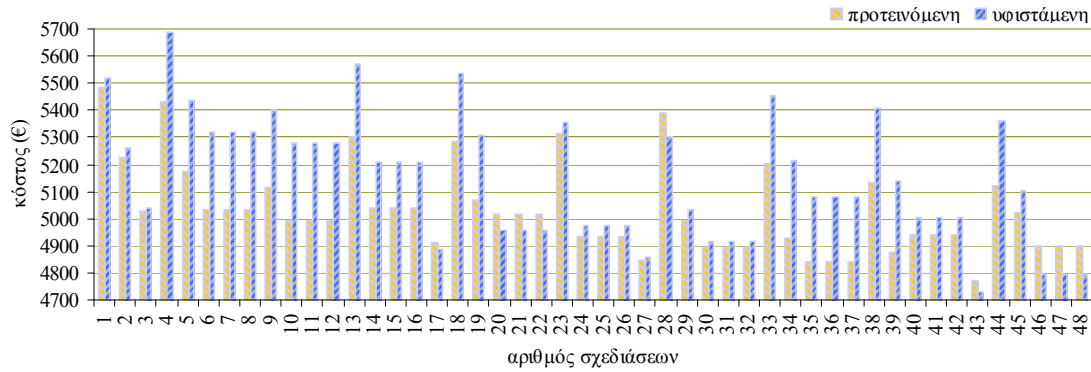
Σχήμα 4.14 Συνολικό κόστος των οκτώ κύριων υλικών για κάθε μια από τις 20 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 800 kVA.



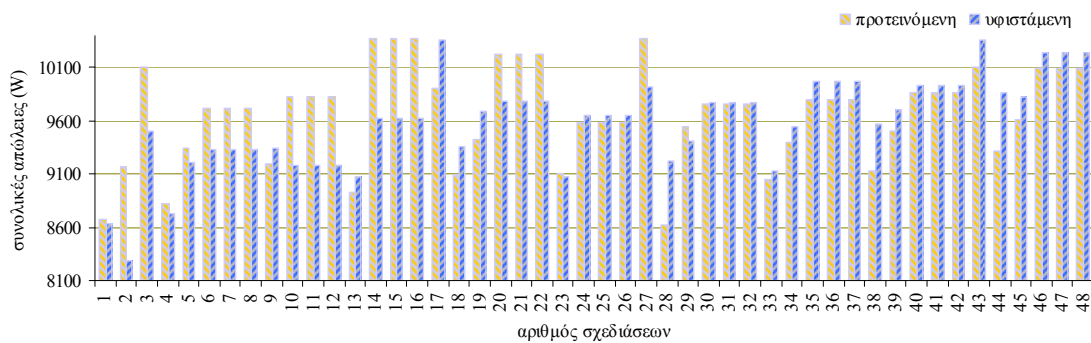
Σχήμα 4.15 Συνολικές απώλειες για κάθε μια από τις 20 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 800 kVA.



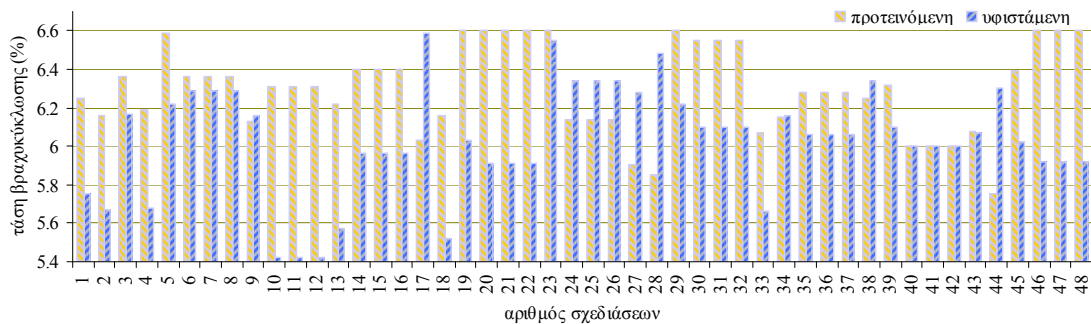
Σχήμα 4.16 Τάση βραχυκύκλωσης για κάθε μια από τις 20 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 800 kVA.



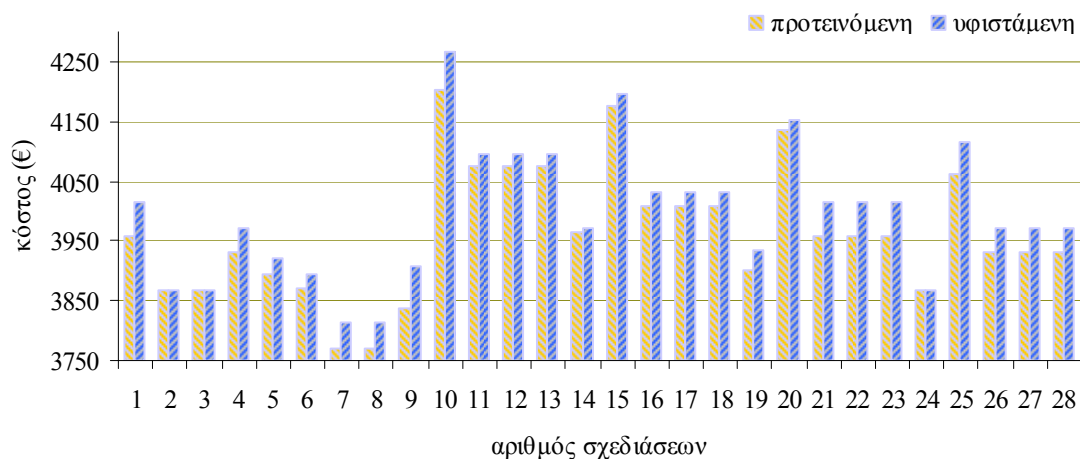
Σχήμα 4.17 Συνολικό κόστος των οκτώ κύριων υλικών για κάθε μια από τις 48 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 630 kVA.



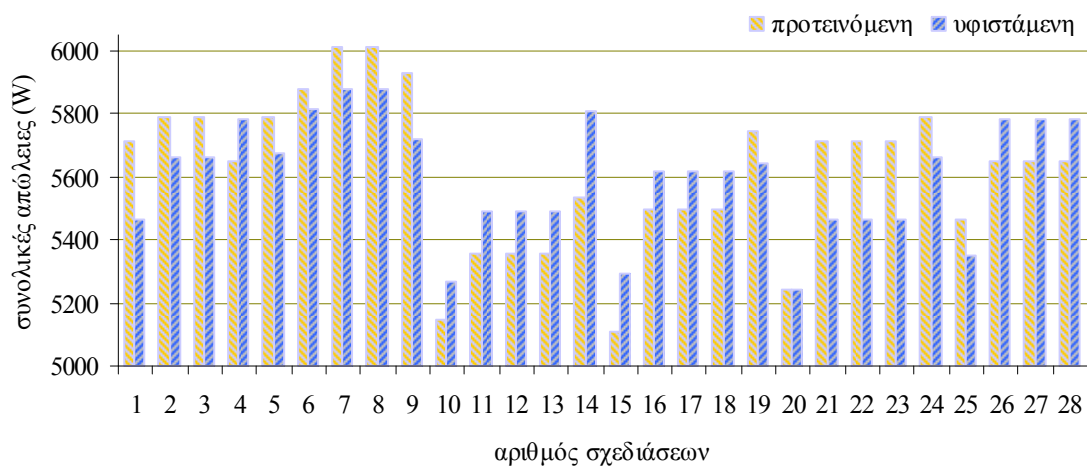
Σχήμα 4.18 Συνολικές απώλειες για κάθε μια από τις 48 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 630 kVA.



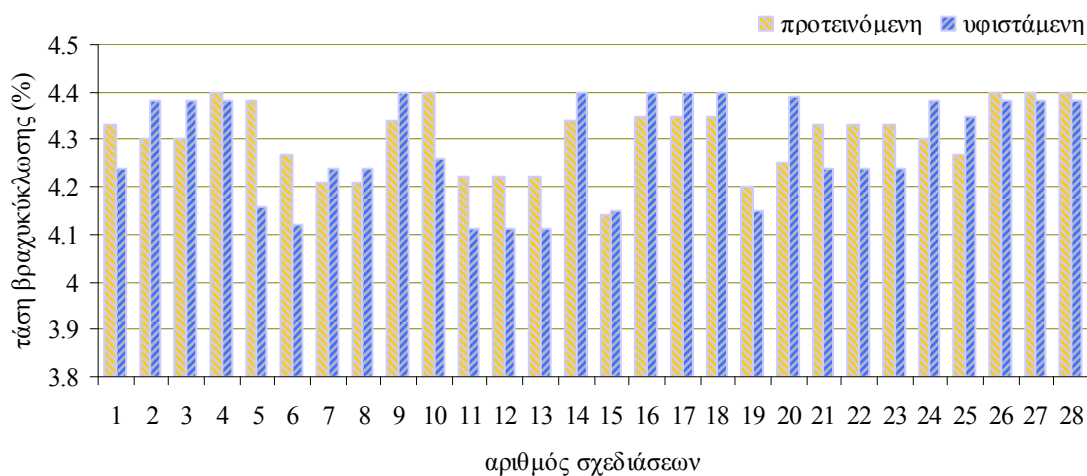
Σχήμα 4.19 Τάση βραχυκύκλωσης για κάθε μια από τις 48 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 630 kVA.



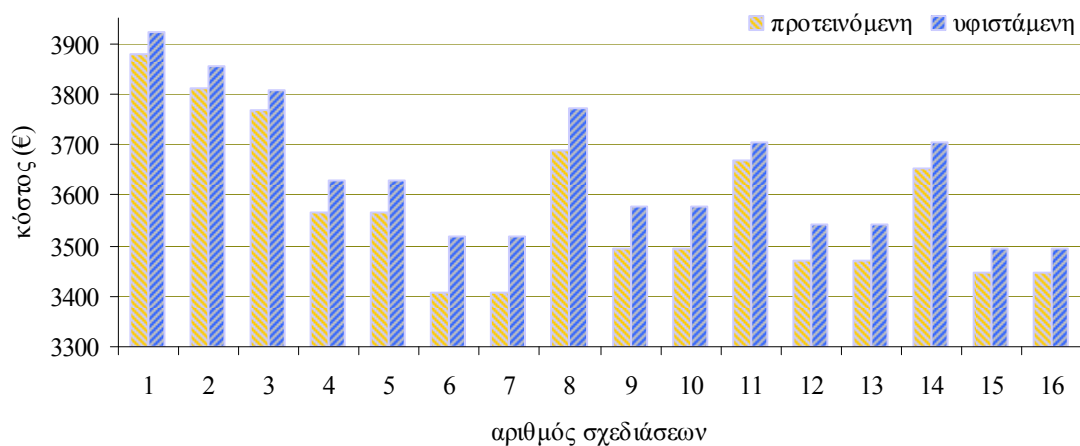
Σχήμα 4.20 Συνολικό κόστος των οκτώ κύριων υλικών για κάθε μια από τις 28 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 400 kVA.



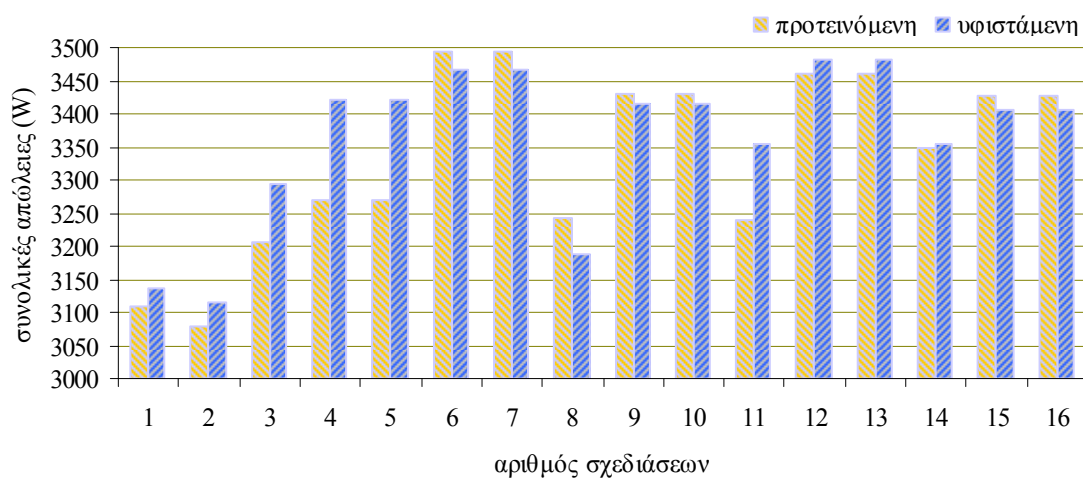
Σχήμα 4.21 Συνολικές απώλειες για κάθε μια από τις 28 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 400 kVA.



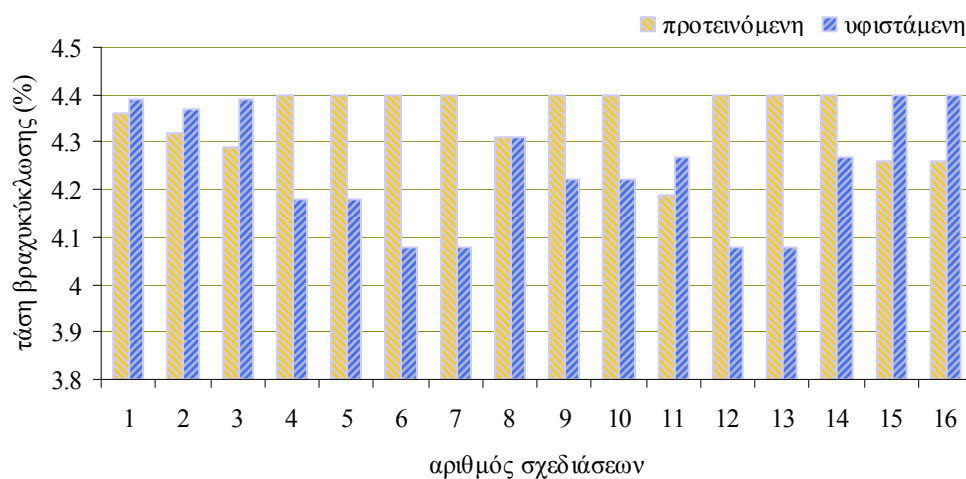
Σχήμα 4.22 Τάση βραχυκύκλωσης για κάθε μια από τις 28 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 400 kVA.



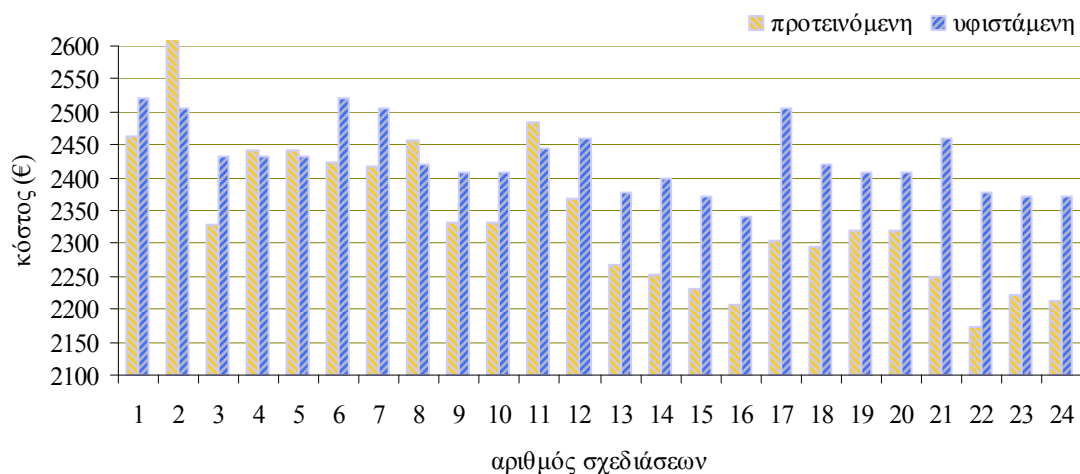
Σχήμα 4.23 Συνολικό κόστος των οκτώ κύριων υλικών για κάθε μια από τις 16 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 250 kVA.



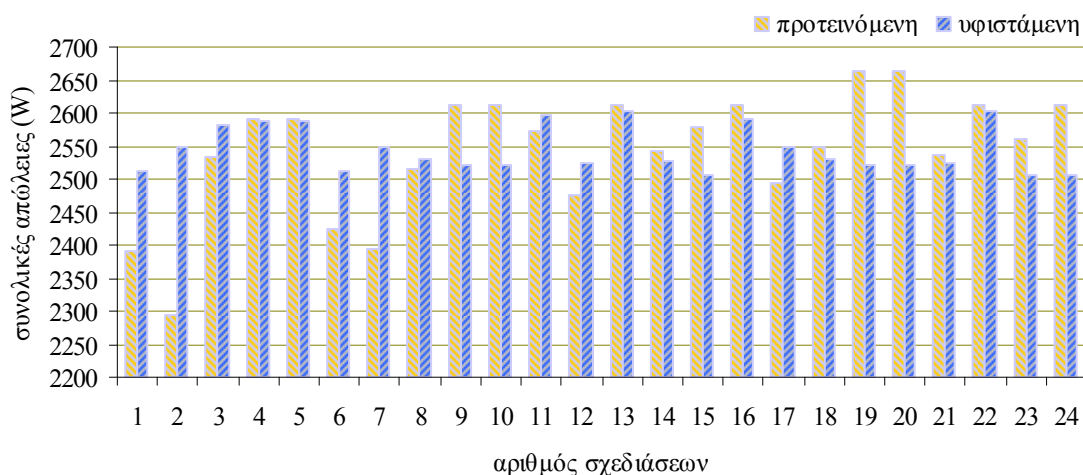
Σχήμα 4.24 Συνολικές απώλειες για κάθε μια από τις 16 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 250 kVA.



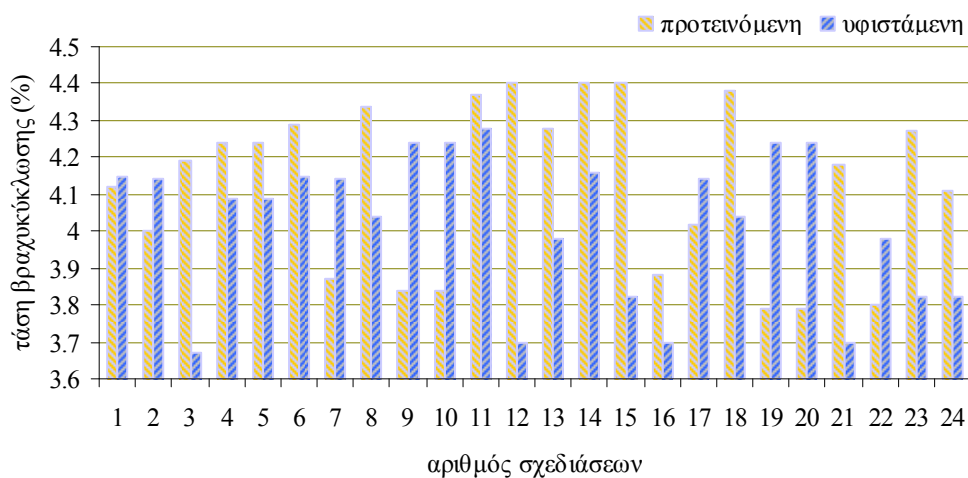
Σχήμα 4.25 Τάση βραχυκύκλωσης για κάθε μια από τις 16 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 250 kVA.



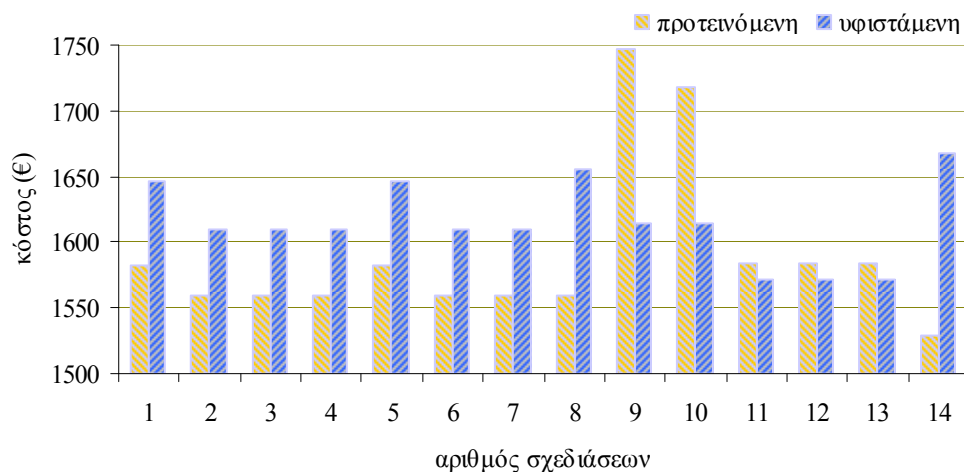
Σχήμα 4.26 Συνολικό κόστος των οκτώ κύριων υλικών για κάθε μια από τις 24 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 160 kVA.



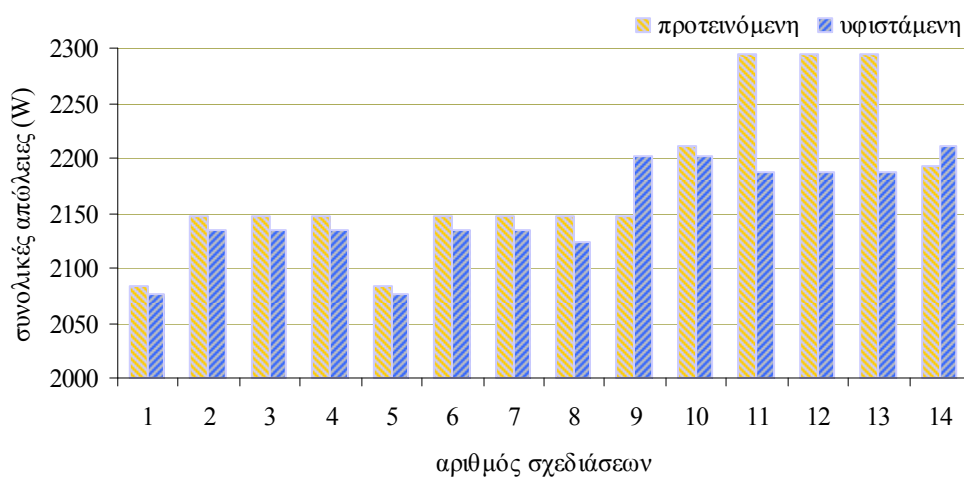
Σχήμα 4.27 Συνολικές απώλειες για κάθε μια από τις 24 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 160 kVA.



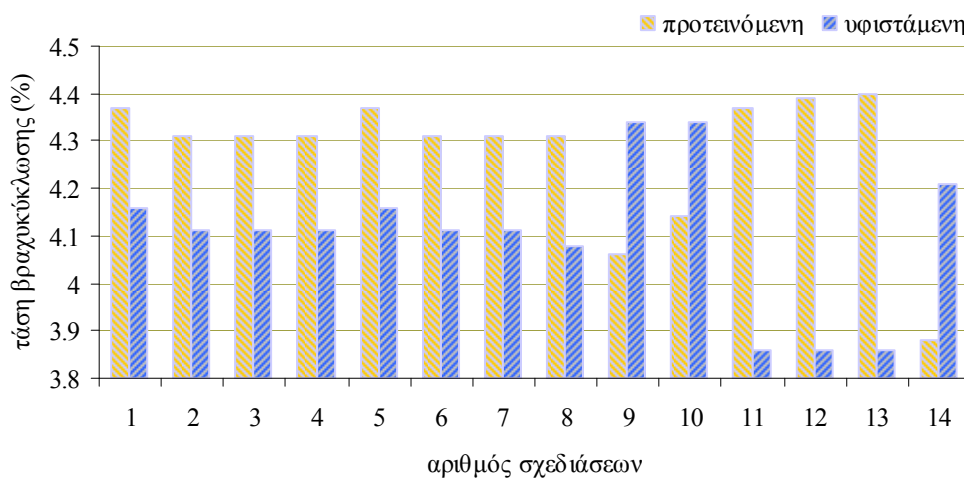
Σχήμα 4.28 Τάση βραχυκύκλωσης για κάθε μια από τις 24 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 160 kVA.



Σχήμα 4.29 Συνολικό κόστος των οκτώ κύριων υλικών για κάθε μια από τις 14 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 100 kVA.



Σχήμα 4.30 Συνολικές απώλειες για κάθε μια από τις 14 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 100 kVA.



Σχήμα 4.31 Τάση βραχυκύκλωσης για κάθε μια από τις 14 σχεδιάσεις μετασχηματιστών με ισχύ 100 kVA.

4.4.6 Αποτελέσματα Διαφοροποίησης της Αντικειμενικής Συνάρτησης

Ο Πίνακας 4.6 παρουσιάζει τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης για το μετασχηματιστή ισχύος 400 kVA (Πίνακας 4.3) χρησιμοποιώντας ως αντικειμενικές συναρτήσεις τις (4.34) και (4.36). Παρά το γεγονός ότι η (4.36) εντοπίζει μια βέλτιστη λύση όπου το κόστος των οκτώ κύριων υλικών είναι 225€ ακριβότερο από εκείνη τη λύση που εντοπίζει η (4.34), το συνολικό κόστος κατοχής TOC της (4.36) είναι ελαφρώς χαμηλότερο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μέσω της συνάρτησης (4.36), το πρόβλημα βελτιστοποίησης ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος κατοχής, δηλαδή ελαχιστοποιεί το άθροισμα της τιμής πώλησης του μετασχηματιστή, του κόστους των απωλειών κενού φορτίου και του κόστους των απωλειών φορτίου. Αναλυτικότερα, παρατηρείται ότι οι σχεδιασμένες απώλειες κενού φορτίου μειώθηκαν (από τα 859 W στα 719 W) διότι ο συντελεστής απωλειών κενού φορτίου A εμπεριέχει δεδομένα τα οποία επηρέασαν τη βελτιστοποίηση. Άλλωστε, οι συγκεκριμένες απώλειες, είναι σταθερές σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας του μετασχηματιστή ανεξάρτητα από το φορτίο του. Από την άλλη μεριά, οι απώλειες φορτίου αποτελούν και αυτές σημαντικό μέρος αλλά σε καμία περίπτωση δεν έχουν τη βαρύτητα των απωλειών κενού φορτίου (γεγονός το οποίο αντικατοπτρίζεται στη σχέση των συντελεστών A και B). Αυτό άλλωστε γίνεται αντιληπτό από το γεγονός ότι παρόλο που αυξήθηκαν οι απώλειες φορτίου (από τα 4288 W στα 4613 W), το συνολικό κόστος κατοχής, μετά από 30 χρόνια λειτουργίας του μετασχηματιστή, παρέμεινε μικρότερο. Σε κάθε περίπτωση, η μείωση του κόστους απωλειών συνεπάγεται μεγαλύτερο κατασκευαστικό κόστος, λόγω της επιλογής υλικού πυρήνα χαμηλότερων απωλειών (για τη μείωση των απωλειών κενού φορτίου) και την αύξηση της διατομής των πηνίων (για τη μείωση των απωλειών φορτίου). Το συνολικό κόστος κατοχής παρουσιάζει ωστόσο πολύ μικρή μείωση, όταν χρησιμοποιείται η αντικειμενική συνάρτηση (4.36) σε σχέση με το συνολικό κόστος κατοχής το οποίο αντιστοιχεί στη λύση που δίνει η αντικειμενική συνάρτηση (4.34), καταδεικνύοντας τη δυσκολία βελτιστοποίησης των διαφορετικών στόχων του προβλήματος της (4.36) (η μείωση που επιτυγχάνεται στο κόστος απωλειών εξισορροπείται πρακτικά από την αύξηση στο κατασκευαστικό κόστος και κατά επέκταση στην τιμή πώλησης του μετασχηματιστή).

Πίνακας 4.6 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για το μετασχηματιστή ισχύος 400 kVA (Πίνακας 4.3), ελαχιστοποιώντας (α) το κόστος των οκτώ κύριων υλικών (β) το συνολικό κόστος κατοχής.

<i>Μεταβλητή</i>	<i>Ελαχιστοποίηση κόστους οκτώ κύριων υλικών</i>	<i>Ελαχιστοποίηση συνολικού κόστους κατοχής</i>
<i>CRM (€)</i>	605	605
<i>LC (€)</i>	2171	2171
<i>SM (%)</i>	35	35
<i>MMC (€)</i>	4203	4428
<i>TMC (€)</i>	6779	7004
<i>BP (€)</i>	9684	10006
<i>NLL (W)</i>	859	719
<i>LL (W)</i>	4288	4613
<i>A (€/W)</i>	8.31	8.31
<i>B (€/W)</i>	2.49	2.49
<i>TOC (€)</i>	27500	27467

Αξίζει να σημειωθεί ακόμη ότι περαιτέρω έρευνα που πραγματοποιήθηκε, έφερε στην επιφάνεια το συμπέρασμα ότι το συνολικό κόστος κατοχής της (4.36) είναι συνήθως μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό της (4.34). Συγκεκριμένα, ο Πίνακας 4.7 παρουσιάζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός μετασχηματιστή διανομής ισχύος 250 kVA με απώλειες CC' σύμφωνα με το πρότυπο της CENELEC [4.35]. Με βάση τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά,

πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση με χρήση της (4.36) καθώς επίσης και με την (4.36) εξετάζοντας μια σειρά από διαφορετικά δεδομένα εισόδου, έχοντας ως στόχο την καταγραφή της συμπεριφοράς της (4.36).

Πίνακας 4.7 Τεχνικά χαρακτηριστικά μετασχηματιστή 250 kVA.

<i>Χαρακτηριστικό</i>	<i>Τιμή</i>	<i>Μονάδα</i>
Ονομαστική ισχύς	250	kVA
Υλικό πηνίου χαμηλής τάσης	Χαλκός	-
Υλικό πηνίου υψηλής τάσης	Χαλκός	-
Τιμή της πολικής τάσης του πηνίου χαμηλής τάσης	400	V
Τιμή της πολικής τάσης του πηνίου υψηλής τάσης	20000	V
Συνδεσμολογία	Dyn11	-
Εγγυημένες απώλειες κενού φορτίου	425	W
Εγγυημένες απώλειες φορτίου	2750	W
Εγγυημένη τάση βραχυκύκλωσης	4	%
Ονομαστική συχνότητα	50	Hz
Είδος μαγνητικού υλικού πυρήνα	MOH 0.27	-

Ο Πίνακας 4.8 παρουσιάζει τη μεταβολή του συνολικού κόστους κατοχής για διάφορες τιμές των παραμέτρων εισόδου, οι οποίες επηρεάζουν τους συντελεστές απωλειών A και B , καθώς και την ποσοστιαία διαφορά του κόστους κατοχής της βέλτιστης λύσης που προκύπτει χρησιμοποιώντας ως αντικειμενική συνάρτηση την (4.34) και (4.36). Σε κάθε περίπτωση επισημαίνεται (με έντονη γραμματοσειρά στη στήλη που αντιστοιχεί στη βελτιστοποίηση με χρήση της αντικειμενικής συνάρτησης (4.36)) η παράμετρος η οποία μεταβάλλεται. Στην περίπτωση I της (4.36) (Πίνακας 4.8), η οποία χρησιμοποιείται ως περίπτωση αναφοράς (ως προς τη μεταβολή των παραμέτρων για τις υπόλοιπες περιπτώσεις που παρουσιάζει ο Πίνακας 4.8), το συνολικό κόστος κατοχής χρησιμοποιώντας ως αντικειμενική συνάρτηση το συνολικό κόστος κατοχής (4.36) είναι 0.46% μεγαλύτερο από την (4.34). Στην περίπτωση II της (4.36) λαμβάνει τα ίδια χαρακτηριστικά με την περίπτωση I, αλλά με $BL=40$ χρόνια έχοντας ως αποτέλεσμα και την αλλαγή των συντελεστών απωλειών, δηλαδή $A=9.1\text{€/kW}$ και $B=3.6\text{€/kW}$. Το TOC και σε αυτήν την περίπτωση (όπως και στην περίπτωση αναφοράς I) αυξήθηκε κατά 5.8% σε σχέση με την (4.34). Η περίπτωση III της (4.36) λαμβάνει τα ίδια χαρακτηριστικά με την περίπτωση I, με την διαφορά ότι το $SM=60\%$, έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση της διαφοράς στο 22.77% σε σχέση με την (4.34). Στην περίπτωση IV της (4.36) τροποποιείται το $SM=20\%$, έχοντας ως αποτέλεσμα την μείωση του TOC της (4.36) κατά 10.47%. Ακόμη, στην περίπτωση V όπου το $SM=30\%$ και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά είναι ίδια με την περίπτωση I, το TOC της (4.36) μειώθηκε κατά 5.78%. Στην περίπτωση VI της (4.36) μειώνεται το κόστος των εργατικών και των υλικών, δηλαδή το $CRM=505\text{€}$ και $LC=1000\text{€}$ (μείωση CRM κατά $100\text{€}=16.5\%$ και LC κατά $478\text{€}=32.3\%$ σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς, αντίστοιχα), έχοντας ως αποτέλεσμα την μείωση του TOC της (4.36) κατά 3.79%. Τέλος, στην περίπτωση VII της (4.36) αυξάνεται το κόστος των εργατικών και των υλικών, δηλαδή ξανά το $CRM=845\text{€}$ και $LC=2040\text{€}$ (αύξηση CRM κατά $240\text{€}=39.7\%$ και LC κατά $562\text{€}=38.0\%$ σε σχέση με την περίπτωση αναφοράς, αντίστοιχα), έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση του TOC της (4.36) κατά 6.35%.

Πίνακας 4.8 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για το μετασχηματιστή ισχύος 250 kVA χρησιμοποιώντας ως αντικειμενικές συναρτήσεις τις (4.34) και (4.36).
(α)

<i>Μεταβλητή</i>	<i>περίπτωση I</i>		<i>περίπτωση II</i>		<i>περίπτωση III</i>		<i>περίπτωση IV</i>	
	<i>(4.34)</i>	<i>(4.36)</i>	<i>(4.34)</i>	<i>(4.36)</i>	<i>(4.34)</i>	<i>(4.36)</i>	<i>(4.34)</i>	<i>(4.36)</i>
<i>CRM</i> (€)	605	605	605	605	605	605	605	605
<i>LC</i> (€)	1478	1478	1478	1478	1478	1478	1478	1478
<i>SM</i> (%)	40	40	40	40	40	60	40	20
<i>BL</i> (χρόνια)	30	30	30	40	30	30	30	30
<i>A</i> (€/W)	8.31	8.31	8.31	9.1	8.31	8.3	8.31	8.3
<i>B</i> (€/W)	3.32	3.32	3.32	3.6	3.32	3.3	3.32	3.3
<i>MMC</i> (€)	3725	3856	3725	3893	3725	3935	3725	3873
<i>TMC</i> (€)	5808	5939	5808	5976	5808	6018	5808	5956
<i>BP</i> (€)	9681	9898	9681	9960	9681	15045	9681	7445
<i>NLL</i> (W)	489	486	489	461	489	467	489	466
<i>LL</i> (W)	2692	2666	2692	2732	2692	2704	2692	2725
<i>A</i> (€/W)	8.31	8.31	8.31	9.1	8.31	8.3	8.31	8.3
<i>B</i> (€/W)	3.32	3.32	3.32	3.6	3.32	3.3	3.32	3.3
<i>TOC</i> (€)	22682	22787	22682	23996	22682	27847	22682	20306
<i>Διαφορά (4.34) σε σχέση με (4.36)</i>	0.46%		5.8%		22.77%		-10.47%	

(β)

<i>Μεταβλητή</i>	<i>περίπτωση V</i>		<i>περίπτωση VI</i>		<i>περίπτωση VII</i>	
	<i>(4.34)</i>	<i>(4.36)</i>	<i>(4.34)</i>	<i>(4.36)</i>	<i>(4.34)</i>	<i>(4.36)</i>
<i>CRM</i> (€)	605	605	605	505	605	845
<i>LC</i> (€)	1478	1478	1478	1000	1478	2040
<i>SM</i> (%)	40	30	40	40	40	40
<i>BL</i> (χρόνια)	30	30	30	30	30	30
<i>A</i> (€/W)	8.31	8.3	8.31	8.3	8.31	8.3
<i>B</i> (€/W)	3.32	3.3	3.32	3.3	3.32	3.3
<i>MMC</i> (€)	3725	3903	3725	3848	3725	3848
<i>TMC</i> (€)	5808	5986	5808	5353	5808	6733
<i>BP</i> (€)	9681	8552	9681	8921	9681	11221
<i>NLL</i> (W)	489	472	489	489	489	489
<i>LL</i> (W)	2692	2701	2692	2680	2692	2680
<i>A</i> (€/W)	8.31	8.3	8.31	8.3	8.31	8.3
<i>B</i> (€/W)	3.32	3.3	3.32	3.3	3.32	3.3
<i>TOC</i> (€)	22682	21381	22682	21821	22682	24121
<i>Διαφορά (4.34) σε σχέση με (4.36)</i>	-5.73%		-3.79%		6.35%	

Βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων, γίνεται αντιληπτό ότι ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης προσαρμόζεται ανάλογα με τις ανάγκες των δεδομένων εισόδου. Ανάλογα λοιπόν με τους συντελεστές απωλειών, το κόστος εργατικών και των υλικών, τη διάρκεια μελέτης καθώς επίσης και πολλών δεδομένων που εμπεριέχονται στους συντελεστές *A* και *B* (για παράδειγμα επιτόκιο, ποσοστό φόρτισης, τιμή ηλεκτρικής ενέργειας), το συνολικό κόστος κατοχής είναι ευνοϊκότερο ή όχι. Ειδικότερα, αύξηση στη διάρκεια ζωής (περίπτωση II) οδηγεί σε ελαφρά αύξηση του βέλτιστου κόστους κατοχής (η μείωση του κόστους απωλειών δεν καταφέρνει να ξεπεράσει την αύξηση στο κατασκευαστικό κόστος, λόγω της μεγαλύτερης διάρκειας ζωής, η οποία συνεπάγεται αύξηση της συνολικής ενέργειας απωλειών), ενώ σημαντική αύξηση στο περιθώριο κέρδους (περίπτωση III) αυξάνει σε μεγάλο βαθμό το συνολικό κόστος κατοχής, δεδομένου ότι επιβαρύνει σημαντικά το ήδη

αυξημένο κατασκευαστικό κόστος (σε σχέση με αυτό που δίνει η βελτιστοποίηση μόνο των οκτώ κύριων υλικών του μετασχηματιστή). Αντίθετα, μικρή μείωση του περιθωρίου κέρδους (περιπτώσεις IV και V) οδηγεί σε μικρή βελτίωση του βέλτιστου TOC ενώ μείωση του κόστους των υπολοίπων υλικών (εκτός των οκτώ κύριων υλικών του μετασχηματιστή) οδηγεί ξανά σε μείωση του βέλτιστου TOC που δίνει η (4.36). Τέλος, η αύξηση του κόστους των υπολοίπων υλικών και του κόστους εργατικών (περίπτωση VI) οδηγεί σε αύξηση του βέλτιστου TOC που δίνει η (4.36). Σε κάθε περίπτωση όμως, η συγκεκριμένη μέθοδος βελτιστοποίησης, δηλαδή διαφοροποιώντας την αντικειμενική συνάρτηση, αποτελεί ένα ακόμη ισχυρό εργαλείο το οποίο είναι στη διάθεση του μελετητή μετασχηματιστών.

4.4.7 Πλεονεκτήματα της Προτεινόμενης Μεθοδολογίας Βελτιστοποίησης της Σχεδίασης των Μετασχηματιστών

Τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε σύγκριση με την υφιστάμενη μεθοδολογία είναι τα ακόλουθα:

- Η προτεινόμενη μεθοδολογία χρειάζεται 26 παραμέτρους εισόδου για τη βέλτιστη σχεδίαση, σε αντίθεση με την υφιστάμενη που χρειάζεται 134 παραμέτρους εισόδου. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι στην προτεινόμενη μέθοδο ένα μεγάλο ποσοστό των δεδομένων εισόδου ορίζονται αυτόματα, λαμβάνοντας υπόψη τις 14 παραμέτρους εισόδου που αφορούν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά ενός μετασχηματιστή, ενώ οι υπόλοιπες 12 παράμετροι εισόδου αφορούν τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.
- Η προτεινόμενη μεθοδολογία εντοπίζει βέλτιστη λύση που είναι κατά μέσο όρο 1.60% φθηνότερη από τη λύση που δίνει η υφιστάμενη μεθοδολογία. Το συγκεκριμένο ποσοστό προέκυψε μετά από μια πληθώρα βέλτιστων σχεδιάσεων που πραγματοποιήθηκαν σε ευρύ φάσμα μετασχηματιστών διανομής διαφορετικής ονομαστικής ισχύος, απωλειών και γενικότερα διαφορετικών τεχνικών χαρακτηριστικών.
- Η προτεινόμενη μεθοδολογία καταλήγει σχεδόν πάντα στη βέλτιστη λύση ανεξαρτήτως από το εύρος των διαστημάτων των μεταβλητών σχεδίασης. Με άλλα λόγια, ο χρήστης κατά τη σχεδίαση ενός μετασχηματιστή μπορεί να ορίσει τα ανώτερα και κατώτερα διαστήματα των μεταβλητών σχεδίασης με τέτοιες τιμές, οι οποίες να καθορίζουν ένα αρκετά μεγάλο διάστημα. Για παράδειγμα, μπορεί να καθορίσει το διάστημα [5 35], το οποίο αντιπροσωπεύει το διάστημα μέσα στο οποίο πρέπει να επιλεγεί ο αριθμός των σπειρών του πηνίου της χαμηλής τάσης για ένα μετασχηματιστή με ονομαστική ισχύ 1600 kVA. Αντίστοιχα μπορεί να καθορίσει και τα υπόλοιπα διαστήματα που αντιπροσωπεύουν τις υπόλοιπες μεταβλητές σχεδίασης. Παρά το γεγονός ότι μπορεί να έχουν επιλεγεί μεγάλα διαστήματα, κυρίως από έναν άπειρο χρήστη, η προτεινόμενη μεθοδολογία εντοπίζει τη βέλτιστη λύση σε σύντομο χρονικό διάστημα, σε αντίθεση με την υφιστάμενη μεθοδολογία, βάσει της οποίας ισχύει ότι όσο πιο μεγάλα διαστήματα επιλέξει ο χρήστης τόσο πιο δύσκολο είναι να εντοπιστεί η βέλτιστη λύση εξαιτίας του πεπερασμένου βήματος ενώ παράλληλα η διαδικασία είναι αρκετά χρονοβόρα.
- Οι τρεις καινοτομικές προσεγγίσεις που αφορούν τον υπολογισμό της τιμής της πυκνότητας ρεύματος εξασφαλίζουν την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης εντοπίζοντας την ολικά βέλτιστη σχεδίαση, η οποία ικανοποιεί τις διεθνείς προδιαγραφές και τις απαιτήσεις του πελάτη. Αντιθέτως, ο βηματικός τρόπος που αναζητά η υφιστάμενη μεθοδολογία τη βέλτιστη λύση δεν εγγυάται ολικό βέλτιστο.
- Η ταχύτητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας στον εντοπισμό της βέλτιστης λύσης είναι ακόμη ένα πλεονέκτημα σε σχέση με υφιστάμενη μεθοδολογία.
- Η προτεινόμενη μεθοδολογία καταλήγει πάντα σε μια βέλτιστη λύση σε αντίθεση με την υφιστάμενη μεθοδολογία που μπορεί να απορρίψει όλες τις υποψήφιες λύσεις.
- Η προτεινόμενη μεθοδολογία δεν απαιτεί πολυετή εμπειρία από το μελετητή ώστε να εντοπιστεί η βέλτιστη λύση, σε αντίθεση με την υφιστάμενη μεθοδολογία όπου ο

χρήστης χρειάζεται τεχνογνωσία και εμπειρία για τον επιτυχή χειρισμό και βελτιστοποίηση μιας σχεδίασης μετασχηματιστή.

- Το γραφικό περιβάλλον της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι πολύ φιλικό, συγκεντρώνοντας τις απαραίτητες μεταβλητές εισόδου στο κύριο παράθυρο (Παράρτημα Α), χωρίς να κουράζει το χρήστη με πολλαπλά παράθυρα. Με άλλα λόγια, το γραφικό περιβάλλον είναι αρκετά ευέλικτο για κάθε χρήστη, είτε πρόκειται για έναν εξειδικευμένο σχεδιαστή μετασχηματιστών είτε για έναν αρχάριο. Παράλληλα, παρουσιάζει εποπτικά τα δεδομένα εξόδου (χαρακτηριστικά σχεδίασης και απόδοσης βέλτιστου μετασχηματιστή) επιτρέποντας στο χρήστη να αξιολογεί άμεσα τη βέλτιστη λύση.

4.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν υβριδικές μεθοδολογίες μικτού ακεραίου μη γραμμικού προγραμματισμού σε συνδυασμό με τα πεπερασμένα στοιχεία και νέες τεχνικές που επεμβαίνουν στη σχεδίαση του μετασχηματιστή, μεθοδολογίες που αποδείχθηκαν ότι είναι ικανές να επιλύσουν επιτυχημένα το πρόβλημα βελτιστοποίησης, δηλαδή να ελαχιστοποιήσουν το κατασκευαστικό κόστος των μετασχηματιστών διανομής τυλιγμένου πυρήνα. Η εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων είχε ως στόχο την εύρεση της βέλτιστης σχεδίασης των μετασχηματιστών διανομής. Συγκεκριμένα, λόγω της ευρετικής φύσης του αλγόριθμου βελτιστοποίησης, η υφιστάμενη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία δεν έχει την ικανότητα να υπολογίσει το ολικό βέλτιστο μιας σχεδίασης, παρά μόνο να προσεγγίσει τη βέλτιστη λύση, αδυνατώντας να μειώσει περαιτέρω το κόστος κατασκευής των μετασχηματιστών διανομής. Στόχος που υλοποιήθηκε στο συγκεκριμένο κεφάλαιο ήταν να εφαρμοστούν μεθοδολογίες καινοτομικές, ικανές να προσδιορίσουν τη βέλτιστη σχεδίαση μετασχηματιστών, μειώνοντας το κατασκευαστικό κόστος ενώ παράλληλα να ικανοποιούν τους περιορισμούς (πελατών και βιομηχανίας) και τις διεθνείς προδιαγραφές.

4.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] P. C. Paiva, H. M. Khodr, J. A. Dominguez-Navarro, J. M. Yusta, A. J. Urdaneta, "Integral planning of primary-secondary distribution systems using mixed integer linear programming," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 1134-1143, May 2005.
- [4.2] M.A. Farrag, M. M. El-Metwally, "New method for transmission planning using mixed-integer programming" in *IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution*, vol. 135, no. 4, pp. 319-323, Jul 1988.
- [4.3] R. N. Adams, M. A. Laughton, "Optimal planning of power networks using mixed-integer programming", in *IEEE Proc. Generation, Transmission and Distribution*, vol. 121, no. 2, pp. 139-147, 1974.
- [4.4] T. Li, M. Shahidehpour, "Price-based unit commitment: A case of Lagrangian relaxation VS. mixed integer programming," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, pp. 2015-2025, Nov. 2005.
- [4.5] T. S. Dillon, K. W. Edwin, H. D. Kochs, R. J. Taud, "Integer programming approach to the problem of optimal unit commitment with probabilistic reserve determination," *IEEE Transactions on Power Apparatus Systems*, vol. PAS-97, pp. 2154-2166, Nov./Dec. 1978.
- [4.6] C. W. Chang, J. G. Waight, "A mixed integer linear programming based hydro unit commitment," *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 2, pp. 924-928, 1999.

- [4.7] O. Nilsson, D. Sjelvgren, "Integer modelling of spinning reserve requirements in short term scheduling of hydro systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, no. 3, pp. 959-964, Aug. 1998.
- [4.8] E. Delarue, D. Bekaert, R. Belmans, W. D'haeseleer, "Development of a comprehensive electricity generation simulation model using a mixed integer programming approach," *International Journal of Electrical, Computer and Systems Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 92-97, 2007.
- [4.9] F. G. M. Lima, F. D. Galiana, I. Kockar, J. Munoz, "Phase shifter placement in large-scale systems via mixed integer linear programming," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 3, pp. 1029-1034, Aug. 2003.
- [4.10] D. Bienstock, S. Mattia, "Using mixed-integer programming to solve power grid blackout problems," *Discrete Optimization*, vol. 4, no. 1, pp. 115-141, Mar. 2007.
- [4.11] F. S. Hillier, G. J. Lieberman, *Introduction to Operations Research*, 7th Edition. McGraw Hill, 2001.
- [4.12] C. A. Floudas, *Nonlinear and Mixed Integer Optimization: Fundamentals and Applications*, Oxford University Press, 1995.
- [4.13] E. Castillo, A. J. Conejo, P. Pedregal, R. Garcia, N. Alguacil, *Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science*, Wiley, 2002.
- [4.14] M. Duran, I.E. Grossmann, "An outer-approximation algorithm for a class of mixed-integer nonlinear programs," *Mathematical Programming*, vol. 36, pp. 307-339, 1986.
- [4.15] R. Fletcher, S. Leyffer, "Solving mixed integer nonlinear programs by outer approximation," *Mathematical Programming*, vol. 66, pp. 327-349, 1994.
- [4.16] A. M. Geoffrion, "Generalized benders decomposition," *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 10, pp. 237-260, 1972.
- [4.17] O. E. Flippo, A. H. G. Rinnoy Kan, "Decomposition in general mathematical programming," *Mathematical Programming*, vol. 60, pp. 361-382, 1993.
- [4.18] C. A. Floudas, *Nonlinear and Mixed-Integer Optimization*, Oxford University Press: New York, 1995.
- [4.19] R. A. Stubbs, S. Mehrotra, "A branch-and-cut method for 0-1 mixed convex programming," *Technical report 96-01*, Department of IE/MS, Northwestern University, Evanston, IL 60208, USA, Jan. 1996.
- [4.20] R. J. Dakin, "A tree search algorithm for mixed integer programming problems," *Computer Journal*, vol. 8, pp. 250-255, 1965.
- [4.21] S. Leyffer, "Integrating SQP and branch-and-bound for mixed integer nonlinear programming," *Computational Optimization and Applications*, vol. 18, no. 3, pp. 295 - 309, 2001.
- [4.22] J. S. Arora, *Introduction to Optimum Design*, Second Edition, Elsevier Academic Press, San Diego, CA, 2004.
- [4.23] M. J. D. Powell, "Variable Metric Methods for Constrained Optimization," *Mathematical Programming: The State of the Art*, (A. Bachem, M. Grotschel and B. Korte, eds.) Springer Verlag, pp 288-311, 1983.
- [4.24] R. Fletcher, *Practical Methods of Optimization*, John Wiley and Sons, 1987.
- [4.25] G. Dhatt, G. Touzot, "*Une presentation de la methode des elements finis*," Collection Universite de Compiegne, Maloine editeur, Paris, 1984.
- [4.26] A. G. Kladas, J. A. Tegopoulos, "A new scalar potential formulation for 3D Magnetostatics necessitating no source field calculation". *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 28, no. 2, March 1992, pp. 1103-1106.
- [4.27] M. A. Tsili, A. G. Kladas, P. S. Georgilakis, A. T. Souflaris, D. G. Paparigas, "Advanced design methodology for single and dual voltage wound core power

- transformers based on a particular finite element model,” *Electric Power System Research*, vol. 76, pp. 729-741, 2006.
- [4.28] E. I. Amoiralis, E. Litsos, P. S. Georgilakis, “Methodology for the optimum design of power transformers using minimum number of input parameters,” in *Proceedings of the International Conference on Electrical Machines (ICEM 2006)*, paper no. PTM 3-7, Chania, Greece, Sept. 2006.
- [4.29] E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, M. Tsili, “Design optimization of distribution transformers based on mixed integer programming methodology”, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 10, no. 5, p. 1178-1183, May 2008.
- [4.30] E. I. Amoiralis, M. A. Tsili, P. S. Georgilakis, A. G. Kladas, A. T. Souflaris, “A parallel mixed integer programming-finite element method technique for global design Optimization of power transformers,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 6, p. 1022-1025, June 2008.
- [4.31] E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, M. A. Tsili, A. G. Kladas, “Global transformer optimization method using evolutionary design and numerical field computation,” In *Proceedings of the 13th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC 2008)*, Athens, Greece, May 11-15, 2008.
- [4.32] IEC 60076-1, *Power transformers – Part 1: General*, 2000.
- [4.33] P. S. Georgilakis, M. A. Tsili, A. T. Souflaris, “A heuristic solution to the transformer manufacturing cost optimization problem,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 181, no. 1-3, pp. 260-266, 2007.
- [4.34] M. A. Tsili, E. I. Amoiralis, A. G. Kladas, A. T. Souflaris, “Hybrid numerical-analytical technique for power transformer thermal modeling,” *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008 (accepted).
- [4.35] CENELEC Harmonization document, HD 428.1 S1:1992.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στο ζήτημα της εξοικονόμησης ενέργειας, το οποίο αντιμετωπίζεται με όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον τις τελευταίες δεκαετίες σε παγκόσμιο επίπεδο. Λόγω του πλήθους των εγκατεστημένων μετασχηματιστών στα δίκτυα διανομής, η εξοικονόμηση ενέργειας συνδέεται άμεσα με τη μείωση των απωλειών τους και την αύξηση της ενεργειακής τους απόδοσης. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνει το κόστος επένδυσης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο μεγαλύτερο ενδιαφέρον εκδηλώνουν οι ηλεκτρικές εταιρίες στην εγκατάσταση μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης, υιοθετώντας μοντέλα οικονομικής αξιολόγησης τα οποία συνεκτιμούν το κόστος απωλειών στο συνολικό κόστος επένδυσης ενός μετασχηματιστή. Η εκτίμηση του κόστους των μετασχηματιστών βασίζεται στη μέθοδο του συνολικού κόστους κατοχής το οποίο εμπεριέχει το κόστος αγοράς του μετασχηματιστή καθώς επίσης και το κόστος της ενέργειας των απωλειών του. Με δεδομένη την έντονη ευαισθητοποίηση της παγκόσμιας κοινότητας στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των εκπομπών αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου λόγω της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις τελευταίες δεκαετίες, είναι πλέον αναγκαίο να ληφθούν και αυτές υπόψη κατά την κοστολόγηση των απωλειών ενέργειας. Αυτός είναι ο κύριος σκοπός του συγκεκριμένου κεφαλαίου, δηλαδή η ανάπτυξη μοντέλου κοστολόγησης των απωλειών των μετασχηματιστών διανομής και η επέκτασή του με την ενσωμάτωση περιβαλλοντικού κόστους, μέσω υπολογισμού κατάλληλου συντελεστή κόστους των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που αντιστοιχούν στις απώλειες κατά τη διάρκεια ζωής τους.

5.1 ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

Σύμβολο	Μονάδα	Περιγραφή
A	€/kW	συντελεστής απωλειών κενού φορτίου ή η αξία των απωλειών κενού φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή
A_e	€/kW	συντελεστής περιβαλλοντικού κόστους λόγω των απωλειών κενού φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή
AF	-	συντελεστής διαθεσιμότητας
B	€/kW	συντελεστής απωλειών φορτίου ή η αξία των απωλειών φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή
B_e	€/kW	συντελεστής περιβαλλοντικού κόστους λόγω των απωλειών φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή
BL	χρόνια	συνολική διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή
BP	€	τιμή πώλησης του μετασχηματιστή
C	€/MWh	ετήσιος συντελεστής κόστους των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου
C_{cy}	€/t _{CO₂}	ετήσιο κόστος εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου
C_{land}	€/MWh	ετήσιος συντελεστής κόστους των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που αφορά το διασυνδεδεμένο δίκτυο

Σύμβολο	Μονάδα	Περιγραφή
C_{island}	€/MWh	ετήσιος συντελεστής κόστους των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που αφορά το νησιωτικό δίκτυο
CL	€	κόστος των απωλειών του μετασχηματιστή κατά τη διάρκεια ζωής του
C_{LL}	€	κόστος των απωλειών φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή
C_{NLL}	€	κόστος των απωλειών κενού φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή
$\cos\phi$	-	συντελεστής ισχύος
CRF	-	συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου
$CYEC$	€/kWh	παρόν ετήσιο κόστος ενέργειας
d	%	προεξοφλητικό επιτόκιο
e_i	t_{CO_2} / MWh	συντελεστής εκπομπών για κάθε τύπο καυσίμου i
$e_{CH_4,i}$	kg/GJ	συντελεστής εκπομπής CH_4 του κάθε τύπου καυσίμου i
$e_{CO_2,i}$	kg/GJ	συντελεστής εκπομπής CO_2 του κάθε τύπου καυσίμου i
$e_{N_2O,i}$	kg/GJ	συντελεστής εκπομπής N_2O του κάθε τύπου καυσίμου i
EC	€	περιβαλλοντικό κόστος εξαιτίας των απωλειών του μετασχηματιστή κατά τη διάρκεια ζωής του
EC_{LL}	€	περιβαλλοντικό κόστος λόγω των απωλειών φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή
EC_{NLL}	€	περιβαλλοντικό κόστος λόγω των απωλειών κενού φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή
EIR	%	ετήσιος ρυθμός αύξησης του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας
EIR_e	%	ετήσιος ρυθμός αύξησης του περιβαλλοντικού κόστους C_{cy}
E_L	-	απόδοση μετασχηματιστή υπό φορτίο L
ET	-	βαθμός απόδοσης του μετασχηματιστή
f_i	%	ποσοστό συμμετοχής του κάθε τύπου καυσίμου i στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος
FCR	-	συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου
$FCRG$	-	συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου για την παραγωγή ή συντελεστής ετήσιου κόστους της επένδυσης για τους μετασχηματιστές
$FCRS$	-	συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου για το σύστημα μεταφοράς ή συντελεστής ετήσιου κόστους της επένδυσης για το σύστημα μεταφοράς
$FCRT$	-	συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου για τους μετασχηματιστές ή συντελεστής ετήσιου κόστους της επένδυσης για τους μετασχηματιστές
FTL_{TPL}	-	συντελεστής αιχμής φορτίου για αντικατάσταση του μετασχηματιστή (% της ονομαστικής του ικανότητας)
GIC	€/kW	κόστος ισχύος παραγωγής
GWP	-	ικανότητα απορρόφησης ενέργειας αερίων και διάρκεια ζωής τους στην ατμόσφαιρα
HPY	-	ώρες λειτουργίας του μετασχηματιστή ανά έτος
HTS	-	υπεραγώγιμοι μετασχηματιστές υψηλής θερμοκρασίας
i	-	δείκτης τύπου καυσίμου
IF	-	συντελεστής προσαύξησης
ITL_{TPL}	-	αρχική αιχμή του φορτίου του μετασχηματιστή ως ποσοστό της ονομαστικής του ικανότητας
L	%	ανά μονάδα φορτίο του μετασχηματιστή
$LECL$	€/kW-yr	κανονικοποιημένο κόστος ενέργειας για λειτουργία υπό φορτίο
$LECL_e$	€/kW-yr	κανονικοποιημένο περιβαλλοντικό κόστος ενέργειας για λειτουργία μετασχηματιστή υπό φορτίο
$LECN$	€/kW-yr	κανονικοποιημένο κόστος ενέργειας για λειτουργία μετασχηματιστή εν κενώ
$LECN_e$	€/kW-yr	κανονικοποιημένο περιβαλλοντικό κόστος ενέργειας για λειτουργία εν κενώ
l_f	-	ετήσιος συντελεστής φορτίου
LF	-	ετήσιος συντελεστής απωλειών

Σύμβολο	Μονάδα	Περιγραφή
LIC	€/kW-yr	ετήσιο κόστος της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος
LL	kW	απώλειες φορτίου αξιολογούμενου μετασχηματιστή
LL_r	kW	απώλειες φορτίου μετασχηματιστή αναφοράς
n_i	%	βαθμός απόδοσης κάθε καυσίμου i
N	-	σύνολο των διαφορετικών καυσίμων που συμμετέχουν στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος
NLL	kW	απώλειες κενού φορτίου αξιολογούμενου μετασχηματιστή
NLL_r	kW	απώλειες κενού φορτίου μετασχηματιστή αναφοράς
P	W	ισχύς μετασχηματιστή
$P_{\max}^0$	W	αιχμή του εξυπηρετούμενου φορτίου το έτος 0 της μελέτης
$P_{\max}^n$	W	αιχμή του εξυπηρετούμενου φορτίου το n -οστό έτος της μελέτης
PRF	-	συντελεστής ευθύνης
PUL	-	ετήσια ισοδύναμη αιχμή φορτίου
$PWEC$	€/kWh	παρούσα αξία του κόστους ενέργειας
PWF	-	συντελεστής παρούσας αξίας
$RKVA$	kVA	ονομαστική ισχύς μετασχηματιστή
$RKVA_d$	kVA	πραγματικό φορτίο του μετασχηματιστή
SIC	€/kW	κόστος εγκατάστασης συστήματος μεταφοράς
$SPWECH$	€/kWh	άθροισμα της παρούσας αξίας του κόστους της ενέργειας για όλη τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή
t	-	ρυθμός αύξησης του εξυπηρετούμενου φορτίου
t_{CO_2}	-	ισοδύναμοι τόνοι εκπομπών CO_2
TL	α.μ.	μεταβλητή φόρτιση του μετασχηματιστή κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου T
TLF	-	συντελεστής φόρτισης του μετασχηματιστή
TL_L	kW	Απώλειες μετασχηματιστή στο φορτίο L
TL_{SPL}	α.μ.	φορτίο του μετασχηματιστή τη στιγμή της αιχμής φορτίου του συστήματος
TL_{TPL}	α.μ.	αιχμή φορτίου του μετασχηματιστή
TL'_{TPL}	α.μ.	μέσος όρος των αιχμών κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή
TOC	€	συνολικό κόστος κατοχής μετασχηματιστή
TOC_e	€	προτεινόμενο συνολικό κόστος κατοχής συμπεριλαμβανομένου και του περιβαλλοντικού κόστους
$TPLIF$	%	ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης της αιχμής του φορτίου του μετασχηματιστή
$\Delta E.H.$	-	Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού
ΔP_{LL}	kW	διαφορά απωλειών φορτίου μεταξύ του αξιολογούμενου μετασχηματιστή και του μετασχηματιστή αναφοράς
ΔP_{NLL}	kW	διαφορά απωλειών κενού φορτίου μεταξύ του αξιολογούμενου μετασχηματιστή και του μετασχηματιστή αναφοράς
$IEEE$	-	Ινστιτούτο των ηλεκτρολόγων και ηλεκτρονικών μηχανικών
λ_i	%	απώλειες μεταφοράς και διανομής κάθε τύπου καυσίμου i
$O.H.E.$	-	Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών
$\Sigma.H.E.$	-	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

5.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γενική αρχή που ακολουθείται κατά την ανάπτυξη, το σχεδιασμό και τη λειτουργία ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.) στηρίζεται στη λογική της διάθεσης του αγαθού που ονομάζεται ηλεκτρική ενέργεια με τρόπο όσο το δυνατόν αξιόπιστο, ποιοτικό και οικονομικό. Στα σύγχρονα Σ.Η.Ε. γίνεται προσπάθεια για τη συνεχή βελτίωση των χαρακτηριστικών αυτών με στόχο την καλύτερη εξυπηρέτηση του τελικού χρήστη ηλεκτρικής ενέργειας. Η οικονομική διάθεση της ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα σύστημα εξαρτάται από δύο παράγοντες:

- τη σύνθεση της παραγωγής, δηλαδή το είδος του σταθμού και τον τρόπο χρησιμοποίησής του
- τις απώλειες ενέργειας στο σύστημα μεταφοράς και στο δίκτυο διανομής.

Και οι δύο αυτοί παράγοντες επιδέχονται βελτίωση, συνήθως όμως η μελέτη επικεντρώνεται στην παραγωγή παρά στη μεταφορά. Αυτό γίνεται διότι το κόστος των απωλειών της μεταφοράς θεωρείται μικρό, αλλά σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο. Ειδικά σήμερα, που στα συστήματα όλων σχεδόν των αναπτυγμένων χωρών εφαρμόζονται διάφορα μοντέλα απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, κρίνεται αναγκαία η αξιολόγηση και η μείωση κάθε είδους απωλειών του συστήματος μεταφοράς και διανομής.

Ένας πρώτος διαχωρισμός των απωλειών ενός Σ.Η.Ε. μπορεί να γίνει με βάση το αίτιο που τις προκαλεί. Συνεπώς, έχουμε απώλειες που προέρχονται από την τάση, όπως οι απώλειες *corona* στις γραμμές μεταφοράς, οι απώλειες σιδήρου (κενού φορτίου) στους μετασχηματιστές, καθώς και οι απώλειες που οφείλονται στο ρεύμα (φόρτιση) οι οποίες είναι γνωστές και ως απώλειες *Joule*. Η κοστολόγηση αυτών των απωλειών πρέπει να γίνεται με ακρίβεια, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις ηλεκτρικές και οικονομοτεχνικές παραμέτρους.

Οι απώλειες αποκτούν ενδιαφέρον γιατί κοστίζουν τόσο σε ισχύ όσο και σε ενέργεια. Ενδεικτικά αναφέρεται το παράδειγμα του ελληνικού συστήματος, το οποίο έχει συγκεντρωμένο το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής στο Βορρά ενώ η μισή περίπου κατανάλωση παρουσιάζεται στο Νότο, οπότε γίνεται αντιληπτό ότι κύριο χαρακτηριστικό του δικτύου είναι η μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Ο ρόλος των απωλειών, ειδικά σε ένα τέτοιο δίκτυο είναι ιδιαίτερα σημαντικός και ασφαλώς χρήζει μελέτης. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι στο ελληνικό σύστημα οι απώλειες ισχύος ξεπερνούν το 4% του φορτίου κατά την ώρα αιχμής, ενώ αντίστοιχα οι απώλειες ενέργειας σε ετήσια βάση ανέρχονται περίπου στο 3% της ετήσιας ζήτησης, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες των μετασχηματιστών υψηλής και μέσης τάσης.

Το παρόν κεφάλαιο ασχολείται με τις απώλειες των μετασχηματιστών και αναπτύσσει κατάλληλες μεθόδους οικονομικής τους αξιολόγησης. Αρχικά, αναλύεται η κλασσική μεθοδολογία του συνολικού κόστους κατοχής, παρουσιάζοντας τους τρόπους υπολογισμού των συντελεστών απωλειών A και B καθώς επίσης και όλων των συντελεστών που χρειάζονται για τον προσδιορισμό τους. Έχοντας αναλύσει της συγκεκριμένη τεχνική, προτείνεται μια καινοτομική μεθοδολογία συνολικού κόστους κατοχής λαμβάνοντας υπόψη το περιβαλλοντικό κόστος που σχετίζεται με τις εκπομπές των αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου.

5.3 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Οι απώλειες του μετασχηματιστή χωρίζονται σε απώλειες κενού φορτίου και σε απώλειες φορτίου. Οι απώλειες κενού φορτίου (ή απώλειες σιδήρου) εμφανίζονται στο υλικό του πυρήνα λόγω κυρίως του φαινομένου της υστέρησης και των δινορρευσμάτων. Οι απώλειες φορτίου (ή απώλειες χαλκού) εμφανίζονται στα τυλίγματα, στους αγωγούς σύνδεσης, και στο δοχείο του μετασχηματιστή και προκαλούνται λόγω του φαινομένου *Joule*, των δινορρευσμάτων και της σκέδασης της ροής. Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει τα είδη των απωλειών, με έμφαση στην επίδραση τους κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή και όχι κατά τη σχεδίαση, η οποία ήταν αντικείμενο μέρους της βιβλιογραφικής ανασκόπησης του Κεφαλαίου 1.

5.3.1 Απώλειες Φορτίου

Οι απώλειες φορτίου (ή απώλειες χαλκού) είναι ανάλογες του φορτίου του μετασχηματιστή. Οι απώλειες αυτές ονομάζονται και απώλειες χαλκού, παρόλο που το πραγματικό τύλιγμα μπορεί να είναι κατασκευασμένο από άλλο υλικό, όπως αλουμίνιο, και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο υποκατηγορίες απωλειών [5.1]:

- ωμικές απώλειες λόγω του ρεύματος φορτίου
- απώλειες δινορρευσμάτων στους αγωγούς λόγω του πεδίου σκέδασης.

Όμως, οι απώλειες φορτίου περιλαμβάνουν κυρίως τις ωμικές απώλειες ή διαφορετικά τις απώλειες χαλκού διότι λαμβάνουν χώρα στα τυλίγματα του μετασχηματιστή, τα οποία είναι συνήθως από χαλκό. Οι απώλειες δινορρευσμάτων στους αγωγούς ενός μετασχηματιστή παρουσιάζονται εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται. Συνολικά, οι απώλειες φορτίου αυξάνονται όσο η θερμοκρασία αυξάνει. Το γεγονός αυτό συμβαίνει διότι η αντίσταση των αγωγών αυξάνεται με την άνοδο της θερμοκρασίας. Συχνά, είναι πολύ δύσκολο να είναι γνωστές οι απώλειες φορτίου διότι δεν είναι γνωστό με ακρίβεια το φορτίο.

Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί ο όρος απώλειες φορτίου, όρος ο οποίος προκύπτει από το γεγονός ότι οι απώλειες αυτές είναι ανάλογες του τετραγώνου του φορτίου του μετασχηματιστή. Επίσης, μεταβάλλονται ανάλογα με τη θερμοκρασία των τυλιγμάτων. Για αυτούς τους λόγους οι απώλειες πρέπει να δίνονται σε ένα φορτίο και σε μία θερμοκρασία αναφοράς.

Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει την κατηγοριοποίηση των απωλειών φορτίου σύμφωνα με το πρότυπο CENELEC [5.2].

Πίνακας 5.1 Απώλειες φορτίου σύμφωνα με το πρότυπο CENELEC.

<i>Ονομαστική ισχύς (kVA)</i>	<i>Κατηγορία A (W)</i>	<i>Κατηγορία B (W)</i>	<i>Κατηγορία C (W)</i>	<i>Τάση βραχυκύκλωσης (%)</i>
50	1100	1350	875	4
100	1750	2150	1475	4
160	2350	3100	2000	4
250	3250	4200	2750	4
400	4600	6000	3850	4
630	6500	8400	5400	4
630	6750	8700	5600	6
1000	10500	13000	9500	6
1600	17000	20000	14000	6
2500	26500	32000	22000	6

5.3.2 Απώλειες Κενού Φορτίου

Οι απώλειες κενού φορτίου (ή απώλειες σιδήρου) είναι σταθερές και ανεξάρτητες του φορτίου και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις υποκατηγορίες απωλειών [5.1]:

- απώλειες υστέρησης στα ελάσματα του πυρήνα
- απώλειες δινορρευσμάτων στα ελάσματα του πυρήνα
- ωμικές απώλειες λόγω του ρεύματος μαγνήτισης
- απώλειες στο διηλεκτρικό κύκλωμα.

Οι απώλειες υστέρησης και οι απώλειες δινορρευσμάτων στα ελάσματα του πυρήνα αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό απωλειών και συγκεκριμένα μεγαλύτερο από 99 % (με τις απώλειες υστέρησης να συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο από το προαναφερθέν ποσοστό), ενώ οι υπόλοιπες απώλειες αποτελούν μόλις 1% περίπου, το οποίο συχνά δε λαμβάνεται υπόψη.

Οι απώλειες κενού φορτίου εμφανίζονται όταν ο μετασχηματιστής είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο, και είναι σταθερές αφού δεν εξαρτώνται από τη φόρτιση. Με άλλα λόγια, για ένα μετασχηματιστή που είναι καθημερινά υπό τάση (ενεργοποιημένος), οι απώλειες κενού

φορτίου είναι σταθερές και καταναλώνονται καθημερινά, 24 ώρες το 24ωρο, 365 μέρες το χρόνο. Από τη στιγμή που οι απώλειες κενού φορτίου είναι σταθερές για ολόκληρη τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή, συνήθως 20-30 χρόνια, οι απώλειες κενού φορτίου προκαλούν το ειδικό ενδιαφέρον των ηλεκτρικών εταιριών, οι οποίες συνεχώς αναζητούν τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας. Για παράδειγμα, αναφέρεται ότι στο ελληνικό σύστημα, η ΔΕΗ διαθέτει περί τους 140000 μετασχηματιστές διανομής, που με ένα μέσο ύψος απωλειών κενού φορτίου 400 W/μετασχηματιστή ισοδυναμούν με απαιτήσεις ισχύος 56 MW ή απαιτήσεις ενέργειας περίπου 490 GWh/έτος. Από το παράδειγμα αυτό, καθίσταται προφανές ότι μία οποιαδήποτε προσπάθεια μείωσης των απωλειών αυτών αξίζει ιδιαίτερης προσοχής.

Ο Πίνακας 5.2 παρουσιάζει την κατηγοριοποίηση των απωλειών κενού φορτίου σύμφωνα με το πρότυπο CENELEC [5.2].

Πίνακας 5.2 Απώλειες κενού φορτίου σύμφωνα με το πρότυπο CENELEC.

<i>Ονομαστική ισχύς (kVA)</i>	<i>Κατηγορία A'</i> (W)	<i>Κατηγορία B'</i> (W)	<i>Κατηγορία C'</i> (W)	<i>Τάση βραχυκύκλωσης (%)</i>
50	190	145	125	4
100	320	260	210	4
160	460	375	300	4
250	650	530	425	4
400	930	750	610	4
630	1300	1030	860	4
630	1200	940	800	6
1000	1700	1400	1100	6
1600	2600	2200	1700	6
2500	3800	3200	2500	6

Ο Πίνακας 5.1 και ο Πίνακας 5.2 διακρίνουν, σύμφωνα με το πρότυπο της CENELEC, τρία επίπεδα απωλειών κενού φορτίου (*A'*, *B'*, *C'*) και τρία επίπεδα απωλειών φορτίου (*A*, *B*, *C*), οπότε προκύπτουν εννέα διαφορετικά επίπεδα απωλειών. Για παράδειγμα, όπως προκύπτει από τους δύο παραπάνω πίνακες, ένας μετασχηματιστής 160 kVA κατηγορίας απωλειών CC' (όπου C η κατηγορία απωλειών φορτίου και C' η κατηγορία απωλειών κενού φορτίου) έχει απώλειες φορτίου 2000 W και απώλειες κενού φορτίου 300 W.

5.3.3 Χρησιμότητα της Αξιολόγησης των Απωλειών στην Απελευθερωμένη Αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας

Σε ένα απελευθερωμένο περιβάλλον, το γενικό σενάριο απελευθέρωσης προβλέπει το διαχωρισμό των ηλεκτρικών εταιριών σε διαφορετικές εταιρίες. Οι εταιρίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζονται GENCOs (*generation companies*). Οι εταιρίες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζονται TRANSCOs (*transmission companies*). Οι εταιρίες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ονομάζονται DISCOs (*distribution companies*). Οι εταιρίες παροχής υπηρεσιών ενέργειας ονομάζονται ESCOs (*energy services companies*) [5.1].

Οι GENCOs θα πληρώνουν τις TRANSCOs και τις DISCOs για το δικαίωμα μεταφοράς της ενέργειας μέσα από τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής. Οι GENCOs θα αναμένουν αξιόπιστα και αποδοτικά δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ένα αξιόπιστο και αποδοτικό δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας έχει πολλά πλεονεκτήματα. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται η μεγαλύτερη ανταγωνιστικότητα των TRANSCOs και DISCOs και η ικανοποίηση των ρυθμιστικών αρχών από το αποδοτικό δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι TRANSCOs και οι DISCOs είναι πιθανόν να συνεχίσουν να είναι μη απελευθερωμένες εταιρίες.

Η δημιουργία ενός ανεξάρτητου διαχειριστή του συστήματος (ISO) είναι αναγκαία για το συντονισμό της λειτουργίας των διάφορων συστημάτων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι TRANSCOs και οι DISCOs πιθανόν να διαπιστώσουν ότι οι ρυθμιστικές αρχές θα περιορίζουν το ποσόν με το οποίο θα χρεώνουν τις απώλειες μεταφοράς και διανομής. Συνεπώς, για παράδειγμα, οι ρυθμιστικές αρχές πιθανόν να τις περιορίσουν σε ένα μέσο ύψος, για παράδειγμα 3%. Αυτό σημαίνει ότι εκείνα τα τμήματα του δικτύου μεταφοράς και διανομής, που υπερβαίνουν το μέσο ύψος απωλειών, θα απαιτούν βελτίωση της απόδοσης.

Διαφορετικά, οι TRANSCOs και οι DISCOs δε θα ανακτούν εκείνο το κόστος απωλειών μεταφοράς και διανομής, το οποίο είναι μεγαλύτερο από το μέσο ύψος απωλειών. Αυτό θα παρέχει ένα κίνητρο για τις TRANSCOs και τις DISCOs, προκειμένου να βελτιώσουν την απόδοση των λιγότερο αποδοτικών τμημάτων των συστημάτων μεταφοράς και διανομής τους, όπως για παράδειγμα με την εγκατάσταση μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης.

Το παραπάνω μοντέλο λειτουργίας της αγοράς βρίσκεται ήδη σε πλήρη εξέλιξη στην Ελληνική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτό το μοντέλο, ο ρόλος της ΔΕΗ είναι πολλαπλός, καθώς αποτελεί εταιρεία προμήθειας (ESCO), παραγωγής (GENCO), μεταφοράς (TRANSCO) και διανομής (DISCO) ηλεκτρικής ενέργειας. Το ρόλο των ESCO και GENCO έχουν αναλάβει και ιδιωτικές εταιρείες, σε πολύ μικρότερο ποσοστό βέβαια σε σχέση με τη ΔΕΗ. Ο ΔΕΣΜΗΕ αποτελεί τον ανεξάρτητο διαχειριστή του συστήματος (ISO) ο οποίος υλοποιεί και τις λειτουργίες της αγοράς (*Market Operator - MO*). Οι παραπάνω φορείς βρίσκονται υπό την εποπτεία της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας, η οποία θέτει τους ρυθμιστικούς κανόνες λειτουργίας της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η νέα μορφή της αγοράς καθιστά συνεπώς ακόμη πιο σημαντικό το ρόλο της αξιολόγησης των απωλειών, σε σχέση με την παλαιότερη μονοπωλιακή αγορά, όπου οι αποφάσεις για την αγορά και αξιολόγηση των μετασχηματιστών διανομής έδιναν προτεραιότητα στην άμεση κάλυψη των αναγκών του εξυπηρετούμενου δικτύου και όχι στη μακροπρόθεσμη αξιολόγησή τους κατά τη διάρκεια ζωής τους.

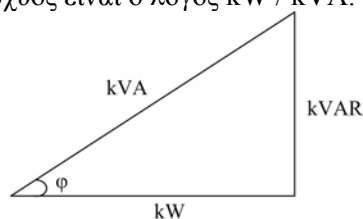
5.4 ΑΠΟΔΟΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.4.1 Απόδοση Μετασχηματιστών

Οι μετασχηματιστές είναι πολύ αποδοτικές ηλεκτρικές μηχανές με βαθμό απόδοσης πάνω από 95 %. Η απόδοση ισχύος όχι μόνο στους μετασχηματιστές αλλά σε οποιαδήποτε ηλεκτρική μηχανή ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος εξόδου προς την ισχύ εισόδου. Η ισχύς μετριέται σε watts (W) ή kilowatts (kW). Η ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή αποδίδεται σε kVA, οπότε είναι αναγκαίο να μετατραπεί σε kW για να προσδιοριστεί η απόδοσή του. Η μετατροπή των kilovoltamperes σε kilowatts πραγματοποιείται με τη σχέση [5.3]:

$$P = RKVA_a \cdot \cos \phi \quad (5.1)$$

όπου P είναι η ισχύς του μετασχηματιστή σε W, $RKVA_a$ είναι το πραγματικό φορτίο του μετασχηματιστή σε kVA και $\cos \phi$ είναι ο συντελεστής ισχύος. Στο Σχήμα 5.1 έχουμε το τρίγωνο ισχύος όπου εμφανίζεται η σχέση μεταξύ kilovoltamperes και kilowatts. Σύμφωνα με το Σχήμα 5.1, ο συντελεστής ισχύος είναι ο λόγος kW / kVA.



Σχήμα 5.1 Τρίγωνο ισχύος.

Επομένως, η απόδοση ενός μετασχηματιστή υπό φορτίο L υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$E_L = \frac{\text{ισχύς εξόδου}}{\text{ισχύς εισόδου}} = \frac{RKVA_a \cdot \cos \phi}{RKVA_a \cdot \cos \phi + TL_L} \quad (5.2)$$

όπου $RKVA_a$ είναι το πραγματικό φορτίο του μετασχηματιστή (σε kVA), TL_L είναι οι απώλειες του μετασχηματιστή στο φορτίο L (σε kW) και $\cos \phi$ είναι ο συντελεστής ισχύος.

Οι απώλειες ενός μετασχηματιστή είναι ίσες με τις απώλειες κενού φορτίου (NLL) συν τις απώλειες φορτίου (LL) πολλαπλασιαζόμενες με τον λόγο $L = (RKVA_a / RKVA)^2$, όπου $RKVA$ η ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή (σε kVA). Ο λόγος L εκφράζει το ανά μονάδα φορτίο του μετασχηματιστή. Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει ότι οι απώλειες του μετασχηματιστή είναι:

$$TL_L = NLL + LL \cdot \left(\frac{RKVA_a}{RKVA} \right)^2 \quad (5.3)$$

$$L = \frac{RKVA_a}{RKVA} \quad (5.4)$$

Συνδυάζοντας την (5.2) και (5.3) προκύπτει η αναλυτική εξίσωση απόδοσης του μετασχηματιστή:

$$E_L = \frac{RKVA_a \cdot \cos \phi}{RKVA_a \cdot \cos \phi + NLL + LL \cdot \left(\frac{RKVA_a}{RKVA} \right)^2} \quad (5.5)$$

Η απόδοση του μετασχηματιστή βελτιώνεται με τη μείωση των απωλειών του. Οι απώλειες μπορούν να μειωθούν με μεταβολή της σχεδίασης, της κατασκευής, της λειτουργίας και της συντήρησης του μετασχηματιστή καθώς και με εφαρμογή μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης [5.4]. Η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος βελτίωσης της απόδοσης του μετασχηματιστή είναι μέσω της μεταβολής της σχεδίασής του [5.5][5.6].

Η βελτίωση απόδοσης μέσω της ιδεατής σχεδίασης του μετασχηματιστή στοχεύει να ελαχιστοποιήσει τις απώλειες κενού φορτίου και τις απώλειες φορτίου [5.7]. Για τη μείωση των απωλειών κενού φορτίου συνήθως επιλέγεται η μείωση της μαγνητικής επαγωγής. Όμως, η μείωση της μαγνητικής επαγωγής απαιτεί περισσότερα τυλίγματα, με συνέπεια να αυξάνονται οι απώλειες φορτίου. Παρόμοια, αν μειωθεί η πυκνότητα του ρεύματος, θα μειωθούν οι απώλειες φορτίου, όμως στην περίπτωση αυτή απαιτείται περισσότερο μαγνητικό υλικό, οπότε αυξάνονται οι απώλειες κενού φορτίου.

Η σχεδίαση μετασχηματιστή με μειωμένες απώλειες είναι μία επαναληπτική διαδικασία που περιλαμβάνει ένα συμβιβασμό από τη μία μεριά με την κατανομή των απωλειών στον πυρήνα και στα πηνία και από την άλλη μεριά με το βάρος, το μέγεθος, τον όγκο, την τάση βραχυκύκλωσης, τη μόνωση και το κόστος του μετασχηματιστή. Η επιλογή των υλικών έγκειται στη μείωση του συνολικού κόστους, στην ικανοποίηση των απαιτήσεων των πελατών και στην προσέγγιση των επιπέδων απόδοσης και ασφάλειας. Οι σύγχρονες τεχνικές σχεδίασης με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών επιτρέπουν πολλές μεταβολές στις μεταβλητές σχεδίασης με αποτέλεσμα την επιλογή της βέλτιστης τεχνικοοικονομικά λύσης [5.8].

Ακόμη, η βελτίωση απόδοσης των μετασχηματιστών χρησιμοποιώντας τεχνικές κατασκευής τους μέσω εναλλακτικών μαγνητικών υλικών και διαμορφώσεων του πυρήνα μειώνουν τις απώλειες κενού φορτίου. Οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν πυριτιούχο σίδηρο υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας, ψυχρής εξέλασης, με προσανατολισμένους κόκκους. Για περαιτέρω μειώσεις των απωλειών κενού φορτίου χρησιμοποιούν πυριτιούχο σίδηρο χαραγμένο με *laser*, στον οποίο οι κόκκοι είναι προσανατολισμένοι κατά την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής. Επίσης, η χρήση άμορφου σιδήρου ως υλικού κατασκευής του πυρήνα οδηγεί σε μείωση των απωλειών κενού φορτίου από 75% έως 80% σε σχέση με τον μετασχηματιστή με συμβατικό πυριτιούχο σίδηρο [5.9]. Ο πυριτιούχος σίδηρος, που είναι

χαραγμένος με *laser*, είναι ακριβότερος από το συμβατικό, ενώ πολύ πιο ακριβός είναι ο άμορφος σίδηρος. Για το λόγο αυτό οι δύο αυτές επιλογές μαγνητικού υλικού ακολουθούνται, όταν δίνεται μεγάλη βαρύτητα στο κόστος των απωλειών κενού φορτίου.

Επιπλέον, βελτίωση απόδοσης του μετασχηματιστή επιτυγχάνεται και μέσω της λειτουργίας. Συγκεκριμένα, η επιλογή της ονομαστικής ισχύος του μετασχηματιστή επηρεάζει την απόδοσή του [5.10]. Αν επιλεγεί μετασχηματιστής με μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ από την απαιτούμενη, τότε αυξάνονται οι απώλειες κενού φορτίου, ενώ, αν επιλεγεί μετασχηματιστής μικρότερου μεγέθους, τότε αυξάνονται οι απώλειες φορτίου. Ένας τρόπος μείωσης των απωλειών είναι μέσω της λειτουργίας των μετασχηματιστών με τρόπο, ώστε να υπάρχει ισορροπία στη φόρτισή τους, διότι οι συνολικές απώλειες είναι χαμηλότερες, όταν το φορτίο μοιράζεται στους μετασχηματιστές σύμφωνα με την ονομαστική τους ισχύ.

Η συντήρηση του μετασχηματιστή αποτελεί ένα ακόμη μέτρο βελτίωσης της απόδοσής του, περιλαμβάνοντας επιθεώρηση και έλεγχο, ανακαίνιση ή απόσυρση. Πολλοί λίγοι χρήστες συντηρούν τους μετασχηματιστές, προκειμένου να εξοικονομήσουν ενέργεια. Η συντήρηση συνήθως συνδέεται με την αξιοπιστία και την ασφάλεια. Αν ένας χρήστης μπορεί με τρόπο οικονομικό να αντικαταστήσει ένα λιγότερο αποδοτικό με έναν περισσότερο αποδοτικό μετασχηματιστή, τότε θα εξοικονομεί ένα σημαντικό ποσό ενέργειας.

Επίσης, εκτός από τους συμβατικούς μετασχηματιστές υπάρχουν και οι υπεραγώγιμοι μετασχηματιστές υψηλής θερμοκρασίας, οι οποίοι υπόσχονται σημαντικές βελτιώσεις της ενεργειακής απόδοσης [5.11]. Σε ένα υπεραγώγιμο μετασχηματιστή υψηλής θερμοκρασίας (*HTS*) τα συμβατικά πηνία αντικαθίστανται με υπεραγώγιμο σύρμα και για την ψύξη αντί για λάδι χρησιμοποιείται υγρό άζωτο. Οι μετασχηματιστές *HTS* προσφέρουν βελτιωμένες ενεργειακές αποδοτικότητες και μειωμένη επιβάρυνση του περιβάλλοντος εξαιτίας των χαμηλότερων απωλειών φορτίου.

Παράλληλα, έχουν πρόσφατα εφαρμοστεί τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης για τη βελτίωση της απόδοσης των μετασχηματιστών μέσω της μείωσης των απωλειών κενού φορτίου (οι απώλειες φορτίου παραμένουν αμετάβλητες) [5.12]. Πιο συγκεκριμένα, με τη βοήθεια των δέντρων απόφασης προσδιορίζονται οι πιο σημαντικές παράμετροι, που επηρεάζουν τις απώλειες κενού φορτίου. Από την άλλη μεριά, τα νευρωνικά δίκτυα εφαρμόζονται για την πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου, χρησιμοποιώντας ως είσοδο τις τιμές των παραμέτρων που έχουν επιλεγεί από τα δένδρα απόφασης. Η πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου με χρήση των νευρωνικών δικτύων είναι πολύ ακριβής (μέσο σφάλμα πρόβλεψης 1.6%) και εφαρμόζεται με επιτυχία στη βιομηχανία κατασκευής μετασχηματιστών τύπου τυλιγμένου πυρήνα [5.13].

5.4.2 Μετασχηματιστές Υψηλής Ενεργειακής Απόδοσης

Οι ηλεκτρικές εταιρίες βελτιώνουν την αποδοτικότητα των δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας τις απώλειες. Οι βιομηχανικοί και εμπορικοί χρήστες της ηλεκτρικής ενέργειας, βελτιώνουν επίσης την αποδοτικότητα των δικτύων διανομής τους, μειώνοντας τις απώλειες. Η μείωση των απωλειών μεταφοράς και διανομής γίνεται με τις παρακάτω επτά διαδικασίες:

1. αντικατάσταση των μεγαλύτερων αγωγών που είναι σε λειτουργία
2. αύξηση της τάσης του συστήματος
3. βελτίωση του συντελεστή ισχύος του συστήματος με προσθήκη πυκνωτών διακλάδωσης
4. προσθήκη γραμμών μεταφοράς ή αγωγών τροφοδοσίας
5. προσθήκη ή εξισορρόπηση φάσεων
6. χρήση ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών (χαμηλών απωλειών)
7. επαναδιαμόρφωση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Παρά το γεγονός ότι ορισμένες από τις παραπάνω διαδικασίες μπορούν να υλοποιηθούν ευκολότερα από τις υπόλοιπες, η χρήση των ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών

εμφανίζεται ως η πλέον κατάλληλη διαδικασία. Το σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι οι μετασχηματιστές χαμηλών απωλειών δεν απαιτούν μεγάλη τεχνική εμπειρία για τη σωστή εφαρμογή τους. Με άλλα λόγια, η χρήση των ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών δεν απαιτεί τη γνώση του τρόπου με τον οποίο έχουν σχεδιαστεί, ούτε και των μεθόδων παραγωγής με τις οποίες έχουν κατασκευαστεί. Αντίθετα, εκείνο που είναι απαραίτητο να γνωρίζει ο χρήστης είναι η διαδικασία με την οποία πρέπει να επιλέξει τον οικονομικότερο αλλά και ταυτόχρονα ενεργειακά αποδοτικό μετασχηματιστή.

Τη δεκαετία του 1970, λόγω της παγκόσμιας κρίσης που ξέσπασε στον τομέα του πετρελαίου, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε σημαντικά. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα οι εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας να απαιτούν από τους κατασκευαστές μετασχηματιστών να παράγουν περισσότερο αποδοτικούς μετασχηματιστές. Οι απώλειες των μετασχηματιστών λαμβάνονται πλέον υπόψη διότι οδηγούν σε απώλεια σημαντικών ποσών ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια οι κατασκευαστές ανταποκρίνονται όλο και περισσότερο στις απαιτήσεις των εταιριών ηλεκτρικής ενέργειας για περισσότερο αποδοτικούς μετασχηματιστές, ενώ το ίδιο δε συμβαίνει για τους υπόλοιπους χρήστες που εμφανίζονται αδιάφοροι για πιο αποδοτικούς μετασχηματιστές.

Οι μετασχηματιστές με χαμηλή απόδοση απαιτούν αυξημένη παραγωγή ενέργειας για να καλύψουν τις απώλειές τους. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επηρεάζουν το περιβάλλον, σπαταλώντας ενέργεια που προκαλεί αύξηση των ατμοσφαιρικών ρύπων, όπως για παράδειγμα αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, που συμβάλει στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Από την άλλη πλευρά, οι μετασχηματιστές υψηλής ενεργειακής απόδοσης απαιτούν λιγότερη παραγωγή ενέργειας σε σχέση με τους μη αποδοτικούς, με αποτέλεσμα να μειώνουν την εκπομπή των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Σύμφωνα με δεδομένα από το International Institute for Energy Conservation (IIEC) για την Ευρώπη, η εκπομπή αερίων CO₂ ανά kWh ανέρχεται σε 0.4 Kg [5.14]. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι μετασχηματιστές διανομής στην Ευρώπη είναι περίπου τέσσερα εκατομμύρια μονάδες και κάθε χρόνο υπολογίζεται ότι αντικαθίστανται περίπου 150 χιλιάδες μετασχηματιστές διανομής, δίνοντας ρυθμό αντικατάστασης ίσο με 3.75 %, προκύπτει ότι από τη χρήση μετασχηματιστών διανομής υψηλότερης ενεργειακής απόδοσης εκτιμάται ότι από το 2000 έως το 2010 θα μπορούσαν να εξοικονομηθούν 7.3 TWh ενέργειας στην Ευρώπη [5.3]. Το ποσό αυτό ισοδυναμεί με 2.9 εκατομμύρια τόνους CO₂. Επομένως, είναι αναγκαία η χρήση μετασχηματιστών με μεγαλύτερη απόδοση, παρόλο που η πλειοψηφία των σημερινών μετασχηματιστών έχει απόδοση μεγαλύτερη από 97% - 98%.

Επιγραμματικά, τα οφέλη από τη χρήση μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Οι απώλειες ενέργειας των μετασχηματιστών σήμερα ξεπερνούν το 2% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Με τη χρήση μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης, αυτές οι απώλειες ενέργειας μπορούν να μειωθούν από 10% έως 40% με τρόπο οικονομικά αποδοτικό.
- Η βελτίωση της απόδοσης των μετασχηματιστών είναι συχνά πιο αποδοτική οικονομικά από την προσθήκη νέων μονάδων παραγωγής ή προγραμμάτων διαχείρισης στην πλευρά της ζήτησης.
- Η εξοικονόμηση ενέργειας, που μπορεί να προκύψει από τη χρήση μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης, προσφέρει πολύ σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, όπως μείωση εκπομπών SO₂ και CO₂. Οι περισσότερες, αν όχι όλες, μειώσεις εκπομπών SO₂ και CO₂ είναι «δωρεάν», διότι οι περισσότερες ηλεκτρικές εταιρίες παραγγέλλουν τους μετασχηματιστές χωρίς να υπολογίζουν το κόστος εκπομπής ρύπων.

Διάφοροι παράγοντες, όπως περιβαλλοντικοί περιορισμοί και αυξημένο ενδιαφέρον για εξοικονόμηση ενέργειας αναμένεται να ενθαρρύνουν την ανάπτυξη των μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης. Το φαινόμενο του «θερμοκηπίου» και ο «πράσινος φόρος» πρόκειται να προκαλέσουν αυξημένη έμφαση στην αξία εξοικονόμησης ενέργειας, ειδικά για τις ευρωπαϊκές χώρες που εξαρτώνται αρκετά από το λιγνίτη και το πετρέλαιο [5.15].

5.4.3 Οι Μετασχηματιστές Διανομής στην Ελλάδα, η Εξοικονόμηση Ενέργειας και οι Περιβαλλοντικές Εκτιμήσεις

Στην Ελλάδα υπάρχουν περίπου 155 χιλιάδες μετασχηματιστές διανομής, εκ των οποίων οι 140 χιλιάδες ανήκουν στην Δ.Ε.Η. και οι υπόλοιποι σε ιδιώτες. Κάθε χρόνο υπολογίζεται ότι περίπου 7300 (από τη Δ.Ε.Η.) και 650 (από ιδιώτες) νέοι μετασχηματιστές διανομής τοποθετούνται στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Ο Πίνακας 5.3 παρουσιάζει τα ποσοστά συμμετοχής των μετασχηματιστών διανομής ανάλογα με την ονομαστική τους ισχύ [5.15].

Πίνακας 5.3 Οι μετασχηματιστές διανομής στην Ελλάδα.

Ονομαστική ισχύς (kVA)	ΔΕΗ	Ιδιώτες
50	29%	1%
100	26%	1%
160	20%	5%
250	14%	20%
400	5%	38%
630	4%	28%
1000	1%	6%
1600	1%	1%
Σύνολο	100%	100%
Συνολικός αριθμός μετασχηματιστών:	140.000	15.000
Αριθμός νέων μετασχηματιστών ετησίως:	7.300	650

Η ΔΕΗ χρησιμοποιεί αποκλειστικά μετασχηματιστές διανομής τύπου λαδιού, κυρίως μέχρι 250 kVA, ενώ οι ιδιώτες χρησιμοποιούν περίπου 90% τύπου λαδιού και 10% ξηρού τύπου με ονομαστική ισχύ από 250 kVA μέχρι 1000 kVA. Οι κατηγορίες απωλειών που επιλέγονται από την Δ.Ε.Η. είναι της κατηγορίας AC' (κατά το πρότυπο CENELC HD 428, Πίνακας 5.1 και Πίνακας 5.2) για μετασχηματιστές διανομής μικρότερους των 400 kVA, ενώ CC' για μετασχηματιστές μεγαλύτερους από 630 kVA. Αντίθετα, οι ιδιώτες επιλέγουν συνήθως απώλειες κατηγορίας BB' και BA' διότι αγοράζουν με γνώμονα το χαμηλό κόστος. Οι παραπάνω κατηγορίες απωλειών επιλέγονται με βάση το πρότυπο CENELEC HD 428.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω δεδομένα, μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι εάν κάθε νέος μετασχηματιστής διανομής είναι χαμηλών απωλειών τύπου CC' ή με πυρήνα άμορφου σιδήρου (υψηλό κόστος), τότε θα υπάρξει ραγδαία μείωση όχι μόνο των απωλειών αλλά και των περιβαλλοντικών ρύπων (Πίνακας 5.4 και Πίνακας 5.5). Συγκεκριμένα, από αυτούς τους πίνακες φαίνεται ότι με επιλογή του τύπου CC' για τους νέους μετασχηματιστές διανομής προβλέπεται μείωση των απωλειών ανά έτος περίπου 20 GWh (10 GWh ΔΕΗ και 10 GWh ιδιώτες) και μείωση των εκπομπών CO₂ ανά έτος περίπου 17.000 τόνοι (8500 τόνοι ΔΕΗ και 8500 τόνοι ιδιώτες), ενώ με επιλογή τεχνολογίας άμορφου σιδήρου για τους νέους μετασχηματιστές διανομής προβλέπεται μείωση των απωλειών ανά έτος περίπου 37 GWh (24 GWh ΔΕΗ και 13 GWh ιδιώτες) και μείωση εκπομπών CO₂ ανά έτος περίπου 31.500 τόνους (20500 τόνους ΔΕΗ και 11000 τόνους ιδιώτες)[5.15].

Πίνακας 5.4 Νέοι μετασχηματιστές διανομής για τη Δ.Ε.Η.

<i>Ισχύς (kVA)</i>	<i>Νέοι μετασχηματιστές τύπου CC'</i>		<i>Νέοι μετασχηματιστές με πυρήνα άμορφου σιδήρου</i>	
	<i>Μείωση απωλειών ανά έτος (MWh)</i>	<i>Μείωση εκπομπών CO₂ ανά έτος (τόνοι)</i>	<i>Μείωση απωλειών ανά έτος (MWh)</i>	<i>Μείωση εκπομπών CO₂ ανά έτος (τόνοι)</i>
50	1275	1275	2920	2550
100	1930	1520	4495	3800
160	2200	1885	5000	4205
250	1905	1640	4785	4100
400	1000	836	2580	2204
630	1435	1216	3730	3192
1000	225	194	480	408
<i>Σύνολο</i>	<i>9970</i>	<i>8566</i>	<i>23990</i>	<i>20459</i>

Πίνακας 5.5 Νέοι μετασχηματιστές διανομής για ιδιώτες.

<i>Ισχύς (kVA)</i>	<i>Νέοι μετασχηματιστές τύπου CC'</i>		<i>Νέοι μετασχηματιστές με πυρήνα άμορφου σιδήρου</i>	
	<i>Μείωση απωλειών ανά έτος (MWh)</i>	<i>Μείωση εκπομπών CO₂ ανά έτος (τόνοι)</i>	<i>Μείωση απωλειών ανά έτος (MWh)</i>	<i>Μείωση εκπομπών CO₂ ανά έτος (τόνοι)</i>
250	221,5	189	293,5	249
400	1815	1551	2407,5	2046
630	4272	3640	5395	4576
1000	2960	2520	3680	3122
1600	775,5	660	1343	1142
<i>Σύνολο</i>	<i>10044</i>	<i>8560</i>	<i>13119</i>	<i>11135</i>

5.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ

5.5.1 Ερμηνεία του Προβλήματος

Είναι φανερό ότι ο κύριος παράγοντας, αν όχι ο κυριότερος, της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αποτελεί τη βασικότερη αιτία στη δημιουργία των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και αναμφισβήτητα χρήζει προσοχής μας.

Πολλές χημικές ενώσεις, που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα της Γης, δρουν ως «αέρια θερμοκηπίου». Τα συγκεκριμένα αέρια επιτρέπουν στην ηλιακή ακτινοβολία να εισέρχεται στην ατμόσφαιρα ελεύθερα. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια της Γης, ένα μέρος της ανακλάται πίσω στο διάστημα ως υπέρυθη θερμική ακτινοβολία. Τα αέρια του θερμοκηπίου απορροφούν ένα τμήμα αυτής της υπέρυθρης θερμικής ακτινοβολίας και την παγιδεύουν στην ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η μέση θερμοκρασία της Γης (Σχήμα 5.2).

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι - κατά βάση - χρήσιμο για τον πλανήτη, διότι αλλιώς θα υφίσταται πολύ χαμηλή μέση θερμοκρασία στη Γη, η οποία θα την έκανε αφιλόξενη. Ωστόσο εξαιτίας της ανθρώπινης δραστηριότητας, έχουν παραχθεί υπερβολικές συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου, γεγονός που οδηγεί στο ακριβώς αντίθετο και εξίσου επικίνδυνο φαινόμενο, στην υπερβολική αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της Γης. Λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας της Γης, κάποια στιγμή το ποσό της θερμικής ενέργειας

που φτάνει από τον ήλιο στην επιφάνεια της Γης θα εξισωθεί με αυτό που ανακλάται στο διάστημα, διατηρώντας την θερμοκρασία της Γης σχεδόν σταθερή.

Τα αέρια που έχουν χαρακτηριστεί ως «αέρια θερμοκηπίου» και τα οποία φέρουν τη μεγαλύτερη ευθύνη για το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4) και το υποξείδιο του αζώτου (N_2O). Τα εν λόγω αέρια έχουν χαρακτηριστεί ως τα πιο επικίνδυνα λόγω των μεγάλων ποσοτήτων τους στην ατμόσφαιρα σε σχέση με τα υπόλοιπα (υδροφθοράνθρακες (HFCs), υπερφθοράνθρακες (PFCs) και εξαφθοριούχο Θείο (SF_6)). Αναλυτικότερα, η σύσταση των αερίων του θερμοκηπίου είναι: 76.7% CO_2 , 14.2% CH_4 , 8.1% N_2O , 0.6% HFCs, 0.2% PFCs και 0.1% SF_6 . Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι τα τρία πρώτα αέρια (CO_2 , CH_4 , N_2O) αποτελούν το σημαντικότερο παράγοντα στη δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου [5.16].



Σχήμα 5.2 Σχηματική απεικόνιση μηχανισμού φαινομένου θερμοκηπίου.

5.5.2 Συμμετοχή στην Αύξηση της Μέσης Θερμοκρασίας της Γης

Για να συγκριθεί η επίπτωση των διάφορων αερίων στην εξέλιξη του φαινομένου του θερμοκηπίου αναπτύχθηκε μία μέθοδος εκτίμησης της συμμετοχής στην αύξηση της θερμοκρασίας της Γης για κάθε αέριο (*Global Warming Potential-GWP*). Το *GWP* είναι μια έννοια που λαμβάνει υπόψη την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του αερίου και τη διάρκεια ζωής του στην ατμόσφαιρα. Το περιεχόμενο του *GWP* είναι η συνολική επίπτωση που προκαλείται από τώρα μέχρι μια δεδομένη στιγμή στο μέλλον και αναφέρεται σε μια μονάδα μάζας του αερίου που εκπέμπεται τώρα. Το *GWP* υπολογίζεται πάντα για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο και εκφράζεται σε σχέση με ένα αέριο αναφοράς, συχνότερα με το CO_2 το οποίο έχει την τιμή αναφοράς 1. Παραδείγματα τιμών *GWP* για μια τυπική περίοδο πάνω από 100 χρόνια είναι 21 για το CH_4 , και 310 για το N_2O (Πίνακας 5.6). Οι εκπομπές που λαμβάνουν υπόψη τις τιμές *GWP* καλούνται ισοδύναμα CO_2 . Τα *GWP* έχουν κάποιες αβεβαιότητες της τάξεως του 35% λόγω του εύρους των πιθανών χρόνων ζωής στην ατμόσφαιρα του αερίου αναφοράς CO_2 [5.17].

Πίνακας 5.6 Παραδείγματα *GWP* με βάση αναφοράς το CO_2 .

Αέρια θερμοκηπίου	GWP για διαφορετικές χρονικές περιόδους		
	20 χρόνια	100 χρόνια	500 χρόνια
CO_2	1	1	1
CH_4	56	21	6.5
N_2O	280	310	170

5.5.3 Το Πρωτόκολλο του Κυότο για τις Κλιματικές Μεταβολές

Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο του ΟΗΕ, το οποίο εγκρίθηκε το Δεκέμβριο του 1997 και εκφράζει τη νέα στάση της διεθνούς κοινότητας απέναντι στο φαινόμενο των κλιματικών αλλαγών. Βάσει του πρωτοκόλλου αυτού, οι βιομηχανικές χώρες έχουν δεσμευθεί να μειώσουν, στη διάρκεια της περιόδου 2008-2012, τις εκπομπές έξι αερίων που ευθύνονται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου (του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), του μεθανίου (CH_4), του οξειδίου του αζώτου (N_2O), των υδροφθορανθράκων (HFC), των υπερφθοριωμένων υδρογονανθράκων (PFC) και του εξαφθοριούχου θείου (SF_6)) τουλάχιστον κατά 5% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990 [5.18][5.19].

Μία χώρα μπορεί να πετύχει τους στόχους που της ορίζει το Πρωτόκολλο είτε μειώνοντας τις εκπομπές της, είτε, εναλλακτικά, χρησιμοποιώντας παράλληλα και κάποιους από τους λεγόμενους “ευέλικτους μηχανισμούς” που διαθέτει το Πρωτόκολλο. Συνοπτικά, οι μηχανισμοί αυτοί είναι οι ακόλουθοι τρεις [5.18][5.19]:

i. Διαπραγμάτευση Δικαιωμάτων Εκπομπών

Μία βιομηχανικά αναπτυγμένη χώρα που έχει μειώσει τις εκπομπές της πέραν των αρχικών στόχων που προβλέπει το Πρωτόκολλο, μπορεί να “πουλήσει” αυτήν την επιπλέον μείωση σε άλλη χώρα που αντιμετωπίζει δυσκολίες στο να πετύχει το στόχο της.

ii. Δημιουργία ενός “Μηχανισμού Καθαρής Ανάπτυξης”

Ο τελικός στόχος αυτού του μηχανισμού είναι οι αναπτυσσόμενες χώρες να αναπτύξουν καθαρές τεχνολογίες για να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Ο Μηχανισμός Καθαρής Ανάπτυξης παρέχει κίνητρα έτσι ώστε οι βιομηχανικά αναπτυγμένες χώρες να χρηματοδοτήσουν προγράμματα για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στις αναπτυσσόμενες χώρες. Συνεπώς, μια βιομηχανικά αναπτυγμένη χώρα, αντί να μειώσει τις δικές της εκπομπές, μπορεί να βοηθήσει στη μείωση των εκπομπών σε κάποια φτωχότερη χώρα όπου η μείωση αυτή είναι ευκολότερη και φθηνότερη.

iii. Εφαρμογή Προγραμμάτων από Κοινού

Παραμεφères εργαλείο με το Μηχανισμό Καθαρής Ανάπτυξης. Σε αντίθεση όμως με αυτόν αφορά όχι τις αναπτυσσόμενες χώρες, αλλά μόνο εκείνες που έχουν δεσμευτεί σε μειώσεις μέσω του Πρωτοκόλλου του Κυότο (όπως για παράδειγμα οι χώρες της Ανατολικής Ευρώπης).

Το πρωτόκολλο του Κυότο αποτελεί ένα πρώτο βήμα για την αντιμετώπιση του προβλήματος των κλιματικών αλλαγών. Το Νοέμβριο 2005, μια διάσκεψη των μερών της CCNUCC (*United Nations Convention on Climate Change - CCNUCC*) και του πρωτοκόλλου του Κυότο έδωσε νέα ώθηση στο πρωτόκολλο και έθεσε τις βάσεις των μελλοντικών συζητήσεων σχετικά με το διεθνές πλαίσιο για την καταπολέμηση των κλιματικών αλλαγών. Εξάλλου, κατά το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο του Μαΐου του 2007, η Ευρωπαϊκή Ένωση ανέλαβε μονομερώς την υποχρέωση να μειώσει κατά 20% τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα έως το 2020 και κάλεσε τις ανεπτυγμένες χώρες να συνάψουν διεθνή συμφωνία για την καθιέρωση ενός στόχου γενικής μείωσης κατά 30% έως το 2020.

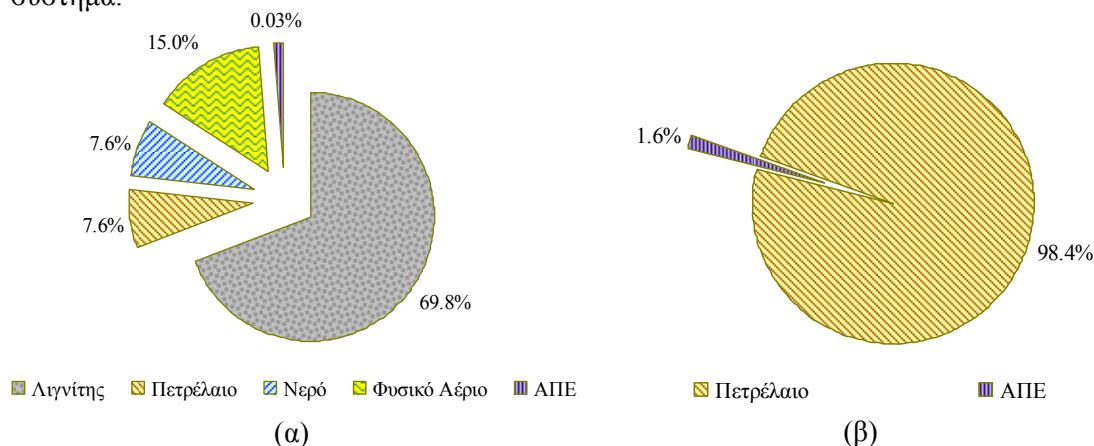
5.5.4 Εκπομπές Αερίων Θερμοκηπίου από Ενεργειακή Χρήση

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι ένα διεθνές πρόβλημα με σοβαρές επιπτώσεις στο παρόν και το μέλλον, για αυτό και βρίσκεται στο επίκεντρο της προσοχής της Παγκόσμιας Κοινότητας. Η μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου είναι πλέον υποχρέωση και της Ελληνικής Πολιτείας, αλλά ειδικότερα της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ Α.Ε.), καθώς η τελευταία ευθύνεται για το συντριπτικό ποσοστό των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου στη χώρα μας.

Κάθε kWh ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει ακόμη ορισμένα εξωτερικά κόστη, όπως για παράδειγμα το περιβαλλοντικό κόστος, τα οποία δεν καθρεπτίζονται στο βαθμό που πρέπει στην τιμή του ηλεκτρισμού. Αυτά τα εξωτερικά κόστη προέρχονται από διάφορα είδη εκπομπών ως αποτέλεσμα της καύσης των καυσίμων των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Το CO_2 , το CH_4 και το N_2O είναι οι κύριες αιτίες που συμβάλλουν στην όξυνση

του περιβάλλοντος (φαινόμενο θερμοκηπίου). Αυτά τα είδη ρύπων προκαλούν μακράς διάρκειας μόλυνση του περιβάλλοντος με επικίνδυνες επιπτώσεις. Για αυτό το λόγο, οι περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες δίνουν ιδιαίτερη έμφαση στη μέτρηση και στη μείωση των επικινδύνων αυτών ρύπων [5.20][5.21].

Στόχος είναι να δημιουργηθεί ένας τρόπος εκτίμησης των εκπομπών αερίων από τις καύσιμες ύλες, δηλαδή να εντοπισθεί η τιμή επιβάρυνσης λόγω περιβαλλοντικών επιπτώσεων, η οποία θα προστεθεί στην εκάστοτε τιμή του ηλεκτρισμού. Για την εκτίμηση αυτή είναι αναγκαία η γνώση του τρόπου με τον οποίο κατανέμονται τα είδη των καυσίμων στις διάφορες μονάδες παραγωγής του συστήματος στο οποίο συνδέονται οι μετασχηματιστές διανομής. Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται το ποσοστό συμμετοχής κάθε τύπου καυσίμου στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα και στο νησιωτικό σύστημα.



Σχήμα 5.3 Ποσοστό συμμετοχής κάθε τύπου καυσίμου στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (α) στο διασυνδεδεμένο σύστημα και (β) στο νησιωτικό σύστημα.

5.6 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΣ ΤΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Για την αξιολόγηση των απωλειών μετασχηματιστών έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι. Παρά το γεγονός ότι οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στις ίδιες βασικές αρχές, διαφοροποιούνται ανάλογα με το στόχο που πρέπει να πετύχουν. Για παράδειγμα, η Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η.) έχει αναπτύξει μία απλή και γρήγορη μέθοδο για να κοστολογεί τις απώλειες και να συγκρίνει τις διάφορες προσφορές κατά την διάρκεια της προμήθειας μετασχηματιστών [5.22][5.23][5.24]. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τυποποιημένες τιμές όπως το κόστος ενέργειας και το κόστος ισχύος και δεν εισέρχεται σε λεπτομέρειες (σε αντίθεση με τη μεθοδολογία που αναλύεται παρακάτω - §5.9, §5.10 και §5.11), εκπληρώνοντας όμως πλήρως το σκοπό της.

Το Ινστιτούτο των ηλεκτρολόγων και ηλεκτρονικών μηχανικών (IEEE) έχει αναπτύξει ένα αρκετά αναλυτικό οδηγό για την αξιολόγηση των απωλειών [5.25] χωρίς όμως να αποτελεί μονόδρομο, αφού όπως προαναφέρθηκε έχουν αναπτυχθεί και άλλες μεθοδολογίες. Στην παρούσα έρευνα, χρησιμοποιήθηκε ως βάση ο συγκεκριμένος οδηγός του IEEE, εμπλουτίζοντάς τον με το περιβαλλοντικό κόστος των απωλειών. Με αυτό τον τρόπο, αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία αξιολόγησης των απωλειών στους μετασχηματιστές διανομής, η οποία χρησιμεύει κυρίως στις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού.

Σκοπός αυτής της μεθόδου αξιολόγησης είναι ο συνυπολογισμός της αξίας της ηλεκτρικής ενέργειας που δαπανάται για την τροφοδότηση των απωλειών των μετασχηματιστών. Οι χρήστες (αγοραστές) των μετασχηματιστών μπορούν να χρησιμοποιήσουν την προτεινόμενη μέθοδο για να προσδιορίσουν το σχετικό οικονομικό όφελος από την αγορά ενός μετασχηματιστή με χαμηλό κόστος κτήσης και υψηλό κόστος απωλειών, σε αντιπαράθεση με έναν άλλο μετασχηματιστή ο οποίος έχει υψηλό κόστος κτήσης και χαμηλό κόστος απωλειών. Οι κατασκευαστές μετασχηματιστών μπορούν να

χρησιμοποιήσουν τη μέθοδο οικονομικής αξιολόγησης για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης του μετασχηματιστή, ώστε να προκύψει ένας μετασχηματιστής που να συμφέρει οικονομικά να κατασκευαστεί. Επίσης, το κόστος που προκύπτει από την αξιολόγηση, παρέχει τη δυνατότητα στον αγοραστή του μετασχηματιστή (ηλεκτρική εταιρία μεταφοράς ή διανομής) να συγκρίνει δύο ή περισσότερες προσφορές και να καταλήξει στην πιο οικονομική.

Στόχος της διαδικασίας αξιολόγησης είναι ο υπολογισμός της παρούσας αξίας καθενός kW απωλειών κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή, ή οποιασδήποτε άλλης χρονικής περιόδου επιλεγεί. Η αξία κάθε kW υπολογίζεται σε €/kW και αντιπροσωπεύει το μέγιστο ποσό που είναι διατεθειμένος να δαπανήσει ο αγοραστής ώστε να εξοικονομήσει ένα kW απωλειών. Ένα μέρος αυτού του ποσού μπορεί να αποδοθεί στον προμηθευτή προκειμένου να μειώσει τις απώλειες του μετασχηματιστή που θα κατασκευάσει.

5.7 ΒΑΣΙΚΗ ΙΔΕΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Η βασική ιδέα της αξιολόγησης είναι ότι το κόστος κάθε είδους απωλειών (κενού φορτίου και φορτίου) είναι το άθροισμα δύο όρων: του όρου της ισχύος και του όρου της ενέργειας. Ο όρος της ισχύος αντιπροσωπεύει το κόστος ενός kW εγκατεστημένης ισχύος που απαιτείται για την κάλυψη των απωλειών. Ο όρος της ενέργειας αντιπροσωπεύει την παρούσα αξία της ενέργειας που θα καταναλωθεί ανά kW απωλειών κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή, εκφρασμένο σε €/kW. Το άθροισμα του ετήσιου κόστους ισχύος και ενέργειας διαιρείται με το συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου, ώστε να προκύψει μια τιμή η οποία να μπορεί να προστεθεί κατευθείαν στην τιμή αγοράς του μετασχηματιστή, ώστε να μπορεί ο αγοραστής να συγκρίνει τις προσφορές και από την άλλη πλευρά να μπορεί ο κατασκευαστής να οδηγείται στον κατάλληλο σχεδιασμό και τιμολόγηση του μετασχηματιστή.

Ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου εκφράζεται και με τον όρο σταθερός ρυθμός χρέωσης (*Fixed Charge Rate*) και είναι διαφορετικός για το μετασχηματιστή, τις εγκαταστάσεις παραγωγής και το σύστημα μεταφοράς, εκφραζόμενος σε €/€/yr ή απλά 1/yr.

Η βασική εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του κόστους ανά kW απωλειών είναι η ακόλουθη [5.25]:

$$\text{Συντελεστής απωλειών} = \frac{\overbrace{\left(\begin{array}{c} \text{Κόστος} \\ \text{εγκατάστασης} \\ \text{ενός kW} \\ \text{παραγωγής} \end{array} \right) \cdot \left(\begin{array}{c} \text{Συντελεστής} \\ \text{ανάκτησης} \\ \text{κεφαλαίου} \\ \text{παραγωγής} \end{array} \right)}^{\text{όρος ισχύος}} + \overbrace{\left(\begin{array}{c} \text{Κόστος} \\ \text{kWh} \end{array} \right) \cdot \left(\begin{array}{c} \text{Ώρες} \\ \text{λειτουργίας} \\ \text{του} \\ \text{μετασχηματιστή} \end{array} \right)}^{\text{όρος ενέργειας}}}{\left(\begin{array}{c} \text{Συντελεστής} \\ \text{ανάκτησης} \\ \text{κεφαλαίου} \\ \text{μετασχηματιστή} \end{array} \right)} \quad (5.6)$$

Ο αριθμητής του κλάσματος της εξίσωσης (5.6) δείχνει πόσο κοστίζει ετησίως η παραγωγή ενός επιπλέον kW. Πρέπει να σημειωθεί ότι στο παραπάνω κλάσμα υπάρχουν δύο διαφορετικοί συντελεστές ανάκτησης κεφαλαίου, ο ένας που αφορά το τμήμα της παραγωγής και ο άλλος που αφορά τους μετασχηματιστές (παρανομαστής). Με τη διαίρεση αυτών των δύο όρων (άθροισμα κόστους ισχύος και ενέργειας προς το συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου του μετασχηματιστή) προσδιορίζεται το ποσό που είναι διατεθειμένος να πληρώσει ο αγοραστής ώστε να αποκτήσει έναν πιο αποδοτικό μετασχηματιστή και να εξοικονομήσει αυτό το kW που τροφοδοτεί τις απώλειες.

Στην σχέση (5.7) γίνεται αντιληπτό πως προκύπτουν οι μονάδες του συντελεστή απωλειών της σχέσης (5.6).

$$\frac{\left(\frac{\text{EURO}}{\text{kW}} \times \frac{\text{EURO}}{\text{yr}} \right) + \left(\frac{\text{EURO}}{\text{kWh}} \times \frac{h}{\text{yr}} \right)}{\frac{\text{EURO}}{\text{yr}}} = \frac{\text{EURO}}{\text{kW}} \quad (5.7)$$

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι στην εξίσωση (5.7) μπορούν να χρησιμοποιηθούν και αδιάστατοι όροι, όπως για παράδειγμα ο βαθμός απόδοσης του μετασχηματιστή, ο φορολογικός συντελεστής και ο συντελεστής φόρτισης του μετασχηματιστή.

5.8 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

5.8.1 Εισαγωγή

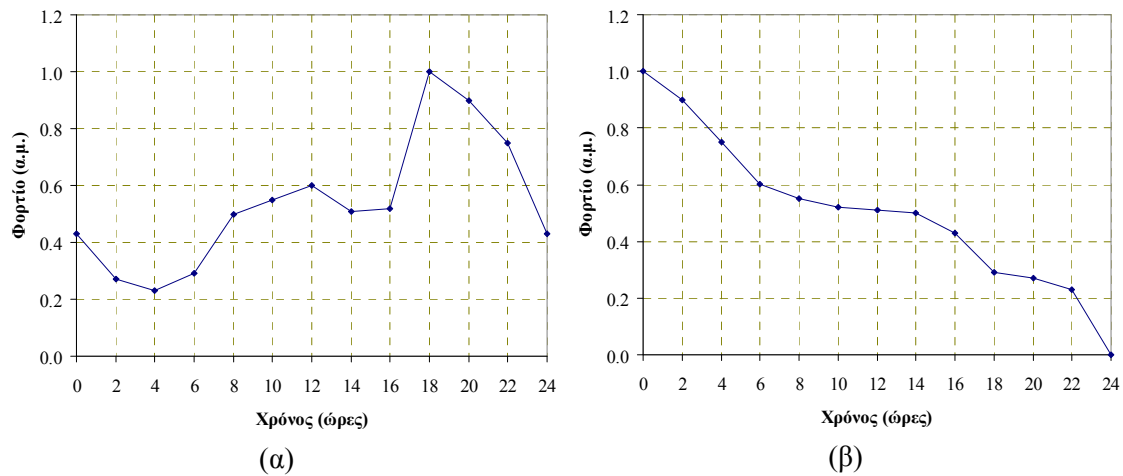
Η ακριβής αναπαράσταση των μεταβολών του φορτίου που εξυπηρετείται από ένα μετασχηματιστή έχει ιδιαίτερη σημασία για το σωστό υπολογισμό των απωλειών φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του και της αντίστοιχης συμβολής τους στο συνολικό κόστος κατοχής του μετασχηματιστή. Η απλοποιημένη θεώρηση μιας μέσης τιμής φόρτισης, η οποία συχνά λαμβάνεται κοντά στην ονομαστική, εάν και μπορεί να αποτελέσει τη βάση για μία πρώτη εκτίμηση του κόστους αυτού, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αποκλίσεις από την πραγματικότητα, εάν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι η διακύμανση του εξυπηρετούμενου φορτίου επηρεάζει σημαντικά την πραγματική τιμή του κόστους απωλειών. Για το λόγο αυτό κρίθηκε αναγκαία η συλλογή και ενσωμάτωση πραγματικών δεδομένων φόρτισης μετασχηματιστών διανομής του ελληνικού δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί ότι, λόγω της πολυπλοκότητας των δικτύων διανομής και του πλήθους των εξυπηρετούμενων πελατών χαμηλής τάσης, οι οποίοι αποτελούν το φορτίο των εξεταζόμενων μετασχηματιστών, είναι πρακτικά αδύνατη η συλλογή μετρήσεων, οι οποίες να καλύπτουν το σύνολο των εγκατεστημένων μετασχηματιστών διανομής. Συνεπώς, η αξιοποίηση επαρκούς δείγματος δεδομένων και η κατάλληλη επεξεργασία τους για την εξαγωγή ισοδύναμων καμπυλών φόρτισης σε επίπεδο υποσταθμού διανομής είναι η αναγκαία πρακτική, η οποία και υιοθετείται εδώ και χρόνια από τη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού.

Το μέγεθος του φορτίου εξαρτάται από το είδος των καταναλωτών και καλείται ζήτηση. Η ζήτηση μετράται κυρίως σε kW ή MW και σπανιότερα σε kVA ή MVA. Μπορεί να αναφέρεται σε μία μόνο συσκευή ή εγκατάσταση, σε μια αναχώρηση γραμμής, σε έναν υποσταθμό ή σταθμό παραγωγής καθώς και σε ολόκληρο το σύστημα [5.26].

Τα φορτία ποικίλουν ανάλογα με το είδος τους, την ώρα, την ημέρα, την εποχή, τις καιρικές συνθήκες και άλλους παράγοντες. Ως ενδεικτικό της ποικιλίας αυτής αναφέρεται το γεγονός ότι τα βιομηχανικά και εμπορικά φορτία εμφανίζουν αιχμή κατά τις εργάσιμες ημέρες και ώρες, σε αντίθεση με τα αστικά που παρουσιάζουν μέγιστο εκτός των εργάσιμων ωρών ενώ τα φορτία κλιματισμού είναι μεγαλύτερα το καλοκαίρι. Παρά τις σποραδικές εξαιρέσεις, το φορτίο στα περισσότερα συστήματα είναι σχετικά απαλλαγμένο από αισθητές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του 24-ώρου. Σημαντικές μεταβολές παρουσιάζονται κυρίως κατά τις χαρακτηριστικές ώρες της μέρας, όπως για παράδειγμα τις πρωινές ώρες με την έναρξη της βιομηχανικής, επαγγελματικής και κοινωνικής δραστηριότητας, τη μεσημβρινή διακοπή και το τέλος της ημέρας.

Οι συνηθέστερες καμπύλες φορτίου χωρίζονται σε δύο είδη: τις χρονολογικές καμπύλες φορτίου και τις καμπύλες διάρκειας φορτίου. Η χρονολογική καμπύλη φορτίου έχει ως τεταγμένες τα φορτία και ως τετημενές τους χρόνους (για παράδειγμα ώρες ή ημέρες) κατά τους οποίους ζητήθηκαν. Η καμπύλη διάρκειας φορτίου παριστάνει τα φορτία, κατά τη θεωρούμενη χρονική περίοδο, διατεταγμένα κατά σειρά μεγέθους. Το Σχήμα 5.4 παραθέτει τα δύο είδη καμπυλών ενός τύπου καταναλωτή (οικιακού) κατά τη διάρκεια ενός τυπικού 24ώρου.

Οι καμπύλες φορτίου μπορεί να αναφέρονται στα φυσικά μεγέθη φορτίου και χρόνου (για παράδειγμα MW και ώρες) ή να είναι ανηγμένες στα βασικά αντίστοιχα μεγέθη, οπότε εκφράζονται σε % ή ανά μονάδα (α.μ.) τιμές.



Σχήμα 5.4 Τυπικές καμπύλες φορτίου οικιακού καταναλωτή κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου. (α) Χρονολογική καμπύλη φορτίου, (β) Καμπύλη διάρκειας φορτίου.

5.8.2 Συλλογή και Επεξεργασία Στοιχείων Φόρτισης Μετασχηματιστών

Η μεταβολή των φορτίων παρουσιάζει καταρχήν ημερήσια περιοδικότητα, με αποτέλεσμα η 24-ωρη καμπύλη φορτίου να αποτελεί την πλέον συνήθη μορφή αναπαράστασης της χρονολογικής καμπύλης φορτίου. Η μορφή της καμπύλης αυτής παρουσιάζει σημαντική σταθερότητα για ορισμένες κατηγορίες φορτίων, όπως για παράδειγμα οικιακά, εμπορικά, βιομηχανικά ή αγροτικά. Η τυπική 24-ωρη καμπύλη φόρτισης ενός μετασχηματιστή διανομής προκύπτει με βάση την κατηγορία του φορτίου που εξυπηρετεί ο μετασχηματιστής (υποδιαιρούμενη και σε υποκατηγορίες) με βάση στατιστική επεξεργασία κατάλληλου δείγματος καταναλωτών της κατηγορίας, όπως αναλύεται στη συνέχεια. Η τυπική καμπύλη φορτίου αντιστοιχεί συνήθως στη μέση τιμή, ενώ υπολογίζεται και η τυπική απόκλιση, η οποία εκφράζει τη διασπορά από τη μέση τιμή.

Στη συνέχεια, παρατίθενται χαρακτηριστικές καμπύλες φορτίου τυπικών ημερών, οι οποίες αντιστοιχούν σε φόρτιση μετασχηματιστών διανομής, με βάση το είδος του καταναλωτή που τροφοδοτούν. Ειδικότερα, παρατίθενται οι ακόλουθες κατηγορίες μετασχηματιστών (για εργάσιμες και μη ημέρες, χειμώνα και καλοκαιριού):

- Μετασχηματιστές διανομής που τροφοδοτούν οικιακούς καταναλωτές σε αστική περιοχή,
- Μετασχηματιστές διανομής που τροφοδοτούν μέσους και μικρούς βιομηχανικούς καταναλωτές,
- Μετασχηματιστές διανομής που τροφοδοτούν αγροτικούς και αρδευτικούς καταναλωτές,
- Μετασχηματιστές διανομής που τροφοδοτούν τουριστικούς καταναλωτές σε νησί.

Οι καμπύλες εκφράζονται σε α.μ. μέγεθος, ανηγμένο στη βάση ισχύος του μετασχηματιστή, δηλαδή την ονομαστική φαινόμενη ισχύ του.

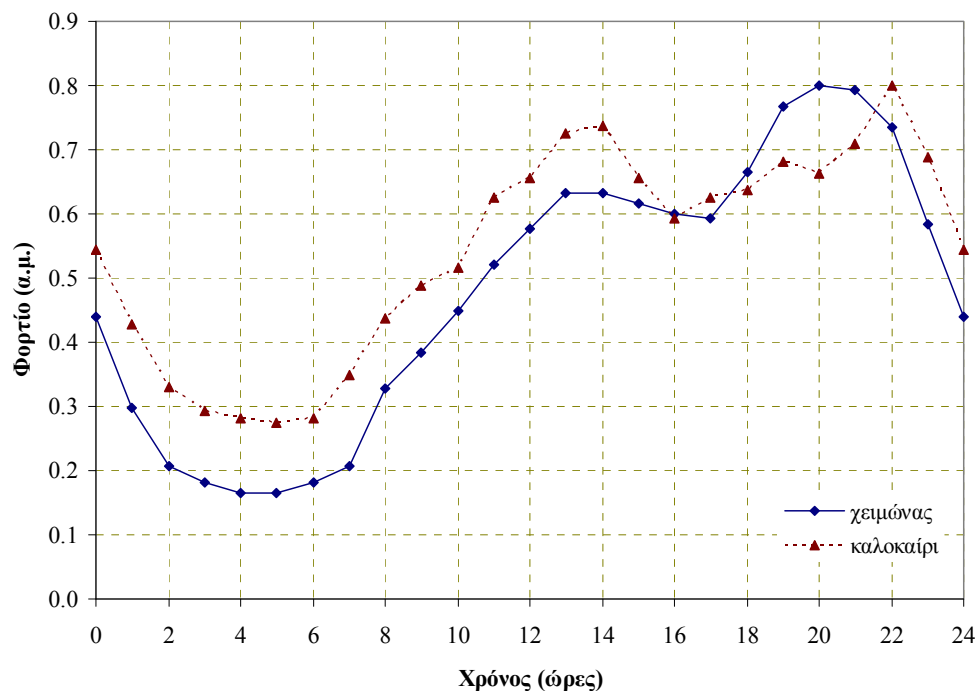
Τα στοιχεία προέκυψαν με βάση στατιστική επεξεργασία διαθέσιμων μετρήσεων σε διάφορους υποσταθμούς του δικτύου και με βάση την εμπειρία μηχανικών της Διεύθυνσης Δικτύου της Δ.Ε.Η., χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται στις αναφορές [5.27] και [5.28]. Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή:

- Συλλέχθηκε κατάλληλο πλήθος στοιχείων από τα δεδομένα έρευνας φορτίου σε δείγμα μεγάλου αριθμού πελατών χαμηλής τάσης διαφόρων κατηγοριών.
- Από τα στοιχεία αυτά εξήχθησαν τυπικές ημερήσιες καμπύλες φορτίου για κάθε μήνα. Ειδικότερα, εξήχθησαν καμπύλες για τις εργάσιμες και τις μη εργάσιμες ημέρες

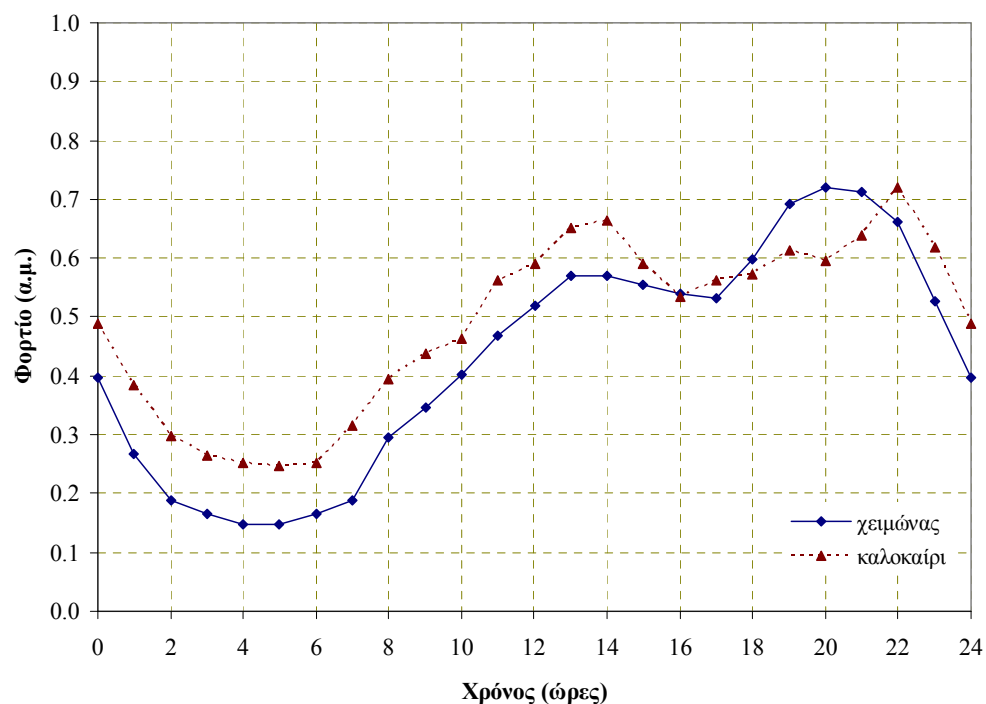
(λαμβάνοντας τη σταθμική μέση καμπύλη των εργάσιμων και μη εργάσιμων ημερών του κάθε μήνα, αντίστοιχα).

- Από τις παραπάνω καμπύλες, προέκυψαν σταθμικές μέσες καμπύλες χειμώνα και καλοκαιριού (για εργάσιμες και μη εργάσιμες ημέρες), διαιρώντας το έτος σε δύο ισοδύναμες χρονικές περιόδους. Οι συντελεστές στάθμισης προέκυψαν με βάση την πιθανότητα εμφάνισης μεγίστου σε κάθε έναν από τους μήνες της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου, λαμβάνοντας ως μέγιστο φορτίο την αντίστοιχη αιχμή, ανά περίοδο (χειμερινή και θερινή).
- Τα δεδομένα φόρτισης που αναφέρονται στο παρελθόν έτος δίνουν τα δεδομένα για την καμπύλη αιχμής που εμφανίστηκε τη συγκεκριμένη ημέρα του παρελθόντος έτους. Ωστόσο, κατά την εξαγωγή της τυπικής καμπύλης με τη διαδικασία που αναφέρθηκε παραπάνω, υπολογίζονται οι αιχμές που θα εμφανίζονταν σε μια συνήθη ημέρα, κατά τον πλέον αντιπροσωπευτικό τρόπο, η οποία ενδέχεται να μη συμπίπτει με την αιχμή που πραγματικά εμφανίστηκε, ανάλογα με τις ιδιάζουσες καιρικές συνθήκες ή συνθήκες φόρτισης που μπορεί να οδήγησαν στη συγκεκριμένη καμπύλη. Πρόκειται ωστόσο για μια αναγκαία παραδοχή κατά την εξαγωγή των τυπικών καμπυλών φορτίου, καθώς δεν υπάρχει τρόπος να προβλεφθεί εξάρτηση από τέτοιου είδους παράγοντες (όπως π.χ. εάν οι καιρικές συνθήκες οδηγήσουν σε εμφάνιση μεγίστου το μήνα Ιούλιο, όπου τα φορτία είναι γενικά υψηλά ή τον Αύγουστο, όπου η αιχμή είναι αισθητά μικρότερη, οδηγώντας σε μη αντιπροσωπευτική καμπύλη φορτίου).
- Η αναγωγή των καμπυλών των σχημάτων (Σχήμα 5.5 έως Σχήμα 5.12) έχει γίνει με βάση την ετήσια αιχμή του εξυπηρετούμενου φορτίου (όποτε αυτό εμφανίζεται, χειμώνα ή καλοκαίρι, εργάσιμη ή μη εργάσιμη ημέρα).
- Η ονομαστική ισχύς των μετασχηματιστών λαμβάνεται 20% μεγαλύτερη από το εξυπηρετούμενο φορτίο αιχμής κάθε καταναλωτή (οδηγώντας σε αιχμές των καμπυλών που εμφανίζονται στα σχήματα (Σχήμα 5.5 έως Σχήμα 5.12) μικρότερες ή ίσες του 80%). Η υπερδιαστασιολόγηση αυτή είναι αναγκαία έτσι ώστε, δεδομένου του αναμενόμενου ρυθμού αύξησης του φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή, η αναμενόμενη αιχμή των μελλοντικών ετών λειτουργίας να εντός των επιτρεπτών ορίων υπερφόρτισής του.

Στο Σχήμα 5.5 και στο Σχήμα 5.6 φαίνονται οι καμπύλες φόρτισης μετασχηματιστών διανομής που τροφοδοτούν οικιακούς καταναλωτές σε αστική περιοχή κατά τη διάρκεια μιας εργάσιμης και μη εργάσιμης μέρας, αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στα δύο αυτά σχήματα, το οικιακό φορτίο παρουσιάζει παρόμοιες μεταβολές κατά τις περιόδους χειμώνα και καλοκαιριού, εμφανίζοντας το μέγιστο κατά τις απογευματινές ώρες. Παρόμοια είναι και η μεταβολή του φορτίου κατά τη διάρκεια μη εργάσιμης ημέρας, γεγονός αναμενόμενο, δεδομένου ότι οι οικιακοί καταναλωτές εμφανίζουν παρόμοια δραστηριότητα κατά τη διάρκεια εργάσιμων και μη εργάσιμων ημερών.



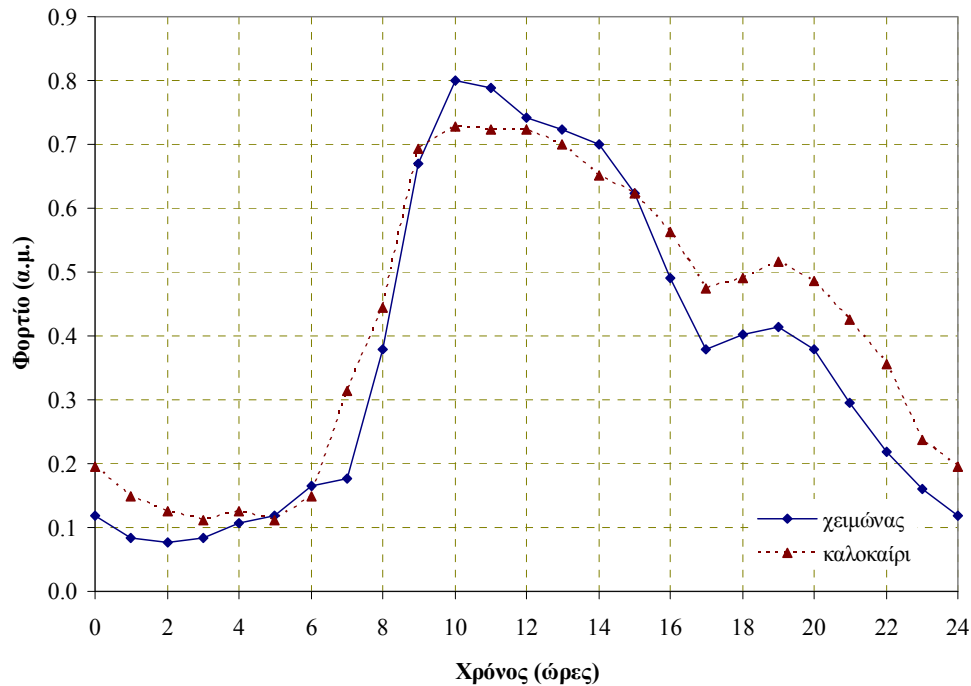
Σχήμα 5.5 Τυπική καμπύλη φόρτισης μετασχηματιστή διανομής που τροφοδοτεί οικιακούς καταναλωτές σε αστική περιοχή κατά τη διάρκεια μίας εργάσιμης ημέρας.



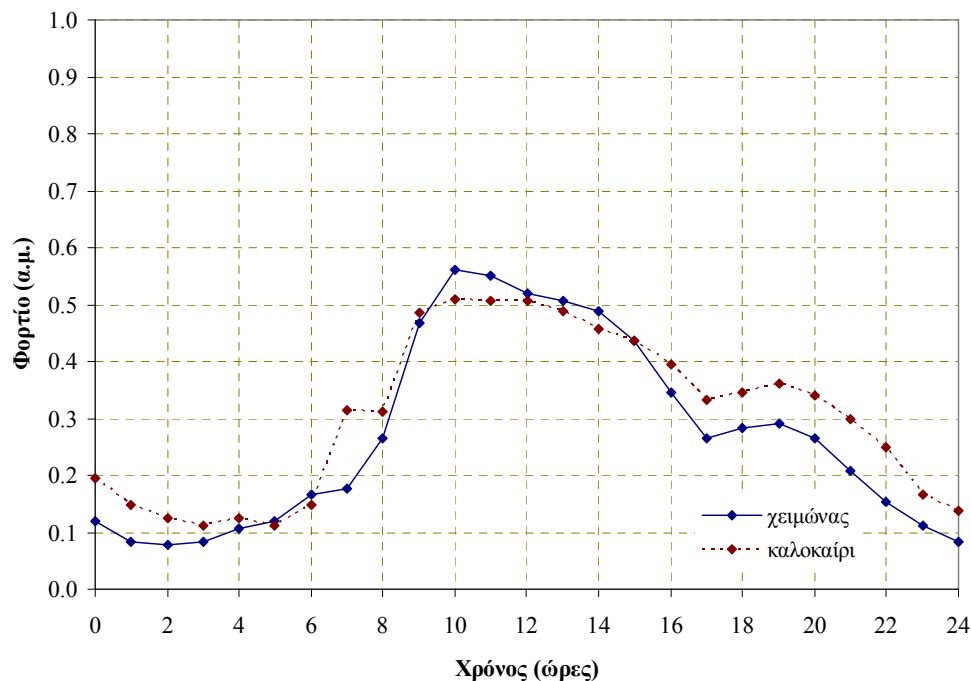
Σχήμα 5.6 Τυπική καμπύλη φόρτισης μετασχηματιστή διανομής που τροφοδοτεί οικιακούς καταναλωτές σε αστική περιοχή κατά τη διάρκεια μίας μη εργάσιμης ημέρας.

Στο Σχήμα 5.7 και στο Σχήμα 5.8 φαίνονται οι καμπύλες φόρτισης μετασχηματιστών διανομής που τροφοδοτούν μέσους και μικρούς βιομηχανικούς καταναλωτές κατά τη διάρκεια μιας εργάσιμης και μη εργάσιμης μέρας, αντίστοιχα. Η αιχμή των βιομηχανικών καταναλωτών εμφανίζεται τις πρωινές ώρες, ενώ η καμπύλη φορτίου εργάσιμης ημέρας χειμώνα και καλοκαιριού χαρακτηρίζεται από παρόμοιες τιμές και μεταβολή. Αντίθετα, τις

μη εργάσιμες ημέρες, εμφανίζεται σημαντική πτώση του φορτίου, το οποίο εμφανίζει και πάλι την αιχμή του τις πρωινές ώρες. Επιπλέον, σε αντίθεση με όλα τα άλλα είδη καταναλωτών, το φορτίο αιχμής σε αυτήν την περίπτωση εμφανίζεται το χειμώνα.



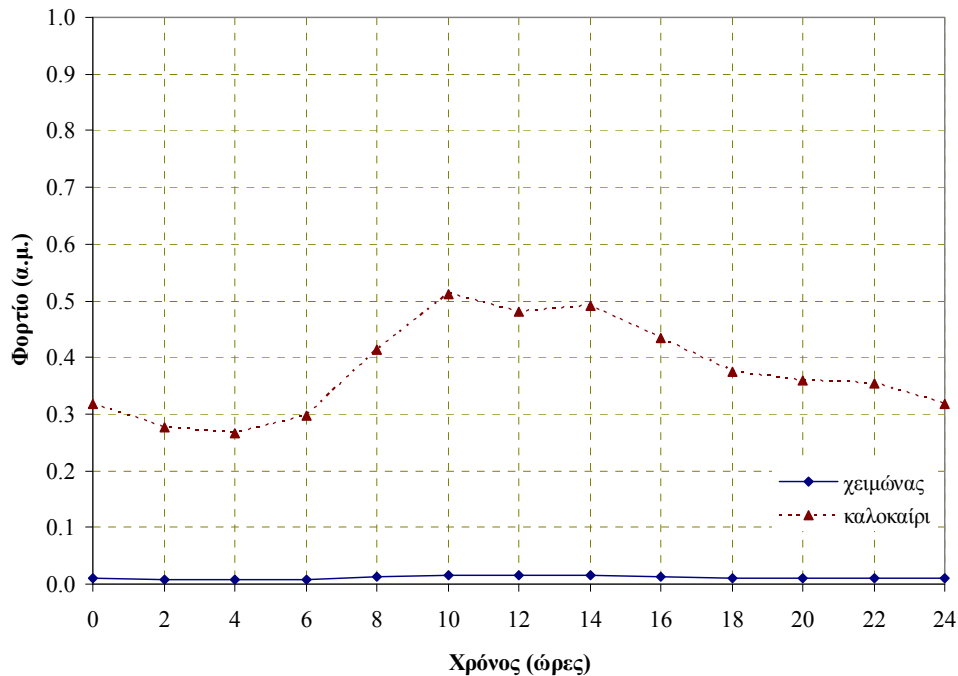
Σχήμα 5.7 Τυπική καμπύλη φόρτισης μετασχηματιστή διανομής που τροφοδοτεί μέσους και μικρούς βιομηχανικούς καταναλωτές κατά τη διάρκεια μίας εργάσιμης ημέρας.



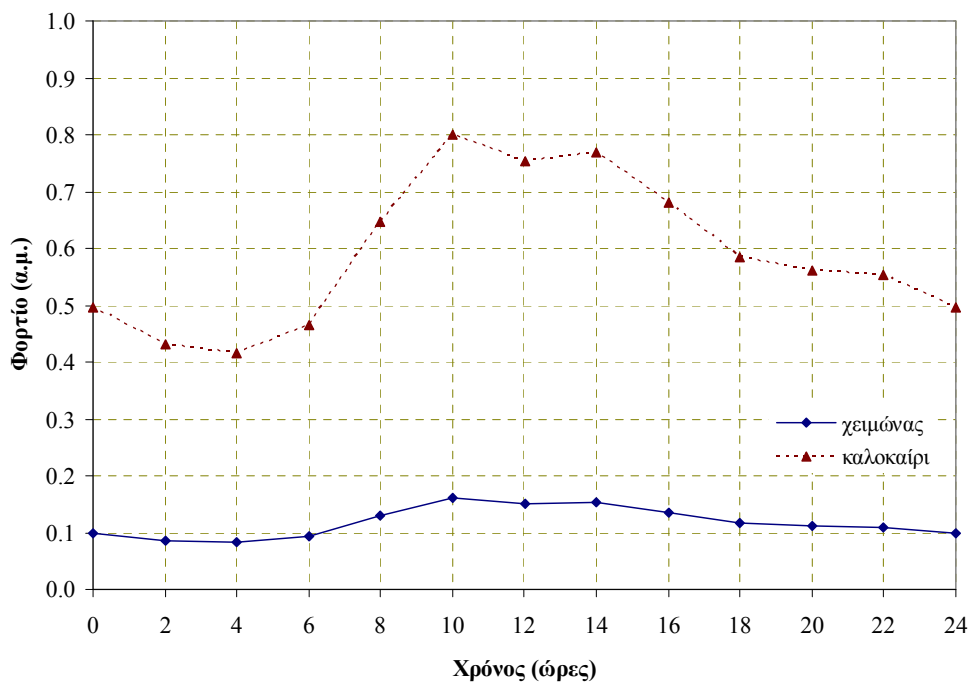
Σχήμα 5.8 Τυπική καμπύλη φόρτισης μετασχηματιστή διανομής που τροφοδοτεί μέσους και μικρούς βιομηχανικούς καταναλωτές κατά τη διάρκεια μίας μη εργάσιμης ημέρας.

Στο Σχήμα 5.9 και στο Σχήμα 5.10 φαίνονται οι καμπύλες φόρτισης μετασχηματιστών διανομής που τροφοδοτούν αγροτικούς και αρδευτικούς καταναλωτές κατά τη διάρκεια μιας

Στο Σχήμα 5.11 και στο Σχήμα 5.12 φαίνονται οι καμπύλες φόρτισης μετασχηματιστών διανομής που τροφοδοτούν τουριστικούς καταναλωτές σε νησί κατά τη διάρκεια μιας εργάσιμης και μη εργάσιμης μέρας, αντίστοιχα. Η μέγιστη ζήτηση των τουριστικών καταναλωτών εμφανίζεται τις μη εργάσιμες ημέρες του καλοκαιριού, ενώ οι καμπύλες φορτίου του χειμώνα είναι σημαντικά χαμηλότερες από αυτές του καλοκαιριού.



Σχήμα 5.11 Τυπική καμπύλη φόρτισης μετασχηματιστή διανομής που τροφοδοτεί τουριστικούς καταναλωτές κατά τη διάρκεια μίας εργάσιμης ημέρας.



Σχήμα 5.12 Τυπική καμπύλη φόρτισης μετασχηματιστή διανομής που τροφοδοτεί τουριστικούς καταναλωτές κατά τη διάρκεια μίας μη εργάσιμης ημέρας.

5.8.3 Αξιοποίηση των Στοιχείων Φόρτισης Μετασχηματιστών στον Υπολογισμό του Συνολικού Κόστους Κατοχής

Όπως φαίνεται από τις καμπύλες φόρτισης μετασχηματιστών που παρατέθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, η μορφή της αντιπροσωπευτικής καμπύλης φόρτισης κάθε κατηγορίας μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά, εάν πρόκειται για εργάσιμη ή μη ημέρα, ή με την εποχή του έτους. Μπορεί συνεπώς η ετήσια συμπεριφορά του φορτίου να περιγραφεί με ένα ορισμένο αριθμό τυπικών καμπυλών, για παράδειγμα 2 ανά εβδομάδα (οι οποίες αντιστοιχούν σε εργάσιμη και μη εργάσιμη ημέρα) επί 2 εποχές (θεωρώντας ότι η βασική διαφοροποίηση των καμπυλών γίνεται μεταξύ χειμώνα και καλοκαιριού, διαιρώντας έτσι το έτος σε δύο εξαμηνιαίες περιόδους), που δίνουν 4 αντιπροσωπευτικές καμπύλες, και εάν ληφθούν μέσες ωριαίες τιμές φορτίου (24 τιμές ανά ημέρα) προκύπτουν $4 \cdot 24 = 96$ διαφορετικές καταστάσεις φόρτισης του δικτύου. Κάθε τυπική καμπύλη (και τα σημεία ορισμού της) χαρακτηρίζεται από τη συχνότητα εμφάνισής της στη συνολική περίοδο μελέτης. Η συχνότητα εμφάνισης μιας τυπικής καμπύλης φορτίου προκύπτει άμεσα από τη χρονική υποπερίοδο την οποία περιγράφει. Για παράδειγμα, η τυπική καμπύλη της εργάσιμης ημέρας του χειμώνα, και οι καταστάσεις φόρτισης που ορίζονται από αυτή, εμφανίζονται 120 φορές/έτος, για όλες τις κατηγορίες φορτίου [5.29], σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$[(5 \text{ εργάσιμες μέρες} / \text{εβδομάδα}) \cdot (4 \text{ εβδομάδες} / \text{μήνα}) \cdot (6 \text{ μήνες} / \text{έτος})] = 120 \text{ φορές} / \text{έτος} \quad (5.8)$$

Με βάση την καμπύλη φορτίου των καταναλωτών του υποσταθμού στον οποίο βρίσκεται ο υπό εξέταση μετασχηματιστής, προκύπτει αντίστοιχα η καμπύλη φόρτισής του. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική μεταβολή που αναφέρθηκε παραπάνω, μπορεί να προκύψει με ακρίβεια η μέση φόρτιση του μετασχηματιστή κατά το χρονικό διάστημα της μελέτης, είτε σε ημερήσια ή σε ετήσια βάση. Για να ληφθεί υπόψη η αναμενόμενη ετήσια αύξηση του εξυπηρετούμενου φορτίου κατά τη χρονική διάρκεια της μελέτης είναι αναγκαίος ο συνυπολογισμός του ρυθμού αύξησης του φορτίου (ο οποίος προκύπτει και πάλι με βάση στατιστικά στοιχεία του εξυπηρετούμενου φορτίου, συναρτήσει του είδους των καταναλωτών και της θέσης του υποσταθμού). Ο ρυθμός αυτός χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ετήσιας αύξησης της αιχμής του εξυπηρετούμενου φορτίου και κατά επέκταση της αντίστοιχης μετατόπισης της θεωρούμενης καμπύλης φορτίου, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

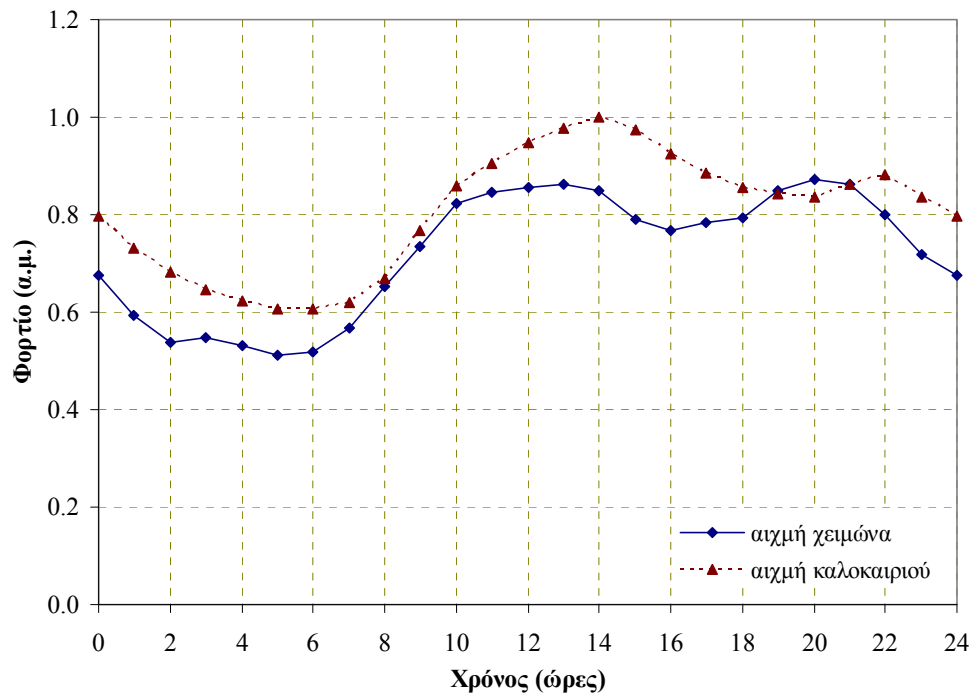
$$P_{\max}^n = (1+t)^n \cdot P_{\max}^0 \quad (5.9)$$

όπου $P_{\max}^0$ είναι η αιχμή του εξυπηρετούμενου φορτίου το πρώτο έτος της μελέτης, $P_{\max}^n$ είναι η αιχμή του εξυπηρετούμενου φορτίου το n -οστό έτος της μελέτης και t είναι ο ρυθμός αύξησης του εξυπηρετούμενου φορτίου.

Η καμπύλη φόρτισης που προκύπτει με την παραπάνω διαδικασία χρησιμοποιείται στους τύπους αναλυτικού υπολογισμού του συνολικού κόστους κατοχής που παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους (για παράδειγμα σχέση (5.13)). Οι καμπύλες φορτίου αξιοποιούνται επίσης και για την εξαγωγή περαιτέρω δεδομένων, τα οποία παίζουν καθοριστικό ρόλο στους υπολογισμούς. Ένα από τα δεδομένα αυτά είναι και η τιμή φόρτισης του μετασχηματιστή τη χρονική στιγμή κατά την οποία εμφανίζεται η αιχμή του φορτίου του συστήματος, η οποία χρησιμοποιείται στη σχέση (5.11). Η εμπλοκή της μεταβολής του φορτίου του συστήματος στο οποίο συνδέεται ο μετασχηματιστής διανομής εμπλέκει έναν ακόμη παράγοντα πολυπλοκότητας στους υπολογισμούς του συνολικού κόστους κατοχής, καθώς διαιρεί πρακτικά τους μετασχηματιστές διανομής σε τουλάχιστον δύο επιπλέον κατηγορίες: σε αυτούς που συνδέονται στο διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο χαρακτηρίζεται από ενιαία καμπύλη φορτίου και σε αυτούς που εγκαθίστανται σε αυτόνομα (για παράδειγμα νησιωτικά) συστήματα, όπου η συνολική καμπύλη φορτίου ενδέχεται να διαφέρει σημαντικά. Στο Σχήμα 5.13 έως το Σχήμα 5.15 παρατίθενται ενδεικτικά οι α.μ. καμπύλες φόρτισης του ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος μεταφοράς [5.30] και του αυτόνομου συστήματος της Κρήτης και της Ρόδου, αντίστοιχα, οι

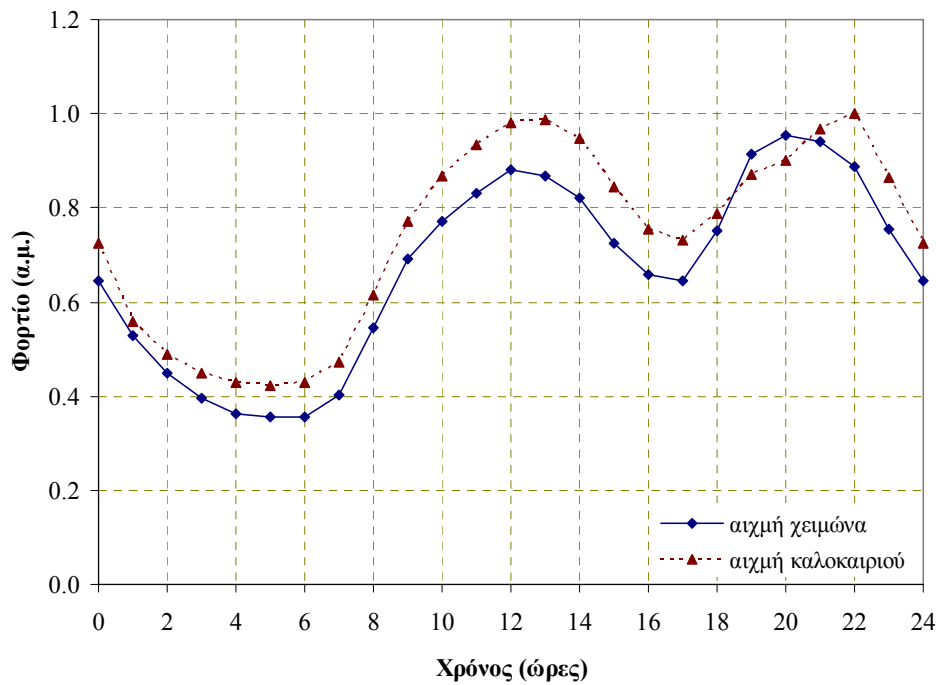
οποίες δίνουν μία ενδεικτική εικόνα του διαφορετικού τρόπου μεταβολής του φορτίου του κάθε συστήματος.

Καμπύλη φορτίου διασυνδεδεμένου συστήματος

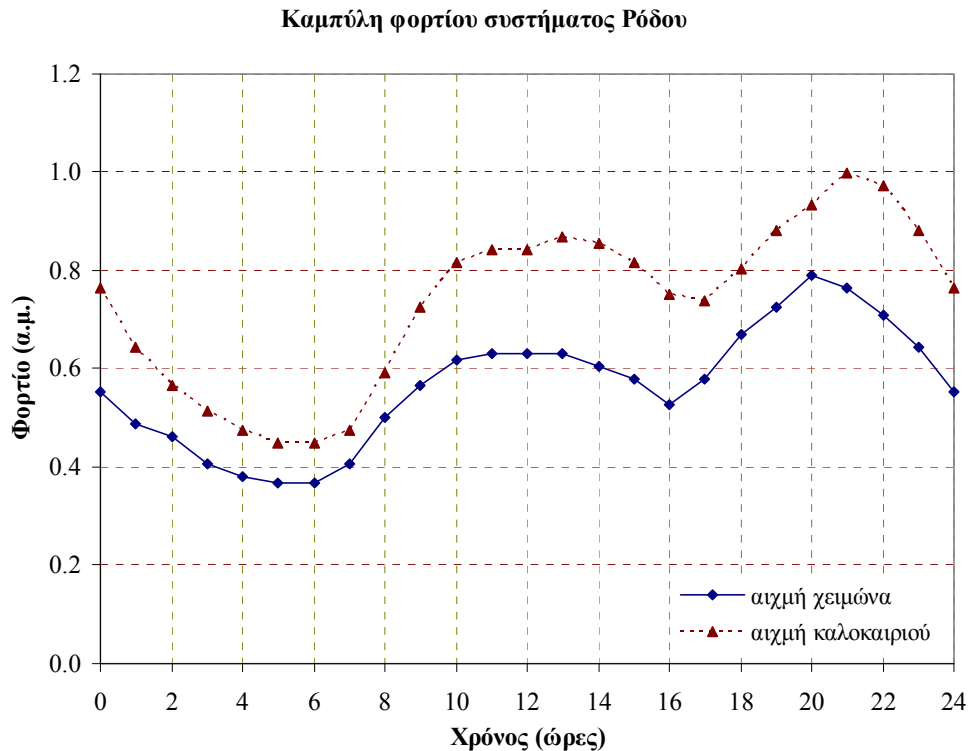


Σχήμα 5.13 Τυπική καμπύλη φορτίου αιχμής διασυνδεδεμένου συστήματος.

Καμπύλη φορτίου συστήματος Κρήτης



Σχήμα 5.14 Τυπική καμπύλη φορτίου αιχμής συστήματος Κρήτης.



Σχήμα 5.15 Τυπική καμπύλη φορτίου αιχμής συστήματος Ρόδου.

5.9 ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

Η αξιολόγηση του κόστους των απωλειών περιλαμβάνει πολλούς παράγοντες οικονομικούς και μη, κάποιοι από τους οποίους πρέπει να εκτιμηθούν. Επειδή εμπλέκονται κυρίως οικονομικοί συντελεστές, ο χρήστης θα πρέπει να δίνει ιδιαίτερη σημασία στον αριθμό των δεκαδικών ψηφίων του κάθε μεγέθους κατά τη διάρκεια των υπολογισμών. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τους συντελεστές απωλειών κενού φορτίου και των απωλειών φορτίου αναπτύσσονται παρακάτω. Η μέθοδος στηρίζεται στο πρότυπο ANSI/IEEE C57.120-1991 [5.25] από το οποίο έχουν ληφθεί και οι ορισμοί για τους παράγοντες που αναλύονται στη συνέχεια.

5.9.1 Συντελεστής Διαθεσιμότητας

Ο συντελεστής διαθεσιμότητας (AF) μειώνει την απαιτούμενη παραγωγική ικανότητα του συστήματος ως προς τις απώλειες φορτίου. Ο συντελεστής διαθεσιμότητας είναι το ποσοστό του χρόνου που προβλέπεται ότι θα είναι υπό φορτίο ο μετασχηματιστής. Χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς του κανονικοποιημένου ετήσιου κόστους των απωλειών φορτίου και κενού φορτίου.

5.9.2 Συντελεστής Ευθύνης

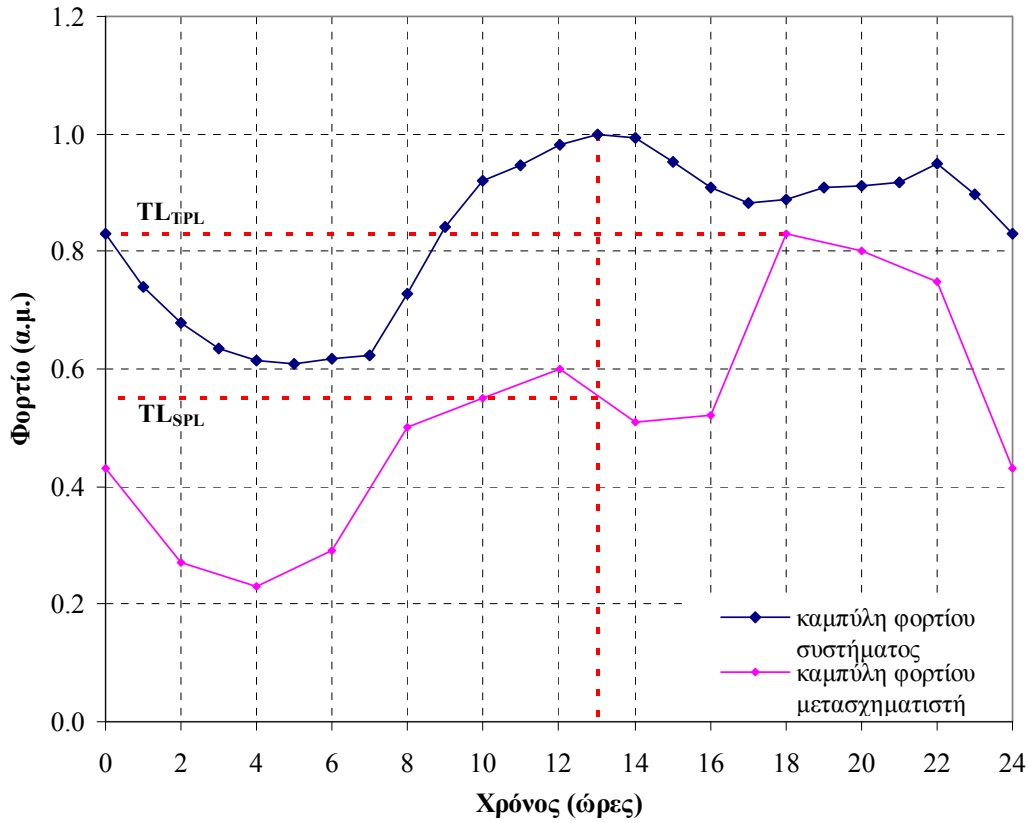
Ο συντελεστής ευθύνης (PRF) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$PRF = \frac{TL_{SPL}}{TL_{TPL}} \quad (5.10)$$

όπου, $PRF < 1$, TL_{SPL} είναι το φορτίο του μετασχηματιστή τη στιγμή της αιχμής φορτίου του συστήματος και TL_{TPL} είναι η αιχμή φορτίου του μετασχηματιστή.

Η μέγιστη ισχύς του μετασχηματιστή εμφανίζεται σε χρονική στιγμή που δε συμπίπτει γενικά με το χρόνο μέγιστης ισχύος του συστήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.16.

Συνεπώς, για την τιμή ισχύος χρησιμοποιείται η ισχύς ($PRF \cdot TL_{TPL}$) που εμφανίζεται στο χρόνο αιχμής του συστήματος και όχι η μέγιστη ισχύς του μετασχηματιστή (TL_{TPL}).



Σχήμα 5.16 Καμπύλες φορτίου συστήματος και μετασχηματιστή.

5.9.3 Ετήσια Ισοδύναμη Αιχμή Φορτίου

Η ετήσια ισοδύναμη αιχμή φορτίου (PUL) προκύπτει από την αρχική αιχμή του φορτίου του μετασχηματιστή (% της ονομαστικής του ικανότητας) (ITL_{TPL}^1) και από τον ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης της αιχμής του φορτίου του μετασχηματιστή ($TPLIF$) και δίνεται από τη σχέση:

$$PUL = \frac{\sum_{j=1}^{BL} ITL_{TPL} \cdot (1 + TPLIF)^j}{BL} \quad (5.11)$$

όπου BL η συνολική διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή (σε χρόνια).

Η εξίσωση αυτή μπορεί να απλοποιηθεί περαιτέρω, ως εξής:

$$PUL = \frac{ITL_{TPL} \cdot (1 + TPLIF) \cdot [(1 + TPLIF)^{BL} - 1]}{BL \cdot TPLIF} \quad (5.12)$$

Για τον υπολογισμό της τιμής αυτής (ITL_{TPL}) θεωρείται μια γραμμική αύξηση της αιχμής του φορτίου του μετασχηματιστή. Συνεπώς, η ετήσια ισοδύναμη ομοιόμορφη αιχμή φορτίου του μετασχηματιστή (PUL) είναι η ανηγμένη αιχμή του φορτίου που τροφοδοτεί ο μετασχηματιστής λαμβάνοντας υπόψη την καμπύλη φόρτισης του μετασχηματιστή και:

- θεωρώντας μία αρχική αιχμή φορτίου για τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του

¹ ή οποιουδήποτε άλλου χρονικού διαστήματος, το οποίο μπορεί να αρχίζει από την στιγμή της αρχικής φόρτισης του μετασχηματιστή έως ότου φτάσει το όριο φόρτισης που έχει τεθεί.

- εκτιμώντας τον ετήσιο ρυθμό αύξησης της αιχμής του φορτίου
- ορίζοντας μία μέγιστη επιτρεπόμενη αιχμή φορτίου, πέρα από την οποία ο μετασχηματιστής πρέπει να αντικατασταθεί.

5.9.4 Ετήσιος Συντελεστής Φορτίου

Ο ετήσιος συντελεστής φορτίου (I_f) είναι ίσος με το λόγο της ενέργειας που καταναλώνεται λόγω της φόρτισης των μετασχηματιστών, προς την ενέργεια που θα καταναλωνόταν, αν οι μετασχηματιστές ήταν συνεχώς φορτισμένοι με το μέγιστο ονομαστικό φορτίο.

5.9.5 Ετήσιος Συντελεστής Απωλειών

Ο ετήσιος συντελεστής απωλειών (LF) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των ετήσιων απωλειών των μετασχηματιστών. Η σχέση που δίνει το συντελεστή αυτό είναι η παρακάτω:

$$LF = \frac{\int_0^T (TL)^2 \cdot dt}{\left(TL'_{TPL}\right)^2 \cdot T} \quad (5.13)$$

όπου TL είναι η μεταβλητή φόρτιση του μετασχηματιστή κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου T και TL'_{TPL} είναι ο μέσος όρος των αιχμών κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή. Ισχύει από εμπειρικές παρατηρήσεις ότι το LF είναι συνάρτηση του ετήσιου συντελεστή φορτίου I_f σύμφωνα με τη σχέση [5.1]:

$$LF = 0.15 \cdot I_f + 0.85 \cdot (I_f)^2 \quad (5.14)$$

όπου $0 < I_f < 1$.

5.9.6 Συντελεστής Φόρτισης

Ο συντελεστής φόρτισης (TLF) δίνει το ισοδύναμο φορτίο του μετασχηματιστή, το οποίο χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του συντελεστή απωλειών φορτίου. Ο συντελεστής αυτός προκύπτει από τη μέση τετραγωνική τιμή των προβλεπόμενων φορτίσεων κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή διαιρεμένη με τη φόρτιση στην οποία έχουν μετρηθεί οι εγγυημένες απώλειες του μετασχηματιστή.

Ο συντελεστής φόρτισης κατέχει θέση ισοδύναμου φορτίου (το ισοδύναμο φορτίο είναι το σταθερό φορτίο που αν εφαρμοζόταν 8760 ώρες το χρόνο θα παρήγαγε το ίδιο ποσό απωλειών με το πραγματικό φορτίο κατά τη διάρκεια του δεδομένου χρόνου) στο ανά μονάδα σύστημα.

Αν είναι γνωστός ο συντελεστής απωλειών (LF) (πρέπει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής απωλειών πρέπει να προκύπτει από την ίδια βάση χρόνου με το συντελεστή φόρτισης, δηλαδή 8760 ώρες ετησίως) για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, ένας ευκολότερος τρόπος για να υπολογιστεί ο συντελεστής απωλειών είναι μέσω της σχέσης:

$$(TLF)^2 = (LF) \cdot (PUL)^2 \quad (5.15)$$

5.9.7 Συντελεστής Ανάκτησης Κεφαλαίου Επένδυσης

Ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου ($FCRG$ για την παραγωγή ή συντελεστής ετήσιου κόστους της επένδυσης για το σύστημα παραγωγής, $FCRS$ για το σύστημα μεταφοράς ή συντελεστής ετήσιου κόστους της επένδυσης για το σύστημα μεταφοράς, $FCRT$ για τους μετασχηματιστές ή συντελεστής ετήσιου κόστους της επένδυσης για τους μετασχηματιστές) είναι το κανονικοποιημένο ετήσιο κόστος διαιρεμένο με το κόστος της επένδυσης για τις

εγκαταστάσεις της παραγωγής, του συστήματος μεταφοράς και του μετασχηματιστή, αντίστοιχα. Με άλλα λόγια, ο συντελεστής αυτός αντιπροσωπεύει το «κόστος κτήσης», είναι σταθερός, εφόσον δεν εξαρτάται από την ενέργεια σε kWh που θα καταναλωθεί και δείχνει το εισόδημα ανά χρόνο που είναι απαραίτητο ώστε να καλυφθεί η επένδυση. Κάποιοι από τους παράγοντες που επηρεάζουν το παραπάνω κόστος, εκφραζόμενοι ως ποσοστό της επένδυσης, είναι ο κανονικοποιημένος κρατικός φόρος και το ετήσιο κόστος ασφάλειας.

Σε αυτό το σημείο είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί ότι ο συντελεστής ετήσιου κόστους της επένδυσης για τους μετασχηματιστές χρησιμοποιείται σαν παρονομαστής στις σχέσεις υπολογισμού των συντελεστών απωλειών. Μια υψηλή τιμή του θα οδηγήσει σε χαμηλή τιμή του συντελεστή ενώ μια χαμηλή τιμή θα οδηγήσει σε υψηλή τιμή του συντελεστή. Χρήστες που αγοράζουν μετασχηματιστές με κάποια μορφή χρηματοδότησης, η οποία δεν περιλαμβάνει τόκους, ασφάλειες κτλ., δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις σχέσεις που αναπτύσσονται στην παρούσα εργασία.

5.9.8 Παρόν Ετήσιο Κόστος Ενέργειας

Το παρόν ετήσιο κόστος ενέργειας (CYEC) είναι το κόστος της ενέργειας κατά το πρώτο έτος ζωής του μετασχηματιστή, που θεωρούμε ως τρέχον έτος, εκφρασμένο σε €/kWh. Το κόστος αυτό δεν είναι σταθερό κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή, για αυτό χρησιμοποιούμε ένα συντελεστή προσαύξησης για το κάθε έτος (EIR), εκφρασμένο σε 1/yr, ώστε να υπολογίσουμε τελικά το κανονικοποιημένο κόστος το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε στους τύπους υπολογισμού των συντελεστών απωλειών. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι σε μία απελευθερωμένη αγορά ενέργειας το κόστος της ενέργειας μεταβάλλεται από ώρα σε ώρα, ανάλογα με το πρόκειται να σε φορτίο βάσης ή αιχμής. Στη παρούσα έρευνα χρησιμοποιείται ένα μέσο ετήσιο κόστος ενέργειας.

5.9.9 Συντελεστής Ανάκτησης Κεφαλαίου

Ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου (CRF) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του «συνολικού ετήσιου κανονικοποιημένου κόστους» [5.1]. Η σχέση υπολογισμού του είναι:

$$CRF = \frac{d \cdot (1+d)^{BL}}{(1+d)^{BL} - 1} \quad (5.16)$$

όπου d το προεξοφλητικό επιτόκιο και BL ο αριθμός των ετών στα οποία πρόκειται να κανονικοποιηθεί το κόστος.

5.9.10 Τιμή Προσφοράς

Η τιμή προσφοράς (BP) είναι η τιμή πώλησης του μετασχηματιστή.

5.9.11 Διάρκεια Χρήσης του Μετασχηματιστή

Η διάρκεια χρήσης του μετασχηματιστή (BL) ταυτίζεται με τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή. Η παράμετρος αυτή είναι χρήσιμη για τον υπολογισμό του συντελεστή ανάκτησης κεφαλαίου του μετασχηματιστή.

5.9.12 Συντελεστής Προσαύξησης

Ο συντελεστής προσαύξησης (IF) είναι ένας συντελεστής που αντιπροσωπεύει το συνολικό ποσό που πρέπει να πληρώσει ο αγοραστής του μετασχηματιστή για να αποκτήσει το μετασχηματιστή, και συμπεριλαμβάνει την τιμή αγοράς, την προκαταβολή, το φόρο και λοιπά έξοδα. Οι τύποι προσδιορισμού των συντελεστών απωλειών που παρέχονται στους κατασκευαστές μετασχηματιστών κατά τη διάρκεια σύνταξης των προσφορών, πρέπει να διαμορφωθούν κατάλληλα με την προσθήκη του συντελεστή αυτού. Ανάλογα με το χρήστη του μετασχηματιστή, κάποια εσωτερικά έξοδα περιλαμβάνονται σε αυτό τον όρο, ορισμένα από τα οποία είναι ο φόρος, οι αμοιβές των μηχανικών, το κόστος επίβλεψης της κατασκευής, οι αμοιβές του συμβολαιογράφου, το επιτόκιο κατά τη διάρκεια της κατασκευής, η εγγύηση

και ασφάλεια κατά τη διάρκεια της μεταφοράς και τέλος τα διάφορα γενικά έξοδα. Όλοι αυτοί οι συντελεστές (εκφρασμένοι στο ανά μονάδα σύστημα) προστίθενται στη μονάδα και το αποτέλεσμα (IF) χρησιμοποιείται στον παρανομαστή των σχέσεων αξιολόγησης των απωλειών.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ [5.25]:

Ενδεικτικές τιμές που μπορεί να χρησιμοποιηθούν είναι οι παρακάτω:

Φόρος	: 8%
Αμοιβές μηχανικών	: 10%
Ασφάλεια κατά τη διάρκεια της μεταφοράς	: 1%
Επιτόκιο κατά τη διάρκεια της κατασκευής	: 2% (2 μήνες με 12% ανά έτος)

Σύμφωνα με τις παραπάνω τιμές, ο συντελεστής προσαύξησης υπολογίζεται ως εξής:

$$IF = 1.00 + 0.08 + 0.10 + 0.01 + 0.02 = 1.21$$

5.9.13 Κόστος της Παραγωγικής Ικανότητας του Συστήματος

Το κόστος της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος (LIC) αντιπροσωπεύει το ετήσιο κόστος της επιπρόσθετης παραγωγής και μεταφοράς, το οποίο είναι αναγκαίο για την παροχή 1kW αιχμής φορτίου στο μετασχηματιστή. Ο συντελεστής αυτός περιλαμβάνει το κόστος των μονάδων βάσης καθώς και των εφεδρικών μονάδων παραγωγής. Με άλλα λόγια, το κόστος της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος είναι το ετήσιο κόστος σε €/kW-yr της επιπρόσθετης παραγωγής και μεταφοράς, που απαιτείται για την τροφοδότηση της ισχύος που αντιστοιχεί στις απώλειες, συμπεριλαμβανομένου και του κόστους χρηματοδότησης της επένδυσης. Το κόστος της παραγωγικής ικανότητας υπολογίζεται ως εξής:

$$LIC = (GIC) \cdot (FCRG) + (SIC) \cdot (FCRS) \quad (5.17)$$

όπου GIC είναι το κόστος ισχύος παραγωγής (€/kW), SIC είναι το κόστος εγκατάστασης συστήματος μεταφοράς (€/kW), $FCRG$ είναι ο συντελεστής ετήσιου κόστους της επένδυσης των εγκαταστάσεων παραγωγής, $FCRS$ είναι ο συντελεστής ετήσιου κόστους της επένδυσης για το σύστημα μεταφοράς, $(GIC) \cdot (FCRG)$ είναι το κανονικοποιημένο κόστος εγκατάστασης παραγωγής (€/kW- yr) και $(SIC) \cdot (FCRS) = LSIC$ είναι το κανονικοποιημένο κόστος εγκατάστασης συστήματος μεταφοράς.

5.9.14 Κανονικοποιημένο Κόστος Ενέργειας και Μέθοδος Κανονικοποίησης του Κόστους

Το κανονικοποιημένο κόστος ενέργειας χωρίζεται στις συνιστώσες $LECN$ για λειτουργία εν κενώ (€/kW- yr) και $LECL$ για λειτουργία υπό φορτίο (€/kW- yr).

Η μέθοδος κανονικοποίησης του κόστους ενέργειας αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

Αρχικά, είναι γνωστό το παρόν ετήσιο κόστος ενέργειας σε €/kWh και ο συντελεστής αύξησής του ανά έτος, ο οποίος μπορεί να είναι σταθερός ή μεταβλητός (στην παρούσα εργασία θεωρείται σταθερός ρυθμός αύξησης). Συνεπώς, δημιουργείται μια λίστα με τα προσαυξημένα ετήσια κόστη της ενέργειας κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή.

Στο δεύτερο βήμα, ανάγονται τα ετήσια αυτά κόστη σε παρούσα αξία πολλαπλασιάζοντάς με τον κατάλληλο συντελεστή παρούσας αξίας (PWF). Ο συντελεστής παρούσας αξίας εμπεριέχει το επιτόκιο που χρησιμοποιεί ο αγοραστής. Με αυτό τον τρόπο λαμβάνεται η παρούσα αξία του κόστους ενέργειας κάθε χρόνου σε €/kWh ($PWEC$).

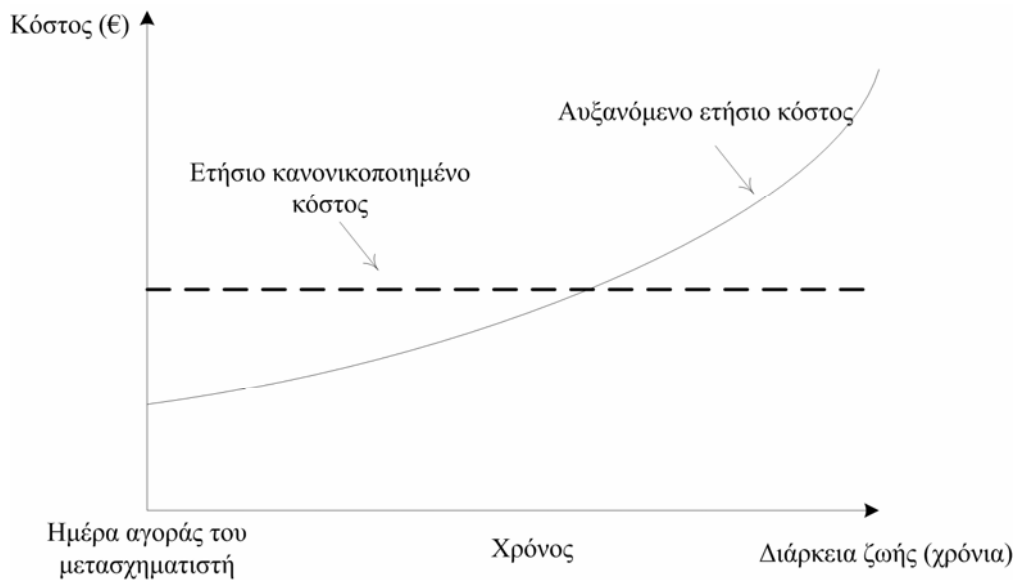
Στο τρίτο βήμα, αθροίζονται αυτά τα ποσά για όλα τα χρόνια, οπότε λαμβάνεται το άθροισμα της παρούσας αξίας του κόστους της ενέργειας σε €/kWh για όλη τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή ($SPWECH$).

Στο τέταρτο βήμα, πολλαπλασιάζεται το $SPWECH$ με 8760 ώρες (ή με τις ώρες που αναμένεται να λειτουργεί ο μετασχηματιστής το χρόνο, δηλαδή με το γινόμενο $8760 \cdot AF$), για να ληφθεί το άθροισμα της παρούσας αξίας του κόστους της ενέργειας σε €/kW-yr για όλη τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή ($SPWECY$).

Πολλαπλασιάζοντας το $SPWECY$ με το CRF λαμβάνεται το κανονικοποιημένο ετήσιο κόστος της ενέργειας για τις απώλειες κενού ($LECN$) το οποίο εκφράζεται σε €/kW-yr. Ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου (CRF) υπολογίζεται από την εξίσωση (5.16).

Να σημειωθεί ότι το τέταρτο βήμα αναφέρεται στον υπολογισμό του κανονικοποιημένου ετήσιου κόστους της ενέργειας για τις απώλειες κενού. Αν ακολουθηθεί η ίδια διαδικασία για τις απώλειες φορτίου το $SPWECH$ θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί με 8760 h/yr για να προκύψει το $SPWECY$. Στον υπολογισμό του κανονικοποιημένου ετήσιου κόστους της ενέργειας για τις απώλειες φορτίου ($LECL$) δεν χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί μειωμένος αριθμός ωρών γιατί ο TLF το λαμβάνει υπόψη του.

Η λογική της κανονικοποίησης φαίνεται στο Σχήμα 5.17, όπου απεικονίζονται τα αυξανόμενα ετήσια κόστη για μία χρονική περίοδο και το σταθερό κανονικοποιημένο κόστος (ευθεία, διακεκομμένη γραμμή) που υπολογίζεται από την παραπάνω διαδικασία.



Σχήμα 5.17 Ετήσιο κανονικοποιημένο κόστος.

5.9.15 Ετήσιος Ρυθμός Ανάπτυξης της Αιχμής του Φορτίου του Μετασχηματιστή

Στην αξιολόγηση των μετασχηματιστών χρησιμοποιείται η μεταβλητή $TPLIF$ που είναι ο ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης της αιχμής του φορτίου του μετασχηματιστή, η μεταβλητή ITL_{TPL} που είναι η αρχική αιχμή του φορτίου του μετασχηματιστή (% της ονομαστικής του ικανότητας) και ο συντελεστής FTL_{TPL} που είναι η αιχμή φορτίου για αντικατάσταση του μετασχηματιστή (% της ονομαστικής του ικανότητας).

5.10 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΧΩΡΙΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ

Οι ηλεκτρικές εταιρίες προμηθεύονται μετασχηματιστές με βάση το κριτήριο του συνολικού κόστους κατοχής [5.1]. Ανάμεσα σε εναλλακτικές προσφορές, πιο συμφέρουσα είναι η προμήθεια των μετασχηματιστών με το μικρότερο συνολικό κόστος κατοχής, συνυπολογίζοντας το κόστος των απωλειών με την τιμή πώλησης των μετασχηματιστών. Ωστόσο, οι περισσότεροι βιομηχανικοί και εμπορικοί χρήστες δεν αξιολογούν τις απώλειες των μετασχηματιστών. Ο λόγος είναι ότι προμηθεύονται μετασχηματιστές σε μικρές ποσότητες και επιπλέον δεν αγοράζουν τους μετασχηματιστές απευθείας από τους

κατασκευαστές αλλά μέσω αντιπροσώπων τους. Οι βιομηχανικοί χρήστες μπορούν, αντί να μελετούν διεξοδικά όλες τις παραμέτρους κόστους των απωλειών των μετασχηματιστών (όπως κάνουν οι ηλεκτρικές εταιρίες), να χρησιμοποιούν μία περισσότερο απλή αλλά αποδοτική προσέγγιση μέσω της ζήτησης ενέργειας και του ποσού με το οποίο η ηλεκτρική εταιρία τους χρεώνει την ενέργεια. Η δυσκολία της μεθόδου αυτής έγκειται στην πρόβλεψη της τιμής με την οποία η ηλεκτρική εταιρία θα τους χρεώνει την ενέργεια στο μέλλον.

5.10.1 Υπολογισμός Κόστους Απωλειών και Συνολικού Κόστους Κατοχής Χωρίς Περιβαλλοντικό Κόστος

Μια από τις δημοφιλέστερες μεθοδολογίες οικονομικής αξιολόγησης των μετασχηματιστών είναι η μέθοδος του συνολικού κόστους κατοχής (*Total Owning Cost - TOC*), η οποία αναπτύχθηκε το 1981 ως μια βιομηχανική τυποποίηση [5.1]. Η συγκεκριμένη τεχνική εφοδιάζει τον υποψήφιο αγοραστή μετασχηματιστών με ένα εργαλείο ικανό να συγκρίνει μια σειρά από διαφορετικές προσφορές μετασχηματιστών. Ο μετασχηματιστής που ικανοποιεί τις τεχνικές προδιαγραφές που έχει θέσει ο υποψήφιος αγοραστής μετασχηματιστών και έχει το μικρότερο συνολικό κόστος κατοχής αποτελεί την επικρατέστερη (οικονομικά) καλύτερη λύση. Με άλλα λόγια, οι ηλεκτρικές εταιρίες προμηθεύονται τους μετασχηματιστές με βάση το κριτήριο του συνολικού κόστους κατοχής, στο οποίο συνυπολογίζονται το κόστος αγοράς καθώς και το κόστος λειτουργίας του μετασχηματιστή. Το συνολικό κόστος κατοχής (*TOC* σε €) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$TOC = BP + CL \quad (5.18)$$

όπου BP (€) είναι η τιμή αγοράς του μετασχηματιστή από την ηλεκτρική εταιρία και CL (€) είναι το κόστος των απωλειών του μετασχηματιστή κατά τη διάρκεια χρήσης του, οι οποίες απώλειες υπολογίζονται ως ακολούθως:

$$CL = C_{NLL} + C_{LL} \quad (5.19)$$

όπου:

$$C_{NLL} = A \cdot NLL \quad (5.20)$$

$$C_{LL} = B \cdot LL \quad (5.21)$$

όπου C_{NLL} (€) είναι το κόστος των απωλειών κενού φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή, C_{LL} (€) είναι το κόστος των απωλειών φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή, NLL (kW) είναι οι απώλειες κενού φορτίου, LL (kW) είναι οι απώλειες φορτίου, A (€/kW) είναι ο συντελεστής απωλειών κενού φορτίου ή η αξία των απωλειών κενού φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή και B (€/kW) είναι ο συντελεστής απωλειών φορτίου ή η αξία των απωλειών φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή.

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (5.18)-(5.21), η θεμελιώδης εξίσωση του συνολικού κόστους κατοχής προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$TOC = BP + A \cdot NLL + B \cdot LL \quad (5.22)$$

Ο προσδιορισμός των συντελεστών A και B περιλαμβάνει πολλούς οικονομικούς και τεχνικούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα επιτόκιο, κόστος ενέργειας, κόστος παραγωγικής ικανότητας, ρυθμός ανάπτυξης της αιχμής του φορτίου, αποδοτική φόρτιση, κτλ. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η τιμή των συντελεστών A και B διαφέρει από ηλεκτρική εταιρία σε ηλεκτρική εταιρία. Ανάμεσα σε εναλλακτικές προσφορές, πιο συμφέρουσα είναι η προμήθεια των μετασχηματιστών με το μικρότερο συνολικό κόστος κατοχής και όχι των μετασχηματιστών με τη χαμηλότερη τιμή αγοράς.

5.11 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΛΑΜΒΑΝΟΝΤΑΣ ΥΠΟΨΗ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ

5.11.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα ενότητα εισάγεται το περιβαλλοντικό κόστος στον υπολογισμό του συνολικού κόστους κατοχής κάθε μετασχηματιστή [5.32]. Το κλειδί για τον υπολογισμό του περιβαλλοντικού κόστους και την ενσωμάτωσή του στην εξίσωση του συνολικού κόστους κατοχής, είναι η εύρεση των απωλειών ισχύος, οι οποίες προκύπτουν από την διαφορά μεταξύ των συνολικών απωλειών ισχύος του αξιολογούμενου μετασχηματιστή και των συνολικών απωλειών ισχύος του μετασχηματιστή αναφοράς, όπως επίσης και η εύρεση των συντελεστών του περιβαλλοντικού κόστους λόγω των απωλειών (κενού φορτίου και φορτίου) κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή. Το περιβαλλοντικό κόστος συσχετίζεται με τις εκπομπές διάφορων τύπων αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου, εξαιτίας της καύσης φυσικών καυσίμων, έτσι ώστε να εξισορροπηθούν οι απώλειες των μετασχηματιστών. Η προτεινόμενη μεθοδολογία αποτελεί επέκταση του πρότυπου ANSI/IEEE C57.120-1991 [5.25]. Η διερεύνηση ξεκίνησε με βάση την κοστολόγηση των απωλειών ενέργειας, οι οποίες προκύπτουν από την διαφορά μεταξύ των συνολικών απωλειών ενέργειας του αξιολογούμενου μετασχηματιστή και των συνολικών απωλειών ενέργειας του μετασχηματιστή αναφοράς, [5.23][5.24]. Λόγω της πολυπλοκότητας που υπεισέρχεται στους υπολογισμούς ενέργειας και για να υπάρξει εναρμόνιση με τη μεθοδολογία συντελεστών απωλειών που παρουσιάζεται από το ANSI/IEEE C57.120-1991 [5.25], η εξαγωγή του προτεινόμενου μοντέλου κοστολόγησης βελτιώθηκε και κατέληξε στο οικονομικό μοντέλο που παρουσιάζεται στη συνέχεια.

5.11.2 Συνολικό Κόστος Κατοχής με Περιβαλλοντικό Κόστος

Ο αντικειμενικός στόχος του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι ο επανακαθορισμός της μεθόδου του συνολικού κόστους κατοχής, αποτιμώντας όχι μόνο το κόστος των απωλειών αλλά και το περιβαλλοντικό κόστος. Συνεπώς, προτείνεται η διεύρυνση του προτύπου ANSI/IEEE C57.120-1991 [5.25], εισάγοντας κατάλληλη παράμετρο περιβαλλοντικού κόστους στην εξίσωση (5.22) του συνολικού κόστους κατοχής, οδηγώντας στην παρακάτω εξίσωση:

$$TOC_e = TOC + EC \quad (5.23)$$

όπου EC είναι το περιβαλλοντικό κόστος εξαιτίας των απωλειών του μετασχηματιστή κατά τη διάρκεια ζωής του (σε €), το οποίο προκύπτει σύμφωνα με τις απώλειές του και το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$EC = EC_{NLL} + EC_{LL} \quad (5.24)$$

όπου:

$$EC_{NLL} = A_e \cdot \Delta P_{NLL} \quad (5.25)$$

$$EC_{LL} = B_e \cdot \Delta P_{LL} \quad (5.26)$$

όπου EC_{NLL} είναι το περιβαλλοντικό κόστος λόγω των απωλειών κενού φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή (σε €), EC_{LL} είναι το περιβαλλοντικό κόστος λόγω των απωλειών φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή (σε €), A_e είναι ο συντελεστής περιβαλλοντικού κόστους λόγω των απωλειών κενού φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή (σε €/kW), B_e είναι ο συντελεστής περιβαλλοντικού κόστους λόγω των απωλειών φορτίου κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή (σε €/kW), ΔP_{NLL} είναι η διαφορά απωλειών κενού φορτίου μεταξύ του αξιολογούμενου μετασχηματιστή και του μετασχηματιστή αναφοράς (σε kW) και ΔP_{LL} είναι η διαφορά απωλειών φορτίου μεταξύ του αξιολογούμενου μετασχηματιστή και του μετασχηματιστή αναφοράς (σε kW). Η επιλογή του

μετασχηματιστή αναφοράς αποτελεί σημείο κλειδί στην προτεινόμενη μεθοδολογία, του οποίου η σημαντικότητα τονίζεται παρακάτω.

Συνδυάζοντας τις (5.22) έως (5.26), το προτεινόμενο συνολικό κόστος κατοχής συμπεριλαμβανομένου και του περιβαλλοντικού κόστους, TOC_e , είναι το ακόλουθο:

$$TOC_e = BP + A \cdot NLL + B \cdot LL + A_e \cdot \Delta P_{NLL} + B_e \cdot \Delta P_{LL} \quad (5.27)$$

Οι συντελεστές απωλειών A και B υπολογίζονται σύμφωνα με τις εξισώσεις (5.28) και (5.29), αντίστοιχα. Οι συντελεστές περιβαλλοντικού κόστους A_e και B_e υπολογίζονται σύμφωνα με τις εξισώσεις (5.39) και (5.40), αντίστοιχα. Η διαφορά απωλειών μεταξύ του αξιολογούμενου μετασχηματιστή και του μετασχηματιστή αναφοράς ΔP_{NLL} και ΔP_{LL} υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (5.37) και (5.38), αντίστοιχα.

Συνεπώς, ο οικονομικότερος και αποδοτικότερος μετασχηματιστής διανομής είναι εκείνος που διαθέτει το μικρότερο συνολικό κόστος κατοχής συμπεριλαμβανομένου και του περιβαλλοντικού κόστους (TOC_e).

5.11.3 Υπολογισμός των Συντελεστών Κόστους Απωλειών A και B

Ο συντελεστής απωλειών κενού φορτίου ή συντελεστής A υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$A = \frac{LIC + LECN}{ET \cdot FCR \cdot IF} \quad (5.28)$$

Ο συντελεστής απωλειών φορτίου ή συντελεστής B υπολογίζεται από τη σχέση:

$$B = \frac{LIC \cdot PRF^2 \cdot PUL^2 + LECL \cdot TLF^2}{ET \cdot FCR \cdot IF} \quad (5.29)$$

όπου LIC είναι το κόστος της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος (σε €/kW-yr), $LECN$ είναι το κανονικοποιημένο κόστος ενέργειας για λειτουργία εν κενώ (σε €/kW-yr), ET είναι ο βαθμός απόδοσης του μετασχηματιστή, FCR είναι ο συντελεστής ετήσιου κόστους της επένδυσης για τους μετασχηματιστές, IF είναι ο συντελεστής προσαύξησης, PRF είναι ο συντελεστής ευθύνης, PUL είναι η ετήσια ισοδύναμη αιχμή φορτίου, $LECL$ είναι το κανονικοποιημένο κόστος ενέργειας για λειτουργία υπό φορτίο (εκφρασμένο σε €/kW-yr) και TLF είναι ο συντελεστής φόρτισης.

Τα κανονικοποιημένα κόστη $LECN$ και $LECL$ υπολογίζονται ως εξής:

$$LECN = CRF \cdot HPY \cdot AF \cdot \sum_{j=1}^{BL} CYEC \cdot \frac{(1 + EIR)^j}{(1 + d)^j} \quad (5.30)$$

$$LECL = CRF \cdot HPY \cdot \sum_{j=1}^{BL} CYEC \cdot \frac{(1 + EIR)^j}{(1 + d)^j} \quad (5.31)$$

όπου CRF είναι ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου υπολογιζόμενος σύμφωνα με την εξίσωση (5.16), HPY είναι οι ώρες λειτουργίας του μετασχηματιστή (τυπικά 8760 ώρες), AF είναι συντελεστής διαθεσιμότητας, BL είναι τα χρόνια λειτουργίας του μετασχηματιστή, EIR είναι ο ετήσιος ρυθμός αύξησης του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας (σε %), d είναι το προεξοφλητικό επιτόκιο (επιτόκιο) (σε %), και $CYEC$ είναι το τρέχον ετήσιο κόστος της ενέργειας (€/kWh). Πρέπει να αναφερθεί ότι ως τρέχον έτος (έτος 0) ορίζεται το έτος πριν από το πρώτο χρόνο της λειτουργίας του μετασχηματιστή.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι:

$$\sum_{j=1}^{BL} \frac{(1 + EIR)^j}{(1 + d)^j} = \left(\frac{1 + EIR}{d - EIR} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{1 + EIR}{1 + d} \right)^{BL} \right], \quad (5.32)$$

οι εξισώσεις (5.30) και (5.31) μπορούν να απλοποιηθούν περαιτέρω:

$$LECN = CRF \cdot HPY \cdot AF \cdot CYEC \cdot \left(\frac{1+EIR}{d-EIR} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{1+EIR}{1+d} \right)^{BL} \right] \quad (5.33)$$

$$LECL = CRF \cdot HPY \cdot CYEC \cdot \left(\frac{1+EIR}{d-EIR} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{1+EIR}{1+d} \right)^{BL} \right] \quad (5.34)$$

Ο συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου CRF προκύπτει από την εξίσωση (5.16), η ετήσια ισοδύναμη αιχμή φορτίου (PUL) προκύπτει από την (5.12), ο συντελεστής φόρτισης (TLF) προκύπτει από την (5.15) ενώ ο ετήσιος συντελεστής απωλειών (LF) προκύπτει από την (5.14).

5.11.4 Υπολογισμός των Συντελεστών Περιβαλλοντικού Κόστους A_e και B_e

Για τον υπολογισμό των συντελεστών περιβαλλοντικού κόστους A_e και B_e , απαιτούνται τα ακόλουθα τέσσερα βήματα: 1) υπολογισμός του τρέχοντος ετήσιου συντελεστή κόστους των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου C , 2) καθορισμός του μετασχηματιστή αναφοράς, 3) υπολογισμός της διαφοράς απωλειών μεταξύ του αξιολογούμενου μετασχηματιστή και του μετασχηματιστή αναφοράς, και 4) υπολογισμός των συντελεστών περιβαλλοντικού κόστους A_e και B_e .

1^ο βήμα: Υπολογισμός του τρέχοντος ετήσιου συντελεστή κόστους των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου

Σε αυτή την υποενότητα παρουσιάζεται η μεθοδολογία υπολογισμού του τρέχοντος ετήσιου συντελεστή κόστους των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου C εξαιτίας της επιπρόσθετης ενέργειας που απαιτείται να παραχθεί ώστε να καλυφθούν οι απώλειες του μετασχηματιστή. Ο ετήσιος συντελεστής κόστους των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου C (σε €/MWh) υπολογίζεται ως εξής:

$$C = C_{cy} \cdot \sum_{i=1}^N f_i \cdot e_i \quad (5.35)$$

όπου C_{cy} είναι το ετήσιο κόστος εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (σε €/t_{CO₂}), t_{CO_2} δηλώνει τους ισοδύναμους τόνους εκπομπών CO₂, e_i είναι ο συντελεστής εκπομπών (σε t_{CO₂}/MWh) για κάθε τύπο καυσίμου i , f_i είναι το ποσοστό συμμετοχής του κάθε τύπου καυσίμου (σε %) και N είναι το σύνολο των διαφορετικών καυσίμων που συμμετέχουν στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Αναλυτικότερα, το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), το μεθάνιο (CH₄) και το υποξείδιο του αζώτου (N₂O) είναι τα τρία κύρια αέρια που συμμετέχουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, όπως φάνηκε στην ενότητα 5.5. Σύμφωνα με τον τύπο του καυσίμου (όπως για παράδειγμα λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, αιολική ενέργεια, πυρηνική ενέργεια, ηλιακή ενέργεια, προπάνιο, γεωθερμική ενέργεια), οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου μετατρέπονται σε ισοδύναμες εκπομπές CO₂ (σε t_{CO₂}). Ο συντελεστής εκπομπών κάθε τύπου καυσίμου, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$e_i = (e_{CO_2,i} + e_{CH_4,i} \cdot 21 + e_{N_2O,i} \cdot 310) \cdot \frac{0.0036}{n_i \cdot (1 - \lambda_i)} \quad (5.36)$$

όπου e_i είναι ο συντελεστής εκπομπής (σε t_{CO₂}/MWh) του κάθε τύπου καυσίμου i , $e_{CO_2,i}$ είναι ο συντελεστής εκπομπής CO₂ του κάθε τύπου καυσίμου i (σε kg/GJ), $e_{CH_4,i}$ είναι ο συντελεστής εκπομπής CH₄ του κάθε τύπου καυσίμου i (σε kg/GJ), $e_{N_2O,i}$ είναι ο συντελεστής εκπομπής N₂O του κάθε τύπου καυσίμου i (σε kg/GJ), n_i είναι ο βαθμός απόδοσης κάθε καυσίμου i (σε %), και λ_i είναι οι απώλειες μεταφοράς και διανομής κάθε

τύπου καυσίμου i (σε %). Ο συντελεστής 0.0036 στην εξίσωση (5.36) χρησιμοποιήθηκε για τη μετατροπή του kg/GJ σε t/MWh.

Επίσης, μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό από τη σχέση (5.36) και την ενότητα 5.5.2 ότι ο συντελεστής εκπομπής του CH_4 και του N_2O μετατρέπονται σε ισοδύναμη εκπομπή CO_2 πολλαπλασιάζοντας κάθε όρο με 21 και 310, αντίστοιχα (αυτές οι τιμές ορίζονται από την αναφορά [5.17]). Συνεπώς, το CH_4 είναι 21 φορές πιο ισχυρό αέριο θερμοκηπίου από το CO_2 , και το N_2O είναι 310 φορές πιο ισχυρό αέριο θερμοκηπίου από το CO_2 .

2^ο βήμα: Καθορισμός του μετασχηματιστή αναφοράς

Ο σωστός καθορισμός του μετασχηματιστή αναφοράς, δηλαδή ενός μετασχηματιστή με απώλειες αναφοράς κενού φορτίου NLL_r (σε kW) και απώλειες αναφοράς φορτίου LL_r (σε kW), είναι εξαιρετικά σημαντικός διότι οι NLL_r και LL_r αποτελούν απαραίτητες μεταβλητές για τον υπολογισμό των ΔP_{NLL} και ΔP_{LL} (εξισώσεις (5.37) και (5.38) αντίστοιχα), τα οποία εμπλέκονται στην προτεινόμενη εξίσωση του συνολικού κόστους κατοχής με περιβαλλοντικό κόστος (εξίσωση (5.27)). Η επιλογή του μετασχηματιστή αναφοράς και των αντίστοιχων απωλειών του βασίζεται στη συμβολή των απωλειών του μετασχηματιστή της εκάστοτε ηλεκτρικής εταιρίας στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και από την ευθύνη των μετασχηματιστών στην παραβίαση των μέγιστων επιτρεπτών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που επιβάλλονται από διεθνή πρότυπα ή πρωτόκολλα που αφορούν τους εσωτερικούς κανονισμούς κάθε χώρας.

3^ο βήμα: Υπολογισμός της διαφοράς απωλειών μεταξύ του αξιολογούμενου μετασχηματιστή και του μετασχηματιστή αναφοράς

Οι απώλειες κενού φορτίου και φορτίου του αξιολογούμενου μετασχηματιστή NLL και LL (σε kW), αντίστοιχα, δίνονται από το κατασκευαστή μετασχηματιστών. Αντίθετα, οι απώλειες κενού φορτίου και φορτίου του μετασχηματιστή αναφοράς NLL_r και LL_r (σε kW), αντίστοιχα, δίνονται από την ηλεκτρική εταιρία.

Η διαφορά απωλειών κενού φορτίου ΔP_{NLL} μεταξύ του αξιολογούμενου μετασχηματιστή και του μετασχηματιστή αναφοράς (σε kW) και η διαφορά απωλειών φορτίου ΔP_{LL} μεταξύ του αξιολογούμενου μετασχηματιστή και του μετασχηματιστή αναφοράς (σε kW) υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις:

$$\Delta P_{NLL} = NLL - NLL_r \quad (5.37)$$

$$\Delta P_{LL} = LL - LL_r \quad (5.38)$$

Είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι εάν $\Delta P_{NLL} > 0$, δηλαδή εάν $NLL > NLL_r$, όπως η εξίσωση (5.37) υποδηλώνει, δηλαδή εάν οι απώλειες κενού φορτίου του αξιολογούμενου μετασχηματιστή είναι μεγαλύτερες από τις απώλειες κενού φορτίου του μετασχηματιστή αναφοράς, τότε επειδή το A_e είναι πάντα θετικά ορισμένο όπως συνεπάγεται από την (5.39), η ποσότητα $A_e \cdot \Delta P_{NLL}$ που προστίθεται στην εξίσωση του TOC_e (5.27) είναι θετική, αυξάνοντας την τελική αξία του TOC_e . Συνεπώς, σε αυτή την περίπτωση, υπάρχει μερική αρνητική επιρροή στην απόφαση αγοράς από το συγκεκριμένο κατασκευαστή μετασχηματιστών. Αντίθετα, εάν $\Delta P_{NLL} < 0$, δηλαδή εάν οι απώλειες κενού φορτίου του αξιολογούμενου μετασχηματιστή είναι μικρότερες από τις απώλειες κενού φορτίου του μετασχηματιστή αναφοράς, τότε η ποσότητα $A_e \cdot \Delta P_{NLL}$ που προστίθεται στην εξίσωση του TOC_e (5.27) είναι αρνητική, μειώνοντας την τελική αξία του TOC_e . Συνεπώς, σε αυτήν την περίπτωση, υπάρχει μερική θετική επιρροή στην απόφαση αγοράς από το συγκεκριμένο κατασκευαστή μετασχηματιστών. Όμοια συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν για την ποσότητα $B_e \cdot \Delta P_{LL}$ όταν αυτή λαμβάνει θετικές ή αρνητικές τιμές.

4^ο βήμα: Υπολογισμός των συντελεστών περιβαλλοντικού κόστους A_e και B_e

Οι συντελεστές περιβαλλοντικού κόστους A_e και B_e υπολογίζονται από τις εξισώσεις:

$$A_e = \frac{LECN_e}{ET \cdot FCR \cdot IF} \quad (5.39)$$

$$B_e = \frac{LECL_e \cdot TLF^2}{ET \cdot FCR \cdot IF} \quad (5.40)$$

όπου $LECN_e$ είναι το κανονικοποιημένο περιβαλλοντικό κόστος ενέργειας για λειτουργία εν κενώ (σε €/kW-yr), $LECL_e$ είναι το κανονικοποιημένο περιβαλλοντικό κόστος ενέργειας για λειτουργία υπό φορτίο (σε €/kW-yr), τα οποία υπολογίζονται ως εξής:

$$LECN_e = CRF \cdot HPY \cdot AF \cdot \sum_{j=1}^{BL} C \cdot \frac{(1 + EIR_e)^j}{(1 + d)^j} \quad (5.41)$$

$$LECL_e = CRF \cdot HPY \cdot \sum_{j=1}^{BL} C \cdot \frac{(1 + EIR_e)^j}{(1 + d)^j} \quad (5.42)$$

όπου EIR_e είναι ο ετήσιος ρυθμός αύξησης του περιβαλλοντικού κόστους (σε %) του τρέχοντος έτους C_{cy} .

Οι εξισώσεις (5.41) και (5.42) μπορούν να απλοποιηθούν και να προκύψουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$LECN_e = CRF \cdot HPY \cdot AF \cdot C \cdot \left(\frac{1 + EIR_e}{d - EIR_e} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{1 + EIR_e}{1 + d} \right)^{BL} \right] \quad (5.43)$$

$$LECL_e = CRF \cdot HPY \cdot C \cdot \left(\frac{1 + EIR_e}{d - EIR_e} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{1 + EIR_e}{1 + d} \right)^{BL} \right] \quad (5.44)$$

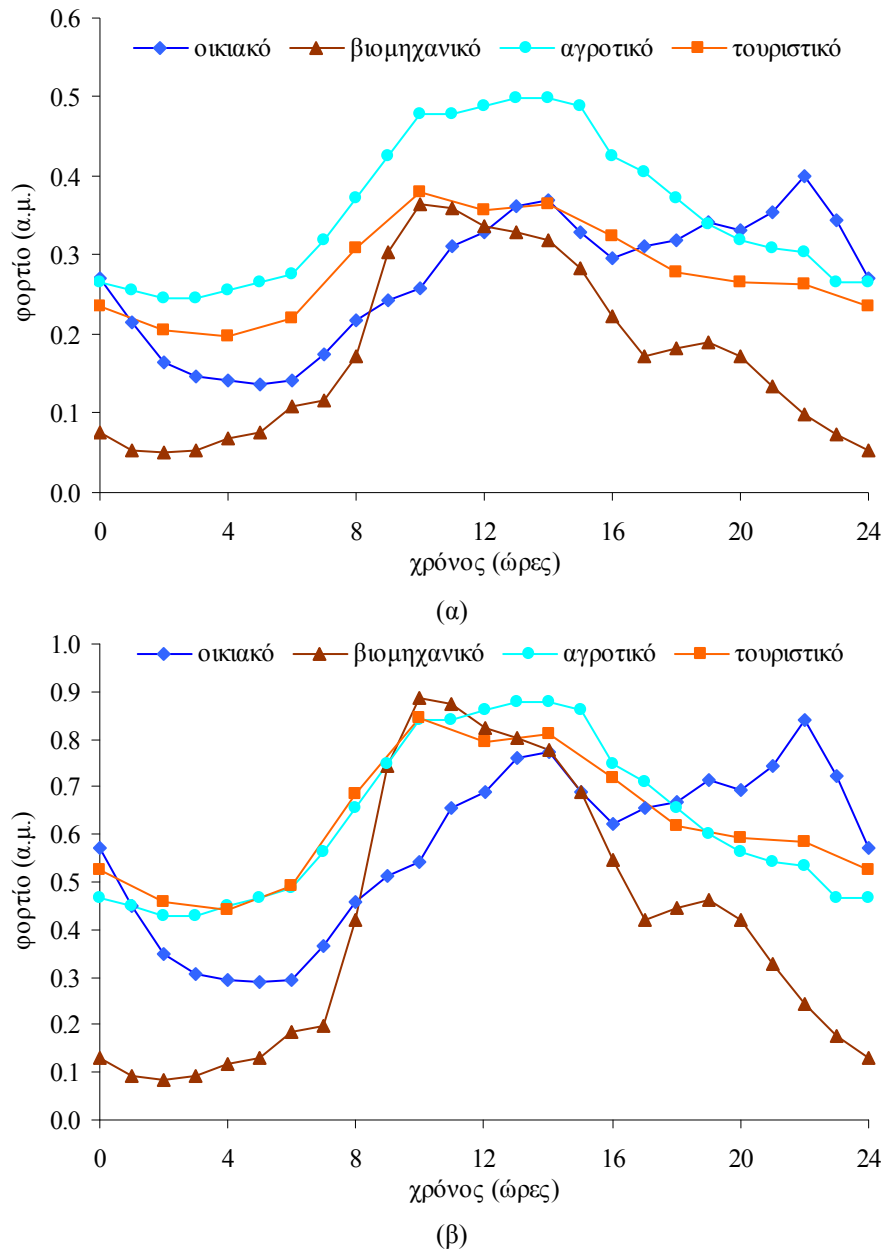
5.12 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.12.1 Εισαγωγή

Η προτεινόμενη μεθοδολογία οικονομικής αξιολόγησης μετασχηματιστών λαμβάνοντας υπόψη το περιβαλλοντικό κόστος εφαρμόζεται σε τρεις διαφορετικές σχεδιάσεις μετασχηματιστών (Πίνακας 5.7). Οι μετασχηματιστές προσφοράς συμβολίζονται ως D1, D2, D3, οι οποίες αντιστοιχούν στο μοντέλο 1, μοντέλο 2 και μοντέλο 3. Οι συγκεκριμένες σχεδιάσεις αποτελούν προσφορές τριών διαφορετικών κατασκευαστών, οι οποίες αντιστοιχούν σε τριφασικούς μετασχηματιστές διανομής λαδιού, με συχνότητα 50 Hz και ονομαστική ισχύ 1000 kVA. Επίσης, χρησιμοποιούνται τέσσερις τυπικές καμπύλες φορτίου δικτύου διανομής στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο και μη διασυνδεδεμένο σύστημα, οι οποίες αφορούν τον οικιακό, βιομηχανικό, αγροτικό και τουριστικό τύπο φορτίου (Σχήμα 5.18).

Πίνακας 5.7 Τρεις διαφορετικές προσφορές μετασχηματιστών με ισχύ 1000 kVA.

Μετασχηματιστής προσφοράς	Κατηγορία CENELEC [5.2]	Τιμή προσφοράς (€)	Απώλειες κενού φορτίου (kW)	Απώλειες φορτίου (kW)
D1	BA'	22594	1.7	13.0
D2	AB'	23493	1.4	10.5
D3	CC'	25621	1.1	9.5



Σχήμα 5.18 Τυπικές καμπύλες φορτίου μετασχηματιστή δικτύου διανομής στην Ελλάδα για τέσσερα διαφορετικά είδη φορτίου, τα οποία αφορούν τον οικιακό, βιομηχανικό, αγροτικό και τουριστικό τύπο φορτίου (τα τρία πρώτα βρίσκονται στο διασυνδεδεμένο σύστημα ενώ το τέταρτο βρίσκεται σε αυτόνομο νησιωτικό σύστημα): (α) τυπικές καμπύλες των φορτίων στην αρχή της μελέτης (έτος 0) και (β) τυπικές καμπύλες των φορτίων στο τέλος της διάρκειας ζωής του μετασχηματιστή (έτος 30).

5.12.2 Οικονομική Αξιολόγηση χωρίς Θεώρηση Περιβαλλοντικού Κόστους

Η οικονομική αξιολόγηση πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη την καμπύλη φόρτισης του μετασχηματιστή που αντιστοιχεί στον οικιακό καταναλωτή του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος (Σχήμα 5.18). Ο Πίνακας 5.8 παρουσιάζει τα 14 δεδομένα εισόδου για τον υπολογισμό των συντελεστών απωλειών A και B και υπολογίζεται ότι $A = 8583 \text{ €/kW}$ και $B = 1341.7 \text{ €/kW}$.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του συνολικού κόστους κατοχής TOC για τις τρεις διαφορετικές προσφορές (Πίνακας 5.9), χωρίς τη θεώρηση του περιβαλλοντικού κόστους. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα βασίζονται στους προαναφερθέντες συντελεστές απωλειών A και B (Πίνακας 5.8) καθώς επίσης και στην τιμή προσφοράς και απωλειών του

κάθε μετασχηματιστή όπως αυτά τα παρουσιάζει ο Πίνακας 5.7, εφαρμόζοντας την εξίσωση του συνολικού κόστους κατοχής *TOC* (5.22).

Ο Πίνακας 5.9 αποδεικνύει ότι παρά το γεγονός ότι η σχεδίαση του μετασχηματιστή D1 αποτελεί τη φθηνότερη περίπτωση όσον αφορά την τιμή προσφοράς, μακροπρόθεσμα η συγκεκριμένη σχεδίαση αποτελεί τη χειρότερη επένδυση έχοντας το υψηλότερο κόστος κατοχής *TOC*. Αντιθέτως, είναι εύκολα αντιληπτό ότι η σχεδίαση του μετασχηματιστή D3 αποτελεί την καλύτερη επένδυση μακροπρόθεσμα, εφόσον διαθέτει το χαμηλότερο κόστος κατοχής *TOC*. Επομένως, παρά το γεγονός ότι η τιμή προσφοράς του D1 είναι 11.8% φθηνότερη από την τιμή προσφοράς του D3, το συνολικό κόστος κατοχής *TOC* του D1 είναι 14.3% ακριβότερο από το συνολικό κόστος κατοχής *TOC* του D3 (Πίνακας 5.9) κατά τη διάρκεια των 30 ετών λειτουργίας του μετασχηματιστή. Η συγκεκριμένη διαφορά ανάμεσα στα δύο *TOC* του D1 και του D3 αποδίδεται στη διαφορά του κόστους των απωλειών τους, όπως δείχνει ο Πίνακας 5.9. Συμπερασματικά, η ενσωμάτωση του κόστους των απωλειών είναι μείζονος σημασίας στην οικονομική αξιολόγηση των μετασχηματιστών.

Πίνακας 5.8 Δεδομένα εισόδου για τον υπολογισμό των συντελεστών απωλειών *A* και *B*, για την καμπύλη φόρτισης του οικιακού καταναλωτή στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα.

	<i>Σύμβολο</i>	<i>Τιμή</i>	<i>Μονάδα</i>	<i>Σχόλιο</i>		<i>Σύμβολο</i>	<i>Τιμή</i>	<i>Μονάδα</i>	<i>Σχόλιο</i>
ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ	<i>AF</i>	0.97	-	-		<i>ITL_{TPL}</i>	0.40	-	-
	<i>HPY</i>	8760	h/yr	-		<i>TPLIF</i>	0.025	-	-
	<i>BL</i>	30	Έτη	-		<i>PRF</i>	0.369	-	-
	<i>CYEC</i>	0.054	€/kWh	-		<i>lf</i>	0.678	-	-
	<i>EIR</i>	0.027	ανά έτος	-		<i>IF</i>	1	-	-
	<i>FCR</i>	0.0931	€/€/yr	-		<i>ET</i>	0.95	-	-
	<i>d</i>	0.085	ανά έτος	-		<i>LIC</i>	150	€/kW-yr	-
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	<i>CRF</i>	0.0931	-	εξ. (5.16)		<i>LECN</i>	608.74	€/kW-yr	εξ. (5.33)
	<i>LF</i>	0.4924	-	εξ. (5.14)		<i>LECL</i>	627.56	€/kW-yr	εξ. (5.34)
	<i>PUL</i>	0.60	-	εξ. (5.12)		<i>A</i>	8583.0	€/kW	εξ. (5.28)
	<i>TLF</i>	0.4210	-	εξ. (5.15)		<i>B</i>	1341.7	€/kW	εξ. (5.29)

Πίνακας 5.9 Υπολογισμός του συνολικού κόστους κατοχής χωρίς θεώρηση περιβαλλοντικού κόστους για τις τρεις προσφορές των μετασχηματιστών (Μ/Σ) (Πίνακας 5.7) βάσει της καμπύλης φορτίου του οικιακού καταναλωτή στο Ελληνικό διασυνδεδεμένου σύστημα (*A* = 8583 €/kW και *B* = 1341.7 €/kW (Πίνακας 5.8)).

<i>Μετασχηματιστής προσφοράς</i>	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D3</i>	<i>Σχόλιο</i>
<i>BP</i> (€)	22594	23493	25621	Πίνακας 5.7
<i>NLL</i> (kW)	1.7	1.4	1.1	Πίνακας 5.7
<i>LL</i> (kW)	13	10.5	9.5	Πίνακας 5.7
<i>C_{NLL}</i> (€)	14591	12016	9441	εξ. (5.20)
<i>C_{LL}</i> (€)	17442	14088	12746	εξ. (5.21)
<i>CL</i> (€)	32033	26104	22187	εξ. (5.19)
<i>TOC</i> (€)	54627	49597	47809	εξ. (5.22)
<i>BP / TOC</i> (%)	41.4%	47.4%	53.6%	-
<i>CL / TOC</i> (%)	58.6%	52.6%	46.4%	-

5.12.3 Οικονομική Αξιολόγηση με Θεώρηση Περιβαλλοντικού Κόστους

Χρησιμοποιώντας ως βάση τις μεθοδολογίες που περιγράφονται από το πρότυπο για την εκτίμηση των απωλειών στους μετασχηματιστές [5.25] και εισάγοντας σε αυτές το περιβαλλοντικό κόστος των εκπεμπόμενων ρύπων που αντιστοιχούν στις απώλειές τους, αναπτύχθηκε μεθοδολογία υπολογισμού οικονομικής αξιολόγησής τους [5.32].

Στόχος της συγκεκριμένης εφαρμογής είναι να προτείνει τον οικονομικότερο μετασχηματιστή διανομής ανάμεσα σε υποψήφιους μετασχηματιστές για τέσσερις κατηγορίες καταναλωτών (οικιακός, βιομηχανικός, αγροτικός και τουριστικός καταναλωτής). Χρησιμοποιήθηκε λεπτομερής αναπαράσταση των καμπυλών φόρτισης των εξεταζόμενων καταναλωτών, με βάση τα όσα παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη παράγραφο. Εξετάστηκαν τρεις μετασχηματιστές διανομής (τύπου λαδιού) με την ίδια ονομαστική ισχύ ίση με 1000 kVA αλλά διαφορετικές απώλειες κενού φορτίου και φορτίου (σύμφωνα με τη CENELEC HD 428 [5.2]). Με βάση την καμπύλη φορτίου κάθε καταναλωτή και το περιβαλλοντικό κόστος που αντιστοιχεί στην παραγωγή ενέργειας για την αντιστάθμιση των απωλειών κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή (ανάλογα με το σύστημα στο οποίο εγκαθίσταται, διασυνδεδεμένο ή νησιωτικό), προτείνεται ποιος από τους υποψήφιους μετασχηματιστές αποτελεί την πιο συμφέρουσα λύση.

Η οικονομική αξιολόγηση των τριών μοντέλων προσφοράς (Πίνακας 5.7) έγινε εφαρμόζοντας την προτεινόμενη καινοτομική τεχνική του συνολικού κόστους κατοχής συμπεριλαμβανομένου και του περιβαλλοντικού κόστους, δηλαδή του TOC_e της (5.27).

Σύμφωνα με τα δεδομένα που παραθέτει ο Πίνακας 5.10 και κάνοντας αριθμητική αντικατάσταση στη σχέση (5.36), ο συντελεστής ισοδύναμης εκπομπής CO_2 του λιγνίτη e_i με i να αντιπροσωπεύει τον λιγνίτη, προκύπτει ως εξής:

$$e_{Coal} = [94.6 + (0.002 \cdot 21) + (0.003 \cdot 310)] \cdot \frac{1}{0.35} \cdot \frac{1}{1-0.08} \cdot \frac{3.6}{1000} \Rightarrow GHG_{Coal} = 1.069 t_{CO_2} / MWh$$

Ομοίως, υπολογίζεται ο συντελεστής ισοδύναμης εκπομπής CO_2 και για τα υπόλοιπα είδη καυσίμων, με βάση του οποίου προκύπτει ο Πίνακας 5.10 για το διασυνδεδεμένο σύστημα και ο Πίνακας 5.11 για το νησιωτικό σύστημα.

Επομένως, ο συνολικός συντελεστής ισοδύναμης εκπομπής CO_2 για το διασυνδεδεμένο δίκτυο (e_{i-land}) και το νησιωτικό δίκτυο ($e_{i-island}$) υπολογίζεται ως το άθροισμα των γινομένων των ποσοστών συμμετοχής κάθε καυσίμου επί τον αντίστοιχο συντελεστή ισοδύναμης εκπομπής CO_2 του κάθε καυσίμου:

$$C_{i-land} = 0.698 \cdot 1.069 + 0.076 \cdot 0.975 + 0.15 \cdot 0.491 \Rightarrow C_{eq-land} = 0.894 t_{CO_2} / MWh$$

$$C_{i-island} = 0.984 \cdot 0.975 \Rightarrow C_{eq-island} = 0.96 t_{CO_2} / MWh$$

Σύμφωνα με οδηγία της Ευρωπαϊκής Κοινότητας [5.31][5.33], οι εγκαταστάσεις που εκπέμπουν περισσότερους ρύπους από τους κανονικούς, υπόκεινται στην καταβολή προστίμου για τις κατά υπέρβαση εκπομπές, το οποίο ανέρχεται σε 40 €/ t_{CO_2} για την περίοδο 2005-2007 και σε 100 €/ t_{CO_2} για την περίοδο 2008-2012. Συνεπώς, εάν το κόστος εκπομπής CO_2 (αναφερόμενο και ως τιμή δικαιώματος ρύπων) θεωρηθεί ίσο με 100 €/ t_{CO_2} , τότε η τιμή του συντελεστή περιβαλλοντικού κόστους (C) προκύπτει ίση με 89.4 €/MWh για το διασυνδεδεμένο σύστημα (Πίνακας 5.10) και 96 €/MWh για το νησιωτικό σύστημα (Πίνακας 5.11). Πρέπει να αναφερθεί ότι στο διασυνδεδεμένο σύστημα ανήκει το φορτίο του οικιακού, αγροτικού και βιομηχανικού καταναλωτή, ενώ στο νησιωτικό σύστημα ανήκει το φορτίο του τουριστικού καταναλωτή.

Πίνακας 5.10 Συνολική παραγωγή ρύπων ανά MWh για το διασυνδεδεμένο σύστημα της Ελλάδας.

<i>Καύσιμο</i>	<i>f_i</i> (%)	<i>e_{CO₂,i}</i> (kg/GJ)	<i>e_{CH₄,i}</i> (kg/GJ)	<i>e_{N₂O,i}</i> (kg/GJ)	<i>n_i</i> (%)	<i>λ_i</i> (%)	<i>e_i (5.36)</i> (<i>t_{CO₂}/MWh</i>)
Λιγνίτης	69.8	94.6	0.002	0.003	35.0	8	1.069
Πετρέλαιο	7.6	74.1	0.002	0.002	30.0	8	0.975
Νερό	7.6	0.0	0.000	0.000	100.0	8	0.000
Φυσικό Αέριο	15	56.1	0.003	0.001	45.0	8	0.491
ΑΠΕ	0.03	0.0	0.000	0.000	100.0	8	0.000

$$(5.35) \Rightarrow C_{land} = 100 \frac{\text{euro}}{t_{CO_2}} \cdot \left(\frac{69.77}{100} \cdot 1.069 + \frac{7.6}{100} \cdot 0.975 + \frac{15}{100} \cdot 0.491 \right) \frac{t_{CO_2}}{MWh} = 89.4 \frac{\text{euro}}{MWh}$$

Πίνακας 5.11 Συνολική παραγωγή ρύπων ανά MWh για αυτόνομο νησιωτικό σύστημα της Ελλάδας.

<i>Καύσιμο</i>	<i>f_i</i> (%)	<i>e_{CO₂,i}</i> (kg/GJ)	<i>e_{CH₄,i}</i> (kg/GJ)	<i>e_{N₂O,i}</i> (kg/GJ)	<i>n_i</i> (%)	<i>λ_i</i> (%)	<i>e_i (5.36)</i> (<i>t_{CO₂}/MWh</i>)
Λιγνίτης	0	0.0	0.002	0.003	0.0	8	0.000
Πετρέλαιο	98.4	74.1	0.002	0.002	30.0	8	0.975
Νερό	0	0.0	0.000	0.000	0.0	8	0.000
Φυσικό Αέριο	0	0.0	0.000	0.000	0.0	8	0.000
ΑΠΕ	1.6	0.0	0.000	0.000	100.0	8	0.000

$$(5.35) \Rightarrow C = C_{island} = 100 \frac{\text{euro}}{t_{CO_2}} \cdot \left(\frac{98.4}{100} \cdot 0.975 \right) \frac{t_{CO_2}}{MWh} = 96.0 \frac{\text{euro}}{MWh}$$

Έχοντας υπολογίσει την τιμή του συντελεστή περιβαλλοντικού κόστους, ο Πίνακας 5.12 καταγράφει τα 13 δεδομένα εισόδου για τον υπολογισμό των συντελεστών απωλειών A_e και B_e . Οι συγκεκριμένες τιμές αντιπροσωπεύουν την καμπύλη φόρτισης ενός οικιακού φορτίου, όπου με βάση αυτές υπολογίζεται ότι $A_e = 12522.6$ €/kW και $B_e = 2288.6$ €/kW. Να σημειωθεί ότι το κόστος εκπομπής CO₂ είναι ίσο με $C_{cy}=100$ €/t_{CO₂}.

Πίνακας 5.12 Δεδομένα εισόδου προκειμένου να υπολογιστούν οι συντελεστές περιβαλλοντικού κόστους A_e και B_e , για τον οικιακό καταναλωτή στο διασυνδεδεμένο σύστημα ($C=89.4$ €/MWh).

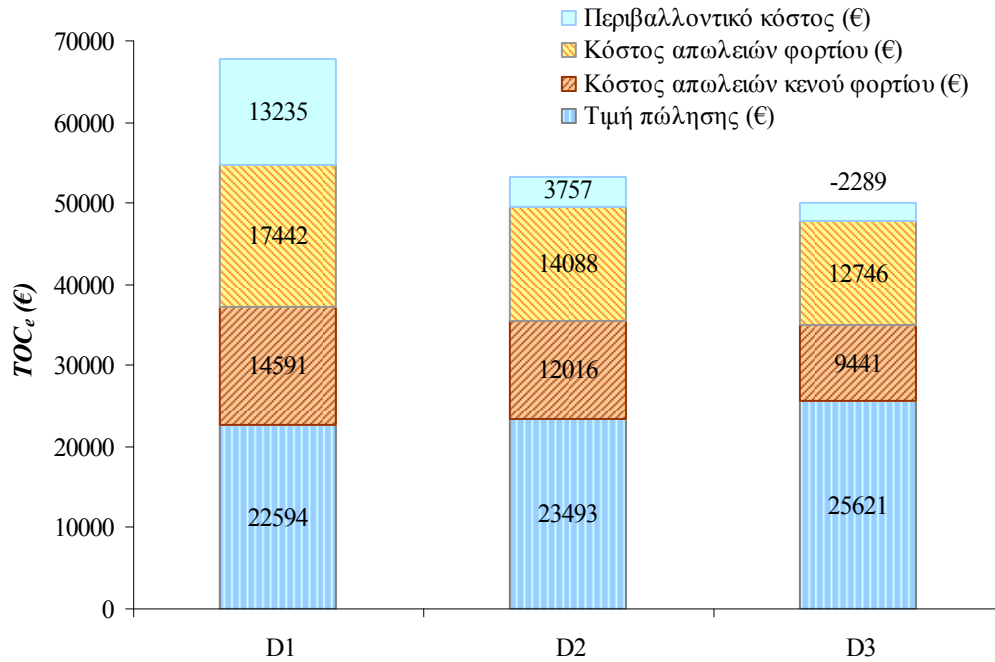
	<i>Σύμβολο</i>	<i>Τιμή</i>	<i>Μονάδα</i>	<i>Σχόλιο</i>		<i>Σύμβολο</i>	<i>Τιμή</i>	<i>Μονάδα</i>	<i>Σχόλιο</i>
ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ	<i>AF</i>	0.97	-	-		<i>ITL_{TPL}</i>	0.40	-	-
	<i>HPY</i>	8760	h/yr	-		<i>TPLIF</i>	0.025	-	-
	<i>BL</i>	30	έτη	-		<i>PRF</i>	0.369	-	-
	<i>C</i>	89.4	€/MWh	-		<i>Lf</i>	0.678	-	-
	<i>EIR_e</i>	0.035	ανά έτος	-		<i>IF</i>	1	-	-
	<i>FCR</i>	0.0931	€/€/yr	-		<i>ET</i>	0.95	-	-
	<i>d</i>	0.085	ανά έτος	-					
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ	<i>CRF</i>	0.0931	-	εξ. (5.16)		<i>LECN_e</i>	1106.97	€/kW-yr	εξ. (5.43)
	<i>LF</i>	0.4924	-	εξ. (5.14)		<i>LECL_e</i>	1141.21	€/kW-yr	εξ. (5.44)
	<i>PUL</i>	0.60	-	εξ. (5.12)		<i>A_e</i>	12522.6	€/kW	εξ. (5.39)
	<i>TLF</i>	0.4210	-	εξ. (5.15)		<i>B_e</i>	2288.6	€/kW	εξ. (5.40)

Ο Πίνακας 5.13 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του προτεινόμενου συνολικού κόστους κατοχής συμπεριλαμβανομένου και του περιβαλλοντικού κόστους TOC_e για τις τρεις προσφορές των μετασχηματιστών (Πίνακας 5.7), βάσει των συντελεστών απωλειών A και B (Πίνακας 5.8) και των συντελεστών περιβαλλοντικού κόστους A_e και B_e (Πίνακας 5.12). Ως μετασχηματιστής αναφοράς επιλέγεται ο μετασχηματιστής που ανήκει στην κατηγορία AC' απωλειών, σύμφωνα με το πρότυπο CENELEC [5.2], δηλαδή με $NLL_r=1.1\text{ kW}$ και $LL_r=10.5\text{ kW}$.

Πίνακας 5.13 Υπολογισμός του TOC_e για τις τρεις προσφορές των μετασχηματιστών (Πίνακας 5.7), για την καμπύλη φόρτισης του οικιακού καταναλωτή στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα. Οι συντελεστές περιβαλλοντικού κόστους είναι $A_e=12522.6\text{ €/kW}$ και $B_e=2288.6\text{ €/kW}$ (Πίνακας 5.12) και οι συντελεστές κόστους απωλειών είναι $A=8583\text{ €/kW}$ και $B=1341.7\text{ €/kW}$ (Πίνακας 5.8). Ο μετασχηματιστής αναφοράς έχει $NLL_r=1.1\text{ kW}$ και $LL_r=10.5\text{ kW}$.

Μετασχηματιστής προσφοράς	D1	D2	D3	Σχόλιο
BP (€)	22594	23493	25621	Πίνακας 5.7
NLL (kW)	1.7	1.4	1.1	Πίνακας 5.7
LL (kW)	13	10.5	9.5	Πίνακας 5.7
ΔP_{NLL} (kW)	0.6	0.3	0.0	εξ. (5.37)
ΔP_{LL} (kW)	2.5	0.0	-1.0	εξ. (5.38)
C_{NLL} (€)	14591	12016	9441	εξ. (5.20)
C_{LL} (€)	17442.2	14088	12746	εξ. (5.21)
CL (€)	32033	26104	22187	εξ. (5.19)
TOC (€)	54627	49597	47809	εξ. (5.22)
EC_{NLL} (€)	7514	3757	0	εξ. (5.25)
EC_{LL} (€)	5722	0	-2289	εξ. (5.26)
EC (€)	13235	3757	-2289	εξ. (5.24)
TOC_e (€)	67862	53354	45520	εξ. (5.27)
BP / TOC_e (%)	33.3%	44.0%	56.3%	-
CL / TOC_e (%)	47.2%	48.9%	48.7%	-
EC / TOC_e (%)	19.5%	7.0%	-5.0%	-
TOC / TOC_e (%)	80.5%	93.0%	105.0%	-

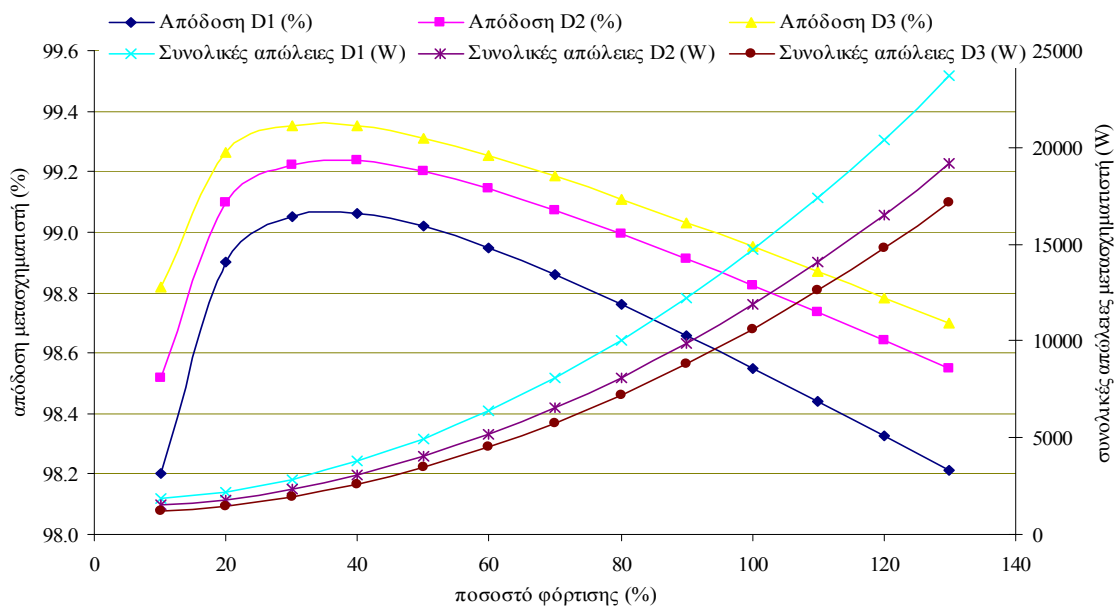
Το Σχήμα 5.19 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του TOC_e . Ο Πίνακας 5.13 παρουσιάζει ότι το περιβαλλοντικό κόστος εξαιτίας απωλειών φορτίου, είναι θετικό για το μετασχηματιστή D1 και αρνητικό για το μετασχηματιστή D3, καθώς επίσης και ο λόγος του περιβαλλοντικού κόστους προς το TOC_e είναι 19.5% και -5.0% για το D1 και D3, αντίστοιχα. Με βάση το Σχήμα 5.19 σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα που απεικονίζει ο Πίνακας 5.13, μπορεί να εξαχθεί το αποτέλεσμα ότι η σχεδίαση D3 είναι η καλύτερη επένδυση επειδή διαθέτει το μικρότερο TOC_e .



Σχήμα 5.19 Γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων του TOC_e (Πίνακας 5.13). Κάθε στήλη του TOC_e είναι χωρισμένη σε τέσσερα τμήματα: 1) τιμή πώλησης, 2) κόστος απωλειών κενού φορτίου, 3) κόστος απωλειών φορτίου, και 4) περιβαλλοντικό κόστος.

5.12.4 Απόδοση Μετασχηματιστή και Απώλειες

Βάσει των εξισώσεων (5.3)-(5.5), υπολογίζεται η απόδοση των τριών μετασχηματιστών (Πίνακας 5.7) για ένα συγκεκριμένο φάσμα φορτίου, το οποίο κυμαίνεται από $L=10\%$ έως $L=130\%$ και για συντελεστή ισχύος ίσο με τη μονάδα. Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται από το Σχήμα 5.20, η σχεδίαση του μετασχηματιστή D3 είναι η πιο αποδοτική σε σύγκριση με τις άλλες δύο σχεδιάσεις των μετασχηματιστών, έχοντας την υψηλότερη απόδοση με τις χαμηλότερες συνολικές απώλειες για κάθε μια από τις διαφορετικές συνθήκες φόρτισης.



Σχήμα 5.20 Απόδοση και απώλειες των τριών μετασχηματιστών προσφοράς συναρτήσει του φορτίου.

5.12.5 Ανάλυση Ευαισθησίας

Στην οικονομική ανάλυση με βάση το συνολικό κόστος κατοχής, είναι εξαιρετικά χρήσιμο να προσδιορισθεί ο βαθμός ευαισθησίας του TOC_e σε διάφορες παραμέτρους ενδιαφέροντος του μελετητή, ώστε να πραγματοποιείται κατάλληλη θεώρηση των συγκεκριμένων παραμέτρων κατά τη διαδικασία αποφάσεων. Έξι παράμετροι έχουν επιλεγεί και είναι οι εξής: το επιτόκιο (d), το παρόν ετήσιο κόστος ενέργειας ($CYEC$), το ετήσιο κόστος της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος (LIC), ο ετήσιος συντελεστής κόστους των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (C), η συνολική διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή (BL) και ο συντελεστής φόρτισης (I_f). Οι συγκεκριμένες παράμετροι αποτελούν τις πιο ευμετάβλητες παραμέτρους των εξισώσεων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των A , B , A_e , B_e και TOC_e .

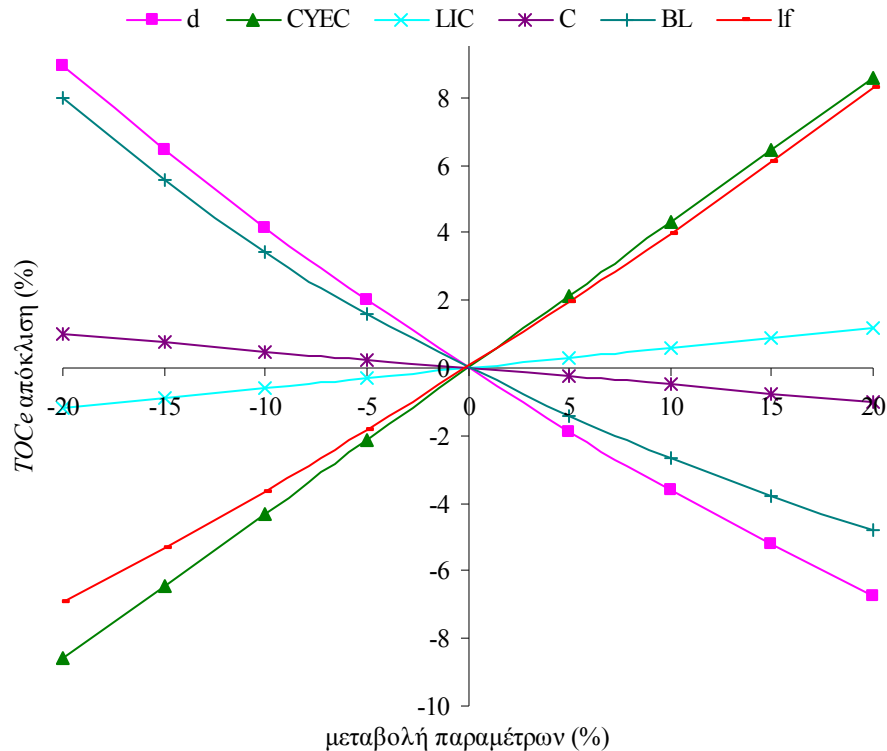
Πριν την έναρξη της διερεύνησης των παραπάνω έξι παραμέτρων, πρέπει να καθορισθεί μια βάση μελέτης (*base case*). Η σχεδίαση του μετασχηματιστή D3 για τον οικιακό καταναλωτή ορίζεται ως η βάση μελέτης, το οποίο συνεπάγεται ότι το TOC_e της βάσης μελέτης είναι ίσο με 45520 € (Πίνακας 5.13). Η συγκεκριμένη βάση μελέτης αντιστοιχεί σε $d=8.5\%$, $CYEC=0.054$ €/kWh, $LIC=150$ €/kW-yr, $C=89.4$ €/MWh, $BL=30$ χρόνια και $I_f=0.678$ (Πίνακας 5.8 και Πίνακας 5.13).

Ο Πίνακας 5.14 και το Σχήμα 5.21 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας των παραμέτρων, βασισμένα σε μια ποικιλία διαφορετικών τιμών. Κάθε φορά που μια παράμετρος τροποποιείται, οι υπόλοιπες πέντε παράμετροι έχουν τιμή ίση με αυτή που αντιστοιχεί στη βάση μελέτης. Για παράδειγμα, τροποποιώντας το παρόν ετήσιο κόστος ενέργειας ($CYEC$) κατά 10 %, το TOC_e αλλάζει κατά 4.29 % σε σύγκριση με αυτό που αντιστοιχεί στη βάση μελέτης, όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 5.14. Είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί ότι η κλίση της κάθε καμπύλης στο Σχήμα 5.21 αναπαριστά το συγκριτικό βαθμό ευαισθησίας του TOC_e σε κάθε παράμετρο. Με άλλα λόγια, ο γενικότερος κανόνας είναι ότι όσο πιο απότομη κλίση έχει μια καμπύλη, τόσο πιο ευαίσθητο είναι το TOC_e στη συγκεκριμένη παράμετρο [5.34].

Βάσει των παραπάνω, όπως εύκολα γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 5.21, το ετήσιο κόστος της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος (LIC) και ο ετήσιος συντελεστής κόστους των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (C) έχουν μικρή επιρροή στο TOC_e . Αντιθέτως, το επιτόκιο (d), το παρόν ετήσιο κόστος ενέργειας ($CYEC$), η συνολική διάρκεια χρήσης του μετασχηματιστή (BL) και ο συντελεστής φόρτισης (I_f) έχουν μεγάλη επιρροή στο TOC_e .

Πίνακας 5.14 Ανάλυση ευαισθησίας: αποκλίσεις TOC_e (% του TOC_e της βάσης μελέτης) βασισμένες στη διαφοροποίηση των τιμών των έξι παραμέτρων.

Απόκλιση παραμέτρου (%)	απόκλιση TOC_e (%)					
	d	$CYEC$	LIC	C	BL	I_f
-20	8.96	-8.58	-1.17	1.01	7.97	-6.94
-15	6.47	-6.44	-0.88	0.75	5.54	-5.33
-10	4.15	-4.29	-0.58	0.50	3.43	-3.64
-5	2.00	-2.15	-0.29	0.25	1.60	-1.86
5	-1.87	2.15	0.29	-0.25	-1.41	1.95
10	-3.61	4.29	0.58	-0.50	-2.66	3.98
15	-5.23	6.44	0.88	-0.75	-3.77	6.09
20	-6.75	8.58	1.17	-1.01	-4.77	8.29
Ελάχιστο	-6.75	-8.58	-1.17	-1.01	-4.77	-6.94
Μέγιστο	8.96	8.58	1.17	1.01	7.97	8.29



Σχήμα 5.21 Γραφική αναπαράσταση του TOC_e συναρτήσει των αλλαγών της κάθε παραμέτρου.

5.12.6 Επίδραση του Τύπου του Φορτίου

Είναι σημαντικό να διερευνηθεί η επίδραση του τύπου του φορτίου στα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας, δηλαδή του προτεινόμενου συνολικού κόστους με θεώρηση του περιβαλλοντικού κόστους (TOC_e). Μετά την σε βάθος έρευνα που υλοποιήθηκε για το οικιακό φορτίο (§5.12.2-§5.12.5), ως νέα παραδείγματα διερευνώνται τρεις επιπλέον τύποι φορτίου (Σχήμα 5.18) του Ελληνικού Συστήματος: 1) βιομηχανικό φορτίο, 2) αγροτικό φορτίο, και 3) τουριστικό φορτίο. Πρέπει να σημειωθεί ότι το οικιακό, βιομηχανικό και αγροτικό φορτίο προέρχονται από το Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα, ενώ το τουριστικό φορτίο προέρχεται από το Ελληνικό μη διασυνδεδεμένο σύστημα (απομονωμένο νησιωτικό δίκτυο), δηλαδή η καμπύλη φορτίου αντιπροσωπεύει τη φόρτιση που υπάρχει σε ένα Ελληνικό νησί, το οποίο εξυπηρετείται από αυτόνομο δίκτυο. Η παραπάνω διαφοροποίηση των φορτίων όπως επίσης και η διάκριση ανάμεσα στους εγκατεστημένους μετασχηματιστές του Ελληνικού διασυνδεδεμένου και μη διασυνδεδεμένου (νησιωτικού) συστήματος επηρεάζουν το κόστος της παραγόμενης ενέργειας, το ρυθμό αύξησης του φορτίου καθώς επίσης και το σύνολο των διαφορετικών καυσίμων που συμμετέχουν στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας και συνεπώς και το περιβαλλοντικό κόστος.

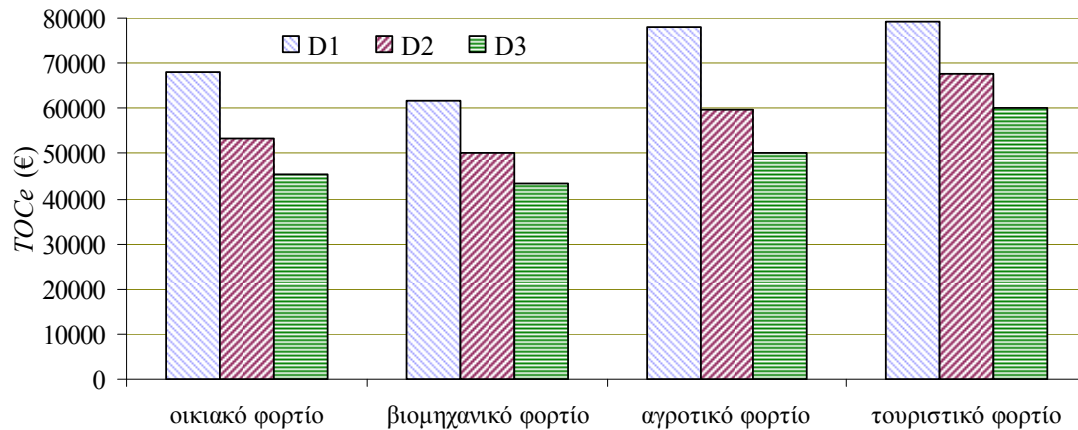
Ο Πίνακας 5.15 παρουσιάζει τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου για τον υπολογισμό των συντελεστών A , B , A_e και B_e για κάθε τύπο φορτίου. Σύμφωνα με τα συγκεκριμένα δεδομένα, πέρα από τα χαρακτηριστικά κάθε καμπύλης φόρτισης, η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας ($CYEC$) είναι ίδια για του δύο τύπους φορτίου (βιομηχανικό και αγροτικό), τα οποία είναι συνδεδεμένα στον Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα. Από την άλλη μεριά, στην περίπτωση του τουριστικού φορτίου, η σύνδεση είναι στο μη διασυνδεδεμένο σύστημα όπου η τιμή της ενέργειας είναι υψηλότερη εξαιτίας του γεγονότος ότι το κύριο καύσιμο που χρησιμοποιείται στα απομονωμένα δίκτυα είναι πετρέλαιο.

Χρησιμοποιώντας τις τιμές των συντελεστών A , B , A_e και B_e για κάθε τύπο φορτίου (Πίνακας 5.15), το συνολικό κόστος κατοχής συμπεριλαμβανομένου και του περιβαλλοντικού κόστους TOC_e υπολογίζεται για κάθε τύπο φορτίου και τα αποτελέσματα τα παρουσιάζει ο Πίνακας 5.16 και το Σχήμα 5.22. Όπως εύκολα γίνεται αντιληπτό, σε όλες τις

περιπτώσεις διαφορετικού φορτίου, ο μετασχηματιστής D3 αναδεικνύεται ως η καλύτερη μακροπρόθεσμη επένδυση εφόσον διαθέτει τη χαμηλότερη τιμή του TOC_e .

Πίνακας 5.15 Δεδομένα εισόδου για τον υπολογισμό των συντελεστών A , B , A_e και B_e , για την καμπύλη φόρτισης του βιομηχανικού, αγροτικού και τουριστικού καταναλωτή.

<i>Σύμβολο</i>	<i>Βιομηχανικό φορτίο</i>	<i>Αγροτικό φορτίο</i>	<i>Τουριστικό φορτίο</i>	<i>Μονάδα</i>
<i>AF</i>	0.97	0.97	0.97	-
<i>HPY</i>	8760	8760	8760	hr/yr
<i>BL</i>	30	30	30	έτη
<i>CYEC</i>	0.054	0.054	0.126	€/kWh
<i>EIR</i>	0.027	0.027	0.032	ανά έτος
<i>FCR</i>	0.0931	0.0931	0.0931	€/€/yr
<i>d</i>	0.085	0.085	0.085	ανά έτος
<i>ITL_{TPL}</i>	0.52	0.5	0.38	-
<i>TPLIF</i>	0.018	0.019	0.027	-
<i>PRF</i>	0.455	0.5	0.552	-
<i>l_f</i>	0.461	0.709	0.365	-
<i>IF</i>	1	1	1	-
<i>ET</i>	0.95	0.95	0.95	-
<i>LIC</i>	150	150	265	€/kW-yr
<i>EIR_e</i>	0.035	0.035	0.035	ανά έτος
<i>C</i>	89.33	89.33	48.00	€/MWh
<i>CRF</i>	0.0931	0.0931	0.0931	-
<i>LF</i>	0.2498	0.5336	0.1680	-
<i>PUL</i>	0.6938	0.6783	0.5897	-
<i>TLF</i>	0.3468	0.4955	0.2417	-
<i>LECN</i>	608.74	608.74	1508.07	€/kW-yr
<i>LECL</i>	627.56	627.56	1554.71	€/kW-yr
<i>LECN_e</i>	1106.97	1106.97	594.83	€/kW-yr
<i>LECL_e</i>	1141.21	1141.21	613.23	€/kW-yr
<i>A</i>	8582.96	8582.96	20057.79	€/kW
<i>B</i>	1022.81	1938.12	1344.96	€/kW
<i>A_e</i>	12522.57	12522.57	6729.02	€/kW
<i>B_e</i>	1552.46	3169.54	405.22	€/kW



Σχήμα 5.22 Αποτελέσματα του TOC_e συναρτήσει του τύπου φορτίου.

Πίνακας 5.16 Αποτελέσματα του TOC_e για κάθε είδος φορτίου για τους τρεις μετασχηματιστές προσφοράς.

Τύπος φορτίου	TOC_e του D1 (€)	TOC_e του D2 (€)	TOC_e του D3 (€)
οικιακό φορτίο	67862	53354	45520
βιομηχανικό φορτίο	61876	50006	43227
αγροτικό φορτίο	77818	59616	50305
τουριστικό φορτίο	79227	67715	60057

5.13 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύχθηκε ένα καινοτομικό μοντέλο οικονομικής αξιολόγησης των μετασχηματιστών, το οποίο λαμβάνει υπόψη το περιβαλλοντικό κόστος το οποίο προέρχεται από τα αέρια του θερμοκηπίου που δημιουργούνται από τις απώλειες των μετασχηματιστών διανομής. Συγκεκριμένα, το προτεινόμενο μοντέλο ενσωματώνει το περιβαλλοντικό κόστος στη κλασική σχέση του συνολικού κόστους κατοχής, αναδεικνύοντας τα οφέλη που προκύπτουν για τις ηλεκτρικές εταιρίες από την εγκατάσταση μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης, ύστερα από εφαρμογή σε μετασχηματιστές που εξυπηρετούν διάφορα είδη φορτίου σύμφωνα με πραγματικά δεδομένα προερχόμενα από δίκτυα διανομής στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο και μη διασυνδεδεμένο σύστημα. Η μεθοδολογία βασίζεται στον οδηγό κοστολόγησης απωλειών του προτύπου IEEE, ο οποίος αποτελεί μία διεθνώς αναγνωρισμένη και εφαρμοσμένη πρακτική για την οικονομική αξιολόγηση απωλειών, προτείνοντας ένα αξιόπιστο εργαλείο αξιολόγησης επενδύσεων στα πλαίσια του επαναπροσδιορισμού των τεχνικών και οικονομικών προτύπων που επιβάλλουν στον ενεργειακό τομέα οι επιπτώσεις της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής.

5.14 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] B. Kennedy, *Energy Efficient Transformers*, Mc Graw - Hill, 1998.
- [5.2] CENELEC, Harmonization Document HD428: 1 S1:1992.
- [5.3] T. J. Hammons, B. Kennedy, R. Lorand, S. Thigpen, B.W McConnell, S. Rouse, T. A. Prevost, C. Pruess, S. J. Daile, Y. R. Ramanan, T. L. Baldwin, "Future trends in energy-efficient transformers," *IEEE Power Engineering Review*, pp. 5-16, Jul. 1998.
- [5.4] Π. Γεωργιλάκης, Ν. Χατζηαργυρίου, "Οικονομική αξιολόγηση μετασχηματιστών διανομής," *Τεχνικά Χρονικά III*, τόμ. 20, τεύχ. 1-2, σελ. 51-62, 2000.

- [5.5] B. W. McConnell, "Increasing distribution transformer efficiency: potential for energy savings," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 18, no 7, pp. 8-10, July 1998.
- [5.6] W. Beaty, "Transformer designs cut costs and improve operations," *Electric Light and Power*, vol. 72, no 5, pp. 24-27, 1994.
- [5.7] A. Dymkov, *Transformer Design*, English translation from the Russian by A. Gavrilovets, Mir Publishers, Moscow, 1975.
- [5.8] P. S. Georgilakis, M. A. Tsili, A. T. Souflaris, "A heuristic solution to the transformer manufacturing cost optimization problem," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 181, no 1-3, pp. 260-266, 2007.
- [5.9] C. Pruess, "Low core loss transformers for industrial energy savings," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 18, no 7, pp. 12-14, July 1998.
- [5.10] Α. Κάρτας, Δ. Τσανάκας, "Εξέταση της δυνατότητας υπερφόρτισης μετασχηματιστών λαδιού," *Τεχνικά Χρονικά*, Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, ΙΙΙ, τόμ. 17, τεύχ. 1-2, σελ. 69-80, 1997.
- [5.11] B. W. McConnell, S. P. Mehta, M. S. Walker, "HTS transformers," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 20, no 6, pp.7-11, 2000.
- [5.12] Π. Σ. Γεωργιάκης, "Συμβολή μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης στη μείωση των απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών διανομής," *Διδακτορική διατριβή*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 2000.
- [5.13] P. S. Georgilakis, N. D. Hatziaargyriou, D. Paparigas, "AI helps reduce transformer iron losses," *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 12, no. 4, pp. 41-46, 1999.
- [5.14] European Copper Institute, *The Scope for Energy Saving in the EU Through the Use of Energy-Efficient Electricity Distribution Transformers*, THERMIE B PROJECT N° STR-1678-98-BE, December 1999.
- [5.15] Φ. Τοπαλής, Κ. Μπουρούσης. "Εξοικονόμηση ενέργειας στους μετασχηματιστές διανομής," *Πρακτικά Ημερίδας για το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Βελτίωσης της Ενεργειακής Αποδοτικότητας των Ηλεκτροκινούμενων Συστημάτων στη Βιομηχανία - Motorchallenge*, Αθήνα, 30 Ιανουαρίου 2007. (www.cres.gr/motorchallenge/Praktika/Inverters-Energy%20savings%20in%20DTs.pdf).
- [5.16] T. Fransen, P. Bhatia, A. Hsu, "Measuring to manage: A guide to designing GHG accounting and reporting programs," *World Business Council on Sustainable Development*, 2007.
- [5.17] J. T. Houghton, L. G. Meiro Filho et al (eds), *Climate change 1995: The science of climate change*, Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [5.18] Greenhouse Gas Protocol Initiative, <http://www.ghgprotocol.org/>, Τελευταία τροποποίηση: 2008.
- [5.19] Department of Climate Change, <http://www.greenhouse.gov.au/>, Τελευταία τροποποίηση: 13 Μαΐου 2008.
- [5.20] R. Targosz (ed) et al., *The Potential for Global Energy Savings from High Energy Efficiency Distribution Transformers*, Leonardo Energy, European Copper Institute, February 2005.
- [5.21] European Commission, *External Costs: Research results on socio-environmental damages due to electricity and transport*, Directorate-General for Research, Directorate J-Energy, Brussels, Study 20198, 2003.
- [5.22] "Προδιαγραφή SS-25/15, Μετασχηματιστές ισχύος 150/15,75-21kV, 40/50MVA με αυτόματη ρύθμιση τάσεως υπό φορτίο, συνδεσμολογία Dyn1," *Δ.Ε.Η. Α.Ε., Διεύθυνση Μελετών Κατασκευών Έργων Μεταφοράς*.
- [5.23] E. I. Amoiralis, M. A. Tsili, P. S. Georgilakis, A. G. Kladas, "Energy efficient transformer selection implementing life cycle costs and environmental externalities",

- in *CD Proceedings of the 9th International Conference on the Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU 2007)*, Barcelona, Spain, October 9-11, 2007.
- [5.24] E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, M. Tsili, A. T. Souflaris, "Utility-based economic assessment of distribution transformers considering specific load characteristics and environmental factors", *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 10, no. 5, pp. 1184-1191, 2008.
- [5.25] ANSI/IEEE Standard C57.120, "Loss evaluation guide for power transformers and reactors," Piscataway, N.J., August 1992.
- [5.26] Β. Παπαδιάς, Γ. Κονταξής, *Ηλεκτρική Οικονομία*, ΕΜΠ, Αθήνα 1996.
- [5.27] "Η Μελέτη του Ηλεκτρικού Φορτίου στη ΔΕΗ (1988-1993)", *Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, Διεύθυνση Εκμεταλλεύσεως Διανομής*, Δεκέμβριος 1994.
- [5.28] "Οι Τυπικές Καμπύλες Φορτίου του Συστήματος κατά το 1992", *Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, Διεύθυνση Εκμεταλλεύσεως Διανομής*, Μάιος 1994.
- [5.29] Γ. Ε. Πεπόνης, "Συμβολή στην ανάπτυξη ευριστικών μεθόδων βελτιστοποίησης των δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας," *Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ*, Αθήνα, 1996.
- [5.30] Δεδομένα Λειτουργίας Συστήματος, Διαχειριστής του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, 2006. (<http://www.desmie.gr/content/values.asp?lang=1>).
- [5.31] Οδηγία 2003/87/ΕΚ της Ευρωπαϊκής Κοινότητας.
- [5.32] P. S. Georgilakis, E. I. Amoiralis, "Distribution Transformer Cost Evaluation Methodology Incorporating Environmental Cost," *IET Generation, Transmission & Distribution*, (submitted).
- [5.33] Οδηγός Εφαρμογής του Συστήματος Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών στην Ελλάδα, ΚΑΠΕ, 2005. (www.cres.gr/etres/pdf/guide/ET2_fin.pdf).
- [5.34] W. G. Sullivan, E. M. Wicks, and J. T. Luxhoj, *Engineering Economy*, New Jersey: Pearson Education (13th ed), Prentice Hall, 2006.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΠΟΙΚΙΑΣ ΜΥΡΜΗΓΚΙΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο προτείνει μια στοχαστική μέθοδο βελτιστοποίησης, βασισμένη στη μέθοδο βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών, επιλύοντας το πρόβλημα της διαστασιολόγησης των μετασχηματιστών, δηλαδή της επιλογής της ονομαστικής ισχύος και του έτους εγκατάστασης των μετασχηματιστών που θα εγκατασταθούν σε ένα δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η προτεινόμενη τεχνική λαμβάνει υπόψη το φορτίο που πρόκειται να εξυπηρετήσουν οι μετασχηματιστές κατά τη συνολική διάρκεια λειτουργίας τους καθώς επίσης και την πιθανή θερμική υπερφόρτισή τους, προκειμένου να επιλεγούν οι καταλληλότεροι σε ισχύ μετασχηματιστές διανομής. Η πιθανότητα αναβάθμισης του μεγέθους των μετασχηματιστών μια ή και περισσότερες φορές κατά τη συνολική διάρκεια του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού οδηγεί στη διαμόρφωση διαφόρων πιθανών στρατηγικών επιλογής μεγέθους (διαστασιολόγησης δηλαδή του μετασχηματιστή), οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικές διαδρομές διαστασιολόγησης (δηλαδή διαδρομές, οι οποίες οριοθετούνται από την επιλογή και εγκατάσταση μετασχηματιστών σε διάφορα χρονικά στάδια της μελέτης). Εφαρμόζεται ο αλγόριθμος της βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών για την εύρεση της καλύτερης διαδρομής, δηλαδή εκείνης με το μικρότερο κόστος, λαμβάνοντας υπόψη την τιμή αγοράς του κάθε μετασχηματιστή όπως επίσης και το κόστος απωλειών του κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού.

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

6.1.1 Διαστασιολόγηση Μετασχηματιστή

Η διαστασιολόγηση, δηλαδή η επιλογή της ονομαστικής ισχύος των μετασχηματιστών που εγκαθίστανται στο δίκτυο επηρεάζει την απόδοση και τη λειτουργικότητά τους. Η κατάλληλη επιλογή μετασχηματιστή, βάσει του φορτίου που πρόκειται να εξυπηρετηθεί, έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των απωλειών. Μετασχηματιστής ονομαστικής ισχύος αρκετά μεγαλύτερης από τη βέλτιστη επιλογή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών κενού φορτίου, ενώ μετασχηματιστής ονομαστικής ισχύος αρκετά μικρότερης από τη βέλτιστη επιλογή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών φορτίου. Η βέλτιστη επιλογή του μεγέθους του μετασχηματιστή εξαρτάται από μια σειρά από οικονομικούς παράγοντες καθώς επίσης και από τις απώλειές του.

Εξαιτίας του πολύ μεγάλου αριθμού εγκατεστημένων μετασχηματιστών διανομής στα ηλεκτρικά δίκτυα, η επίδραση της επιλογής του κατάλληλου μεγέθους είναι ζωτικής σημασίας, παρέχοντας σημαντικά οικονομικά οφέλη στις ηλεκτρικές εταιρίες και στους άλλους χρήστες μετασχηματιστών. Υπάρχουν μια σειρά από παράγοντες που εμπλέκονται στη σωστή επιλογή του μεγέθους του μετασχηματιστή, όπως για παράδειγμα η προβλεπόμενη αύξηση του φορτίου που θα εξυπηρετηθεί, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, οι απώλειες του μετασχηματιστή, η τιμή αγοράς του μετασχηματιστή, το προεξοφλητικό επιτόκιο και το

κόστος της ενέργειας. Κατά τη διάρκεια επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος, ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στις υποψήφιες διακριτές τιμές ονομαστικής ισχύος των μετασχηματιστών όπως επίσης και στην επιλογή της αναβάθμισης του μεγέθους του μετασχηματιστή μια ή περισσότερες φορές κατά τη διάρκεια της μελέτης, οδηγώντας σε διαφορετικές στρατηγικές διαστασιολόγησης.

Η βέλτιστη επιλογή μεγέθους μετασχηματιστή δεν είναι μια προφανής ή άμεση διαδικασία, εγκαθιστώντας απλά ένα επαρκές μέγεθος μετασχηματιστή, ο οποίος καλύπτει τις απαιτήσεις φορτίου στο τελικό έτος μελέτης, (τακτική, η οποία συνήθως ακολουθείται από τις ηλεκτρικές εταιρίες). Αντίθετα, το συγκεκριμένο πρόβλημα πρέπει να αντιμετωπισθεί ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις πιθανές στρατηγικές επιλογής μεγέθους. Στη διεθνή βιβλιογραφία, το συγκεκριμένο πρόβλημα έχει αντιμετωπισθεί με αιτιοκρατικές μεθόδους βελτιστοποίησης, όπως ο δυναμικός προγραμματισμός [6.1] ή ο ακέραιος προγραμματισμός [6.2]. Παρόλα αυτά, ένα ευρύ φάσμα από μεγέθη μετασχηματιστών και διαφορετικά είδη φορτίου καθιστούν το συγκεκριμένο πρόβλημα ένα δύσκολο συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, λόγω του μεγάλου χώρου αναζήτησης των υποψήφιων λύσεων. Για αυτό το λόγο, οι στοχαστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης έχουν τη δυνατότητα να αποδειχθούν πιο αποτελεσματικές σε σχέση με τις αιτιοκρατικές για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση τέτοιων μεθόδων δεν συναντάται στη διεθνή βιβλιογραφία ή περιλαμβάνεται μερικώς σε αναλύσεις όπως για παράδειγμα ως εργαλείο για την πρόβλεψη φορτίου [6.3].

6.1.2 Στοχαστικοί Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης

Τις τρεις τελευταίες δεκαετίες υπάρχει μια έντονη δραστηριοποίηση στο χώρο των υπολογιστικών αλγορίθμων, που βασίζονται στη μοντελοποίηση διαφόρων φυσικών, βιολογικών ή κοινωνικών φαινομένων, με σκοπό τη δημιουργία μη αιτιοκρατικών αλγορίθμων. Τα προβλήματα που εμφανίζονται στη φύση μπορεί να είναι δύσκολα Συνδυαστικά Προβλήματα Βελτιστοποίησης (*Combinatorial Optimization Problems*) ή να μοντελοποιούνται από συνεχείς συναρτήσεις που εμφανίζουν ένα μεγάλο πλήθος τοπικά βέλτιστων λύσεων κάνοντας κατά αυτόν τον τρόπο δύσκολη, αν όχι αδύνατη, την επίλυσή τους με χρήση κλασσικών αιτιοκρατικών μεθόδων βελτιστοποίησης. Για το λόγο αυτό η έρευνα κατευθύνθηκε προς τους στοχαστικούς ευρετικούς αλγορίθμους και ειδικότερα σε αυτούς που εμπνέονται από φυσικά, κοινωνικά ή βιολογικά φαινόμενα [6.4][6.5]. Οι αλγόριθμοι αυτοί έχουν την ιδιότητα να μην εγκλωβίζονται σε τοπικά βέλτιστες λύσεις και μάλιστα μπορούν να εντοπίσουν την περιοχή της ολικά βέλτιστης λύσης συνήθως μετά από ένα σχετικά μεγάλο αριθμό εκτιμήσεων της αντικειμενικής συνάρτησης.

Η διαδικασία εύρεσης λύσεων στους στοχαστικούς ευρετικούς αλγορίθμους πραγματοποιείται πάντοτε μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας. Σε κάθε επανάληψη δημιουργούνται από τον αλγόριθμο μια (για παράδειγμα προσομοιωμένη ανόπτηση (*Simulated Annealing*)) ή περισσότερες (για παράδειγμα γενετικοί αλγόριθμοι (*Genetic Algorithms*) και βελτιστοποίηση αποικίας μυρμηγκιών (*Ant System*)) λύσεις από τον αντίστοιχο αριθμό ατόμων (*individuals*) που ανήκουν στο χώρο των πιθανών λύσεων. Η καταλληλότητα των λύσεων αυτών εκτιμάται μέσω της συναρτήσεως κόστους. Πολλές φορές οι αλγόριθμοι αυτοί κατά τη διαδικασία εύρεσης λύσεων προσαρμόζονται συνεχώς στο χώρο των λύσεων μεταβάλλοντας τις παραμέτρους τους.

Η παραπάνω γενική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ολοκληρωθεί ένας συγκεκριμένος αριθμός επαναλήψεων ή να ικανοποιηθεί ένα κριτήριο σύγκλισης.

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά των αλγορίθμων που εμπνέονται από τη φύση είναι:

- μοντελοποιούν σε κάποιο βαθμό ένα φυσικό (για παράδειγμα η ανόπτηση στα μέταλλα), κοινωνικό (για παράδειγμα η αλληλεπίδραση μεταξύ των ανθρώπων και του πολιτισμού τους ή γενικότερα μεταξύ των ζώντων όντων και περιβάλλοντός τους) ή βιολογικό φαινόμενο (για παράδειγμα η εξέλιξη των ειδών).
- έχουν στοιχεία στοχαστικότητας (μη αιτιοκρατικοί), με κατευθυνόμενη στοχαστικότητα.

- πολλές φορές παρουσιάζουν παράλληλη δομή, δηλαδή πράκτορες (*agents*) ή άτομα (*individuals*) που δραστηριοποιούνται ταυτόχρονα και δημιουργούν πολλαπλές λύσεις του προβλήματος. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την παράλληλη εκτέλεσή τους σε παράλληλους ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Όταν χρησιμοποιείται ένας πληθυσμός ατόμων τότε τα άτομα μπορεί να επικοινωνούν είτε άμεσα (για παράδειγμα γενετικοί αλγόριθμοι) είτε έμμεσα (για παράδειγμα βελτιστοποίηση αποικίας μυρμηγκιών) μεταξύ τους.
- είναι προσαρμόσιμοι σε διαφορετικά «περιβάλλοντα» παρουσιάζοντας «ευρωστία». Συνεπώς, μπορούν να λειτουργήσουν αγνοώντας το θόρυβο αλλά και να αξιοποιηθούν σε διάφορα είδη προβλημάτων με ελάχιστες αλλαγές στον κώδικα.

Πρέπει να επισημανθεί ότι βασικά υπάρχουν δύο μηχανισμοί στους στοχαστικούς αλγορίθμους:

- η εκμετάλλευση (*exploitation*) του χώρου των λύσεων κατά την οποία πραγματοποιείται τοπική αναζήτηση βέλτιστων λύσεων στις περιοχές που έχουν ήδη δώσει καλά αποτελέσματα.
- η εξερεύνηση (*exploration*) όλου του δυνατού χώρου των λύσεων για την αποτελεσματικότερη αναζήτηση νέων προσοδοφόρων περιοχών.

Οι δύο αυτές διαδικασίες είναι ανταγωνιστικές μεταξύ τους και ένας σωστά ρυθμισμένος ευρετικός αλγόριθμος πρέπει να λειτουργεί στη «χρυσή τομή» των δύο. Τα τρία κυριότερα μειονεκτήματα των στοχαστικών αλγορίθμων είναι τα ακόλουθα:

- πολλές φορές δυσκολεύονται να προσεγγίσουν την ακριβή τιμή της βέλτιστης λύσης του προβλήματος αν και συνήθως εντοπίζουν γρήγορα την περιοχή στην οποία αυτή βρίσκεται.
- απαιτούν μεγάλο αριθμό εκτιμήσεων της αντικειμενικής συνάρτησης – και επομένως έχουν υψηλό υπολογιστικό κόστος – προκειμένου να δώσουν ένα καλό αποτέλεσμα.
- συνήθως έχουν ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων ο οποίος κάνει δύσκολη τη βέλτιστη ρύθμιση του αλγορίθμου.

Η σχέση μεταξύ μέγιστου αριθμού επαναλήψεων και ποιότητας της βέλτιστης λύσης είναι άμεση και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το πρόβλημα που πρέπει να λυθεί. Προφανώς, θα πρέπει να είναι γνωστό εκ των προτέρων αν απλά είναι επιθυμητή μια καλή λύση ή είναι απαραίτητος ο εντοπισμός της βέλτιστης λύσης.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των στοχαστικών ευρετικών αλγορίθμων που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη από το χρήστη είναι η επαναληψιμότητα της απόδοσης του αλγορίθμου. Λόγω της στοχαστικής φύσης των αλγορίθμων, κάθε εκτέλεσή τους με διαφορετικές αρχικές συνθήκες δίνει και διαφορετικό αποτέλεσμα. Υπολογίζοντας τη μέση τιμή της βέλτιστης λύσης και την τυπική απόκλιση αυτής για ένα μεγάλο αριθμό εκτελέσεων του αλγορίθμου, θα πρέπει σε έναν καλό στοχαστικό ευρετικό αλγόριθμο, η τυπική απόκλιση να είναι σχετικά μικρή. Το γεγονός αυτό προσφέρει τη σιγουριά στο χρήστη ότι ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί θα έχει την αναμενόμενη απόδοση στις περισσότερες εκτελέσεις του. Πολλές φορές είναι επιθυμητή η μείωση της απόδοσης του αλγορίθμου με σκοπό την αύξηση της επαναληψιμότητάς της ή και το αντίστροφο ελπίζοντας ότι μια τυχαία εκτέλεση του αλγορίθμου μπορεί να δώσει ένα πάρα πολύ καλό αποτέλεσμα.

Μερικές από τις γνωστότερες ευρετικές μεθόδους που είναι εμπνευσμένες από τη φύση [6.6] είναι: οι Γενετικοί Αλγόριθμοι [6.7], οι Εξελικτικές Στρατηγικές [6.8], η Προσομοιωμένη Ανόπτηση [6.9], η περιορισμένη αναζήτηση (*Tabu search*) [6.10], τα Νευρωνικά Δίκτυα [6.11] και η Βελτιστοποίηση με Αποικίες Μυρμηγκιών [6.12].

6.1.3 Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών

Ο Dorigo και οι συνεργάτες του εμπνευσμένοι από τη δουλειά του Deneubourg [6.13][6.14] πάνω στα κοινωνικά έντομα, και ειδικότερα τα μυρμήγκια, δημιούργησαν ένα πρωτοποριακό αλγόριθμο (*Ant System (AS)* [6.15][6.16]) βασισμένο στην έμμεση επικοινωνία (*stigmergy*) των μυρμηγκιών μέσω χημικών ουσιών (της φερομόνης¹) κατά την αναζήτηση και συλλογή τροφής (*foraging*). Αναλυτικότερα, τα περισσότερα είδη μυρμηγκιών κατά την αναζήτηση και συγκομιδή τροφής εναποθέτουν φερομόνη στο πέρασμά τους. Η φερομόνη αυτή είναι ανιχνεύσιμη και από τα υπόλοιπα μυρμήγκια της αποικίας τους τα οποία αποφασίζουν με κάποια πιθανότητα αν θα ακολουθήσουν τη διαδρομή αυτή. Η ιδιότητα αυτή των μυρμηγκιών οδηγεί μέσω του φαινομένου της αυτο-οργάνωσης στην εύρεση της συντομότερης διαδρομής μεταξύ της φωλιάς τους και της τοποθεσίας της τροφής.

Ο αλγόριθμος AS που βασίζεται στο υπολογιστικό ανάλογο της παραπάνω διαδικασίας επιλύει διακριτά προβλήματα (με πρώτη και συνηθέστερη εφαρμογή το πρόβλημα του περιπλανώμενου πωλητή) με πάρα πολύ καλά αποτελέσματα οπότε και γέννησε μια σειρά βελτιωμένων εκδοχών του – *Ant Colony System (ACS)* [6.17], *ANT-Q* [6.18], *Max-Min Ant System (MMAS)* [6.19], *AS-Rank* [6.20]. Οι παραπάνω αλγόριθμοι βρίσκουν πολλαπλές εφαρμογές σε πληθώρα θεωρητικών και τεχνικών προβλημάτων όπως το πρόβλημα του Περιπλανώμενου Πωλητή, Το Πρόβλημα της Τετραγωνικής Ανάθεσης και το Πρόβλημα Προγραμματισμού Εργασιών.

Στη βιβλιογραφία, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (*Ant Colony Optimization*) χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων όπως: 1) εκτίμηση βλαβών σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας [6.21] 2) καθορισμός συχνοτήτων ραδιοφωνικών εκπομπών [6.22] 3) έλεγχος δικτύων επικοινωνίας [6.23], 5) έλεγχος της στάθμευσης των πλοίων στο λιμάνι [6.24].

Αργότερα, ο Bilchev [6.25] κατάφερε να δώσει μια πρώτη εκδοχή του AS για την επίλυση προβλημάτων με συνεχείς μεταβλητές. Την αρχική του ιδέα βελτίωσαν οι Wodrich [6.26] και Mathur [6.27] και κατόπιν ακολούθησε μια πληθώρα εφαρμογών κυρίως στο χώρο της χημικής βιομηχανίας [6.28] και της παραγωγής ενέργειας όπως για παράδειγμα στην οικονομική κατανομή συμπαραγωγής θερμότητας και ισχύος [6.29].

Ακόμη, στο χώρο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, η χρησιμοποίηση των αλγόριθμων βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών έχει εφαρμοστεί για την επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου με τον αλγόριθμο *Max-Min Ant System* [6.30], καθώς επίσης και για την επίλυση του προβλήματος προγραμματισμού ένταξης μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [6.31][6.32] και για το πρόβλημα αναδιάταξης δικτύου διανομής και μετεγκατάστασης διακοπών [6.33][6.34][6.35]. Επιπλέον πληροφορίες για τις εφαρμογές του αλγορίθμου βελτιστοποίησης με χρήση της αποικίας μυρμηγκιών, υπάρχουν στην εργασία [6.36].

6.2 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΙΚΙΑΣ ΜΥΡΜΗΓΚΙΩΝ

Τα προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης έχουν μεγάλο ενδιαφέρον, επειδή είναι εύκολα να προσδιοριστούν αλλά δύσκολα να επιλυθούν. Πολλά από τα προβλήματα που εμφανίζονται στις εφαρμογές είναι NP-hard² (*nondeterministic polynomial time hard*) προβλήματα, δηλαδή προβλήματα για τα οποία πιστεύεται ότι δεν μπορούν να βρεθούν βέλτιστες λύσεις στα πλαίσια ενός πολυωνυμικού υπολογιστικού χρονικού ορίου. Για αυτό το λόγο, και προκειμένου να λυθεί ένα πρόβλημα, πρέπει να χρησιμοποιηθούν προσεγγιστικές μέθοδοι οι οποίες θα δώσουν σχεδόν βέλτιστες λύσεις σε ένα σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Οι αλγόριθμοι αυτού του τύπου ονομάζονται, ευρετικοί (*heuristics*). Συνήθως

¹ Η φερομόνη (*pheromone*) είναι μια χημική ουσία την οποία εκλύουν τα ζώα και τα έντομα για να επικοινωνήσουν έμμεσα με τα άλλα μέλη του είδους τους.

² NP-hard (Non-Deterministic Polynomial Time) ονομάζεται η κλάση των προβλημάτων που επιλύονται σε πολυωνυμικό χρόνο από κάποιο μη αιτιοκρατικό αλγόριθμο (ένα ιδεατό μοντέλο το οποίο σε κάθε βήμα μπορεί να κάνει επιλογές).

χρησιμοποιούν ειδική πληροφορία σχετικά με το πρόβλημα για να δημιουργήσουν ή να βελτιώσουν τις λύσεις.

Πρόσφατα, οι ερευνητές επικέντρωσαν το ενδιαφέρον τους σε μια νέα κατηγορία αλγορίθμων, που λέγονται μεθευρετικοί (*meta-heuristics*). Ένας μεθευρετικός αλγόριθμος είναι ένα σύνολο από αλγοριθμικές έννοιες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσδιορίσουν ευρετικές μεθόδους κατάλληλες για ένα ευρύ σύνολο από διαφορετικά προβλήματα. Η χρήση των μεθευρετικών αλγορίθμων έχει αυξήσει σημαντικά την ικανότητα εύρεσης πολύ καλών, ποιοτικά, λύσεων, σε δύσκολα προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης, σε ένα λογικό χρονικό πλαίσιο.

Μια κατηγορία, επιτυχημένων, μεθευρετικών αλγορίθμων εμπνέονται από τη συμπεριφορά των πραγματικών μυρμηγκιών [6.16]. Ξεκινώντας με τον αλγόριθμο *Ant System* [6.37], ένας αριθμός από αλγοριθμικές προσεγγίσεις, βασισμένες στις ίδιες βασικές αρχές, αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν, με αξιοσημείωτη επιτυχία, σε μια ποικιλία προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης, τόσο σε θεωρητικές όσο και σε πραγματικές εφαρμογές.

6.2.1 Εισαγωγή

Στα κοινωνικά έντομα (μυρμήγκια, τερμίτες, μέλισσες και σφήγκες), δηλαδή στα έντομα που ζουν σε αποικίες, η γενικότερη συμπεριφορά τους κατευθύνεται από την ανάγκη επιβίωσης της ομάδας και όχι του μεμονωμένου ατόμου. Τα κοινωνικά έντομα πάντοτε εντυπωσίαζαν τους ανθρώπους, επιστήμονες και μη, με τη δομή και την οργάνωσή τους. Δεν είναι τυχαίο ότι υπάρχει πληθώρα πηγών στο Διαδίκτυο με λεπτομέρειες γύρω από τη ζωή τους, για το πως μπορεί κανείς να τα παρατηρήσει ή και ακόμη να τα εκθρέψει ως κατοικίδια.

Ειδικότερα, τα μυρμήγκια αποτελούν ένα από τα πιο επιτυχημένα είδη ζωής πάνω στον πλανήτη μας έχοντας αποικήσει κάθε μέρος του. Ζούνε εδώ και 100 εκατομμύρια χρόνια και ο πληθυσμός τους υπολογίζεται γύρω στα 10^{16} άτομα [6.38].

Κάθε μεμονωμένο έντομο, από όλα τα είδη των εντόμων, εμφανίζει αρκετά περίπλοκη δομή χρησιμοποιώντας πληθώρα αισθητηρίων οργάνων ώστε να συγκεντρώνει πληροφορίες από το περιβάλλον του και να λαμβάνει τις ανάλογες αποφάσεις. Για παράδειγμα, είναι αξιοσημείωτο πως τα μυρμήγκια *Cataglyphis fortis* καταφέρνουν να εντοπίσουν τον προορισμό τους (τοποθεσία με φαγητό) – όταν αλλάζει η τρέχουσα θέση τους – χρησιμοποιώντας οπτικά δεδομένα από τη μορφολογία του περιβάλλοντος, τον ήλιο ως πυξίδα, τη μυρωδιά του στόχου, την περιορισμένη μνήμη τους αλλά και ένα αθροιστή που διαθέτουν προκειμένου να υπολογίζουν αποστάσεις [6.39]. Άλλο χαρακτηριστικό παράδειγμα της δομής και λειτουργίας των εντόμων είναι ο τρόπος με τον οποίο πετούν και επικοινωνούν οι μέλισσες. Έχει αποδειχθεί [6.39] ότι οι μέλισσες καθορίζουν την ταχύτητά τους και μετρούν την απόσταση που έχουν διανύσει ανάλογα με την «οπτική ροή» των πληροφοριών στον αμφιβληστροειδή.

6.2.2 Αυτό-οργάνωση

Πολλές πλευρές των συλλογικών δραστηριοτήτων των κοινωνικών εντόμων είναι αυτο-οργανωτικές. Η αυτο-οργάνωση είναι ένα φαινόμενο που περιγράφεται στους κλάδους της φυσικής και της βιολογίας. Ο Camazine [6.40] προτείνει τον παρακάτω ορισμό για την αυτο-οργάνωση: «*Η αυτο-οργάνωση είναι μια διαδικασία μέσα στην οποία ένα μοντέλο ολικού επιπέδου αναδύεται κατά μοναδικό τρόπο, από ένα μεγάλο αριθμό αλληλεπιδράσεων μεταξύ των συνιστωσών του χαμηλού επιπέδου του συστήματος. Οι κανόνες που χαρακτηρίζουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συνιστωσών του συστήματος ακολουθούνται χρησιμοποιώντας μόνο τοπικές πληροφορίες χωρίς να λαμβάνουν υπόψη το συνολικό μοντέλο*». Δυο όροι πρέπει να αποσαφηνιστούν: μοντέλο και αναδύομενη ιδιότητα. Ο όρος μοντέλο είναι μια προσεγγιστική μετάφραση του αγγλικού όρου *pattern*, που αφορά την έννοια της δομής και μπορεί, επίσης, να σημαίνει γενική διάταξη, σχήμα και τύπος. Μια αναδύομενη ιδιότητα ενός συστήματος είναι ένα χαρακτηριστικό που εμφανίζεται αιφνிடιαστικά (χωρίς να έχει προσδιοριστεί) από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συνιστωσών του συστήματος.

Μελετώντας την αυτο-οργάνωση των κοινωνικών εντόμων μιας αποικίας προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα που αξιοποιούνται στο σχεδιασμό ευφών συστημάτων. Στην πραγματικότητα, μια κοινωνική αποικία εντόμων είναι ένα αποκεντρωμένο σύστημα επίλυσης προβλημάτων, τα οποία αποτελούνται από πολλές απλές αλληλεπιδρούσες οντότητες. Τα καθημερινά προβλήματα που λύνονται μέσα σε μια αποικία περιλαμβάνουν την εύρεση των τροφίμων, την οικοδόμηση ή την επέκταση μιας φωλιάς, διαιρώντας αποτελεσματικά την εργασία μεταξύ των ατόμων, την παροχή τροφής στο πλήθος κ.λ.π. Πολλά από αυτά τα προβλήματα αντιστοιχούν σε ανάλογα που συναντώνται στη μηχανική και την πληροφορική. Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά γνωρίσματα των κοινωνικών εντόμων είναι ότι επιτελούν αυτές τις εργασίες με μεγάλη ευελιξία και προσαρμοστικότητα (*flexibility*), δηλαδή μπορούν να προσαρμόζονται στις εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες, αλλά και με ευρωστία (*robustness*), δηλαδή μπορούν να ολοκληρώσουν οποιαδήποτε συλλογική εργασία ακόμα και αν κάποια άτομα αποτύχουν.

Το μυστικό της «επιτυχημένης» διεκπεραίωσης συλλογικών εργασιών και μάλιστα με βέλτιστο τρόπο βρίσκεται στην αυτο-οργάνωση (*self-organization SO*) των εντόμων. Στα μοντέλα αυτο-οργάνωσης γίνεται η βασική θεώρηση ότι το κάθε άτομο-έντομο είναι ένας απλός «πράκτορας» (*agent*) που μπορεί να διεκπεραιώσει μόνο απλές λειτουργίες. Η θεώρηση αυτή δε λαμβάνει υπόψη την περίπλοκη δομή του μεμονωμένου εντόμου. Για παράδειγμα, στις αποικίες των μυρμηγκιών το βασικό χαρακτηριστικό που λαμβάνουν υπόψη τα μοντέλα αυτο-οργάνωσης είναι ότι τα μυρμήγκια μπορούν να ακολουθήσουν με κάποια πιθανότητα ένα ίχνος φερομόνης και να το ενισχύσουν χωρίς να ενδιαφέρει πώς ανιχνεύεται το ίχνος αυτό, πώς λαμβάνεται η απόφαση από το μυρμήγκι να το ακολουθήσει ή όχι και τέλος με ποιον τρόπο ενισχύει το ήδη υπάρχον ίχνος φερομόνης.

Τα μοντέλα αυτο-οργάνωσης που έχουν αναπτυχθεί με βάση την παραπάνω θεώρηση δείχνουν ότι είναι δυνατόν να εμφανιστούν περίπλοκες συλλογικές συμπεριφορές σε μια αποικία εντόμων. Αναλυτικότερα, η αυτο-οργάνωση [6.41] είναι ένα σύνολο δυναμικών μηχανισμών με τους οποίους σχηματίζονται δομές σε ένα σύστημα από αλληλεπιδράσεις των συνιστωσών του. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές στηρίζονται καθαρά σε τοπικές πληροφορίες χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τους τη συνολική εικόνα.

Η αυτο-οργάνωση χαρακτηρίζεται από τέσσερα βασικά στοιχεία. Τη *θετική ανάδραση*, την *αρνητική ανάδραση*, την *ενίσχυση των τυχαίων διακυμάνσεων* και την *αλληλεπίδραση μεταξύ των συνιστωσών του συστήματος*.

Η θετική ανάδραση³ (*positive feedback*) είναι ένα σύνολο κανόνων το οποίο είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία των βασικών δομών. Κατά τη συγκεκριμένη διεργασία ένα έντομο αντιδρά στην ενεργοποίηση από ένα ερέθισμα (για παράδειγμα εύρεση τροφής ή εντοπισμός ίχνους φερομόνης) φροντίζοντας για την προσέλκυση και άλλων εντόμων ή την ενίσχυση του ερεθίσματος. Γενικά, η θετική ανάδραση περιλαμβάνει δυο μηχανισμούς, τη στρατολόγηση (*recruitment*) και την ενίσχυση (*reinforcement*).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα στρατολόγησης είναι ότι έστω ένα μυρμήγκι εντοπίζει μια τοποθεσία με τροφή. Κατά την επιστροφή του στη φωλιά εναποθέτει φερομόνη στη διαδρομή του σε ποσότητα ανάλογη με την ποιότητα και την ποσότητα της τροφής που έχει εντοπίσει. Το ίχνος αυτό της φερομόνης είναι ανιχνεύσιμο από τα υπόλοιπα μυρμήγκια της αποικίας τα οποία είναι πιθανό να προτιμήσουν να ακολουθήσουν την ίδια διαδρομή με μεγαλύτερη πιθανότητα από μια άλλη νέα τυχαία διαδρομή. Με αυτόν τον τρόπο ένα μυρμήγκι καταφέρνει να «στρατολογήσει» και άλλα μυρμήγκια με σκοπό να εκμεταλλευθούν την ίδια πηγή τροφής (*food source*).

Ο μηχανισμός της ενίσχυσης λειτουργεί στην περίπτωση που το μυρμήγκι εντοπίζει το ίχνος της φερομόνης και με κάποια πιθανότητα αποφασίζει να το ακολουθήσει [6.42]. Αν το ακολουθήσει τότε το ίχνος ενισχύεται, εναποθέτοντας και τη δική του φερομόνη. Με αυτό

³ Η θετική ανάδραση θα πρέπει να χρησιμοποιείται με ιδιαίτερη προσοχή καθώς μπορεί να οδηγήσει σε εγκλωβισμό σε στάσιμες καταστάσεις (*stagnation*). Τέτοιες καταστάσεις υπάρχει περίπτωση να εμφανιστούν σε τοπικά βέλτιστα ή όταν μια αρχική τυχαία λύση δώσει μια πολύ καλή τιμή και εγκλωβίσει τους υπόλοιπους πράκτορες (*agents*) χωρίς να υπάρχει δυνατότητα να ξεφύγουν.

τον τρόπο η διαδρομή ενισχύεται με περισσότερη ποσότητα φερομόνης με αποτέλεσμα να γίνει πιο ελκυστική για τα υπόλοιπα μυρμήγκια.

Η αρνητική ανάδραση (*negative feedback*) αναιρεί τα αποτελέσματα της θετικής ανάδρασης και βοηθάει στη σταθεροποίηση σε κάποια συγκεκριμένη δομή. Η αρνητική ανάδραση μπορεί να μοντελοποιεί:

- την εξάντληση κάποιας πηγής τροφής. Για παράδειγμα, τα μυρμήγκια σταματούν να κατευθύνονται σε μια τοποθεσία στην οποία η τροφή έχει εξαντληθεί και επομένως δεν στρατολογούνται άλλα μυρμήγκια για εκμετάλλευση της περιοχής αυτής.
- την εγκατάλειψη κάποιου μονοπατιού από τα μυρμήγκια. Για παράδειγμα, έχει παρατηρηθεί ότι η φερομόνη που εναποθέτουν τα μυρμήγκια στη διαδρομή τους εξατμίζεται με κάποιο ρυθμό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εγκατάλειψη των διαδρομών που για διάφορους εξωγενείς λόγους⁴ δεν χρησιμοποιούνται συχνά
- τον ανταγωνισμό μεταξύ δύο διαφορετικών πηγών τροφής. Για παράδειγμα, όταν δύο μυρμήγκια έχουν εντοπίσει δύο διαφορετικές πηγές τροφής, κατευθύνονται στη συγκεκριμένη τοποθεσία. Το μυρμήγκι με την καλύτερη ποιοτικά και ποσοτικά πηγή τροφής (εναποθέτοντας ίχνος φερομόνης) «στρατολογεί» και τα περισσότερα μέλη της αποικίας απομακρύνοντας το ενδιαφέρον από την άλλη περιοχή.

Η ενίσχυση των τυχαίων διακυμάνσεων (*amplification of random fluctuations*) είναι εξαιρετικά σημαντική διαδικασία καθώς μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία νέων βελτιωμένων λύσεων ή και ακόμα και της συνολικά βέλτιστης λύσης ξεφεύγοντας ενδεχόμενα από τοπικά βέλτιστες συμπεριφορές. Οι τυχαίοι παράγοντες που υπεισέρχονται στα πραγματικά βιολογικά συστήματα είναι πολλοί και καθοριστικοί. Για παράδειγμα, είναι πολύ πιθανό να χαθεί ένα μυρμήγκι κατά την αναζήτηση και συγκομιδή τροφής και τελικά να ανακαλύψει μια καινούργια καλύτερη πηγή τροφής «στρατολογώντας» και άλλα μέλη της αποικίας του για την εκμετάλλευση της πηγής αυτής.

Τελευταίο από το τέσσερα βασικά στοιχεία της αυτο-οργάνωσης είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ των ατόμων του. Κάθε άτομο-έντομο πρέπει να είναι σε θέση να δημιουργήσει κάποια σταθερή δομή (για παράδειγμα ένα μονοπάτι φερομόνης⁵) αλλά και να ανιχνεύσει της δομές που δημιούργησαν άλλα άτομα της κοινότητάς του. Για να έχει αποτέλεσμα η αλληλεπίδραση θα πρέπει να υπάρχει ένας ελάχιστος πληθυσμός ατόμων-εντόμων, διαφορετικά η εμφάνιση οργανωμένων δομών μέσω της συλλογικής δράσης είναι αδύνατη διότι υπάρχουν τα φαινόμενα αρνητικής ανάδρασης. Έχει ήδη αναφερθεί ότι η φερομόνη εξατμίζεται με κάποιο ρυθμό. Συνεπώς, αν ένα μυρμήγκι δημιουργήσει μια νέα επιτυχημένη διαδρομή αλλά ο πληθυσμός των μυρμηγκιών δεν είναι αρκετός ώστε να ενισχύσει τη διαδρομή αυτή, τότε το νέο αυτό μονοπάτι θα εγκαταλειφθεί.

6.2.3 Στιγμέργια και Συντονισμός

Πολλές φορές τα κοινωνικά έντομα προκειμένου να επιτύχουν τις συλλογικές εργασίες τους πρέπει να επικοινωνήσουν (συντονιστούν) είτε άμεσα είτε έμμεσα. Ο συντονισμός με άμεση επικοινωνία βασίζεται κυρίως στην οπτική ή χημική επαφή των εντόμων και στις ανταλλαγές τροφής ή υγρών μεταξύ των εντόμων. Αντίθετα, ο συντονισμός με έμμεση επικοινωνία βασίζεται στις μεταβολές του περιβάλλοντος από τα έντομα και την ανίχνευση των μεταβολών αυτών από τα ίδια ή άλλα έντομα της αποικίας. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας διεργασίας είναι η εναπόθεση φερομόνης από τα μυρμήγκια στο έδαφος κατά τη μεταφορά τροφής στη φωλιά. Η φερομόνη αυτή είναι εντοπίσιμη και από τα υπόλοιπα μέλη της αποικίας τα οποία δρουν ανάλογα.

⁴ Ανταγωνισμός ή/και πολεμική σύρραξη με άλλη αποικία μυρμηγκιών ή εξάντληση της πηγής τροφής.

⁵ Ως μονοπάτι φερομόνης (*pheromone trail*) ορίζεται κάθε διαδρομή στην οποία έχει εναποτεθεί κάποια ποσότητα φερομόνης από ένα ή/και περισσότερα μυρμήγκια.

Σε αυτή τη διατριβή χρησιμοποιείται ο συντονισμός μέσω έμμεσης αλληλεπίδρασης. Αξιοποιεί μια προσέγγιση εμπνευσμένη από τον τρόπο με τον οποίο οι αποικίες των μυρμηγκιών μεταδίδουν πληροφορίες κατά την αναζήτηση της τροφής τους [6.41]. Η παραπάνω διαδικασία έμμεσης επικοινωνίας των εντόμων χαρακτηρίζεται από τον όρο στιγμεργία (*stigmergy*) [6.43] ο οποίος προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις στίγμα (*stigma*) και έργο (*ergo*) και εισήχθη για πρώτη φορά από τον Grassé στο έργο του για τους τερμίτες *Bellicositermes Natalensis* και *Cubitermes* [6.44]. Βασικά, στο έργο αυτό είχε ορίσει τον όρο στιγμεργία (*stigmergy*) ως εξής: «διέγερση των εργατών⁶ από την απόδοση που έχουν επιτύχει». Ο Grassé παρατήρησε ότι τα έντομα διεγείρονται εκτελώντας μια γενετικά προκαθορισμένη αντίδραση όταν δεχτούν ένα σημαντικό ερέθισμα. Η αντίδραση αυτή μπορεί να αποτελεί ένα νέο σημαντικό ερέθισμα τόσο για το ίδιο το έντομο που την ενεργοποίησε αρχικά όσο και για τα υπόλοιπα μέλη της αποικίας του.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η αλληλεπίδραση των μυρμηγκιών βασίζεται στην ύπαρξη μιας αρωματικής χημικής ουσίας, της φερομόνης. Τα μυρμήγκια εναποθέτουν φερομόνη στο περιβάλλον τους, η οποία παρατηρείται από τα άλλα μυρμήγκια και επηρεάζει την συμπεριφορά τους. Ο μηχανισμός της εναπόθεσης της φερομόνης αποτελείται από δυο κύριες διαδικασίες, εξαρτώμενες από το περιβάλλον στο οποίο τα έντομα βρίσκονται, και είναι η συσσώρευση πληροφοριών (*aggregation*) και η εξάτμιση της παλιάς εναποτιθέμενης φερομόνης (*evaporation*).

Ο μηχανισμός συντονισμού βασίζεται στην συμπεριφορά των μυρμηγκιών κατά την αναζήτηση τροφής. Κατά τη διάρκεια της αναζήτησης τροφής, τα μυρμήγκια ακολουθούν μια απλή διαδικασία κατά την οποία η συμπεριφορά τους επηρεάζεται από ένα μόνιμα μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Τα μυρμήγκια αναζητούν την τροφή τους σύμφωνα με το παρακάτω τρόπο:

- όταν δεν υπάρχουν ίχνη φερομόνης στο περιβάλλον, τα μυρμήγκια πραγματοποιούν μια τυχαία αναζήτηση τροφής.
- όταν ένα μυρμήγκι ανακαλύψει μια πηγή τροφής, εναποθέτει μια χημική αρωματική ουσία (φερομόνη) κατά την επιστροφή στην φωλιά και με αυτό το τρόπο δημιουργεί ένα μονοπάτι φερομόνης ανάμεσα στη φωλιά και στην πηγή τροφής. Αυτή η φερομόνη θα εξατμιστεί αν κάποιο άλλο μυρμήγκι δεν εναποθέσει νέες ποσότητες φερομόνης.
- όταν ένα μυρμήγκι ανιχνεύσει τα ίχνη της φερομόνης, θα οδηγηθεί από το ένστικτό του και θα τα ακολουθήσει μέχρι την πηγή τροφής. Εντούτοις, υπάρχει μια μικρή πιθανότητα το μυρμήγκι να μην ακολουθήσει τα ίχνη φερομόνης. Όταν φτάσει στην πηγή τροφής, ενισχύει και ανανεώνει το μονοπάτι φερομόνης κατά την επιστροφή του στην φωλιά.

Κύριες ιδιότητες του παραπάνω μηχανισμού είναι η εξάτμιση της φερομόνης, διαδικασία που κάνει την αποικία να ξεχάσει τις πληροφορίες που δεν ισχύουν πια και ότι το περιβάλλον επαναχρησιμοποιείται (δεν υπάρχουν χάρτες στους εγκέφαλους των μυρμηγκιών). Αξιοσημείωτο είναι ότι η παρουσία του μονοπατιού φερομόνης αυξάνει την πιθανότητα τα μυρμήγκια να βρουν την πηγή τροφής, και να ξαναενισχύσουν το μονοπάτι κατά την επιστροφή τους πίσω στην φωλιά. Μια τέτοια ενέργεια αυτο-ενίσχυσης φαίνεται να είναι μια απαραίτητη ιδιότητα για αποτελεσματική ανερχόμενη συμπεριφορά.

Τέλος, θα πρέπει να επισημανθεί ότι η στιγμεργετική επικοινωνία συμβάλλει στην ευελιξία ή/και προσαρμοστικότητα του συστήματος στο περιβάλλον. Κάθε εξωγενής αλλαγή στις παραμέτρους του περιβάλλοντος μπορεί να ληφθεί από τα άτομα της αποικίας ως ενδογενής αλλαγή από κάποια άλλα άτομα της αποικίας και να αντιμετωπισθεί ανάλογα.

6.2.4 Αναζήτηση και Συγκομιδή Τροφής στις Αποικίες Μυρμηγκιών

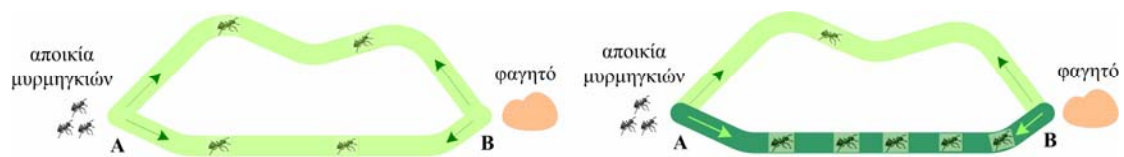
Έχει ήδη αναφερθεί ότι τα μυρμήγκια έχουν τη δυνατότητα να δημιουργούν μονοπάτια με φερομόνη (*pheromone trails*) όταν ψάχνουν για τοποθεσίες με τροφή ή όταν επιστρέφουν

⁶ Οι εργάτες (*workers*) είναι μια από τις κοινωνικές τάξεις (*castes*) των τερμιτών, οι άλλες δύο είναι οι πολεμιστές (*warriors*) και η τάξη που ασχολείται με την αναπαραγωγή (*reproductives*).

στη φωλιά μεταφέροντας τροφή ή και τα δύο ανάλογα με το είδος του μυρμηγκιού [6.45]. Τα άλλα μυρμήγκια της αποικίας έχουν τη δυνατότητα να ανιχνεύουν τα μονοπάτια αυτά και να αποφασίσουν με κάποια πιθανότητα αν θα τα ακολουθήσουν.

Η διαδικασία κατά την οποία τα μυρμήγκια προτρέπονται από κάποια άλλα να εκμεταλλευτούν μια συγκεκριμένη πηγή τροφής ονομάζεται στρατολόγηση (*recruitment*). Όταν αυτή η διαδικασία βασίζεται μόνο σε χημικά ίχνη (φερομόνη) τότε ονομάζεται μαζική στρατολόγηση (*mass recruitment*).

Γενικά, η διαδικασία δημιουργίας βέλτιστης διαδρομής μεταξύ δύο σημείων έχει ως εξής (Σχήμα 6.1): έστω δύο σημεία A (τοποθεσία τροφής) και B (τοποθεσία φωλιάς) που συνδέονται με δύο διαδρομές, μια μικρού και μια μεγάλου μήκους και έστω ότι τα μυρμήγκια πρόκειται να κινηθούν μεταξύ αυτών των δύο σημείων. Τα μυρμήγκια ξεκινώντας την πορεία τους επιλέγουν μια από τις δύο διαδρομές εντελώς τυχαία. Όταν τα μυρμήγκια που έχουν φτάσει στην τροφή μέσω της σύντομης διαδρομής πρόκειται να επιστρέψουν στη φωλιά, τότε χρησιμοποιούν και πάλι τη σύντομη διαδρομή καθώς αυτή είναι εμπλουτισμένη με τη φερομόνη που έχουν ήδη εναποθέσει. Επιπλέον, τα μυρμήγκια που φτάνουν στην τροφή έχοντας ακολουθήσει τη μεγάλη διαδρομή όταν πρόκειται να αποφασίσουν ποια πορεία θα επιλέξουν για την επιστροφή τους θα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να επιλέξουν τη σύντομη διαδρομή η οποία και θα έχει περισσότερη φερομόνη (αν αγνοήσουμε το ότι μπορεί να διαθέτουν και περιορισμένη μνήμη ή και άλλες μεθόδους προσανατολισμού). Προφανώς, τα νέα μυρμήγκια που ξεκινούν από τη φωλιά θα επιλέγουν με μεγαλύτερη πιθανότητα τη μικρού μήκους διαδρομή. Τελικά, με αυτόν τον τρόπο, δηλαδή με τη βοήθεια της θετικής ανάδρασης (εναπόθεση φερομόνης), τα μυρμήγκια επιτυγχάνουν να επιλέξουν την συντομότερη (βέλτιστη) διαδρομή.



Σχήμα 6.1 Τα μυρμήγκια κινούνται από το Α στο Β και αντίστροφα. Όταν φτάσουν στη διακλάδωση Α ή Β θα πρέπει να επιλέξουν μεταξύ της μικρής και της μεγάλης διαδρομής. Η επιλογή γίνεται τυχαία καθώς και στις δυο διαδρομές δεν υπάρχει φερομόνη (αριστερό σχήμα, αρχική κατάσταση). Στο δεξιό σχήμα (τελική κατάσταση), η έντονη πράσινη γραμμή δείχνει την κατανομή των επιπέδων της φερομόνης αφού τα μυρμήγκια που επέλεξαν τη σύντομη διαδρομή ολοκληρώσουν την μετακίνηση από το Α στο Β και αντίστροφα. Είναι φανερό ότι τα νέα μυρμήγκια που θα φτάσουν στη διακλάδωση Α ή Β θα επιλέξουν τη σύντομη διαδρομή με μεγαλύτερη πιθανότητα.

Ο Deneubourg με τους συνεργάτες του πραγματοποίησαν μια σειρά πειραμάτων [6.45] με τα οποία αποδεικνύουν πειραματικά την παραπάνω διαδικασία και μάλιστα καταλήγουν και σε κάποια θεωρητικά μοντέλα τα οποία και επιβεβαιώνουν με προσομοιώσεις Monte-Carlo.

6.2.5 Από τα Πραγματικά στα «Ψηφιακά» Μυρμήγκια

Προκειμένου να μετατραπούν τα φυσικά βιολογικά μοντέλα σε τεχνητά «αλγοριθμικά», δηλαδή σε υπολογιστικά εργαλεία για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης, πραγματοποιούνται ορισμένες παραδοχές. Προφανώς, τα «ψηφιακά» μυρμήγκια αποτελούν μια απλοποίηση των πραγματικών μυρμηγκιών, εμπλουτισμένα με επιπρόσθετες ιδιότητες που δεν εμφανίζονται στα φυσικά μυρμήγκια, οι οποίες καθορίζονται συνήθως από το αντίστοιχο πρόβλημα προς λύση ή από τις ανάγκες του χρήστη για γρήγορη σύγκλιση.

Οι ομοιότητες των «ψηφιακών» μυρμηγκιών με τα φυσικά έχουν ως εξής [6.46]:

- **η αποικία:** Όπως στα φυσικά μυρμήγκια έτσι και στα «ψηφιακά» υπάρχει μια αποικία ατόμων τα οποία συνεργάζονται προκειμένου να δημιουργήσουν μια συγκεκριμένη δομή στο σύστημα τους. Η δομή αυτή στα υπό μελέτη προβλήματα στην παρούσα εργασία

αντιστοιχεί στην εύρεση βέλτιστης λύσης. Ο πληθυσμός των «ψηφιακών» μυρμηγκιών είναι μια παράμετρος η οποία είναι σε άμεση συνάρτηση με το είδος του προβλήματος.

- **η φερομόνη:** Ορισμένες «ποικιλίες» πραγματικών μυρμηγκιών εναποθέτουν φερομόνη στο έδαφος κατά την κίνησή τους. Ομοίως και τα «ψηφιακά» μυρμήγκια θα εναποθέτουν στις διάφορες θέσεις τις οποίες επισκέπτονται μια συγκεκριμένη αριθμητική πληροφορία, την «ψηφιακή» φερομόνη, οπότε και θα δημιουργούνται μονοπάτια φερομόνης (*pheromone trails*). Αυτή η αριθμητική πληροφορία θα εξαρτάται από την επίδοση (δηλαδή όπως έχει ήδη αναφερθεί υπάρχουν ποικιλίες μυρμηγκιών που εναποθέτουν φερομόνη ανάλογα με την ποσότητα και την ποιότητα της τροφής που έχουν εντοπίσει) και την προηγούμενη ιστορία του «ψηφιακού» μυρμηγκιού και θα είναι προσβάσιμη και από τα υπόλοιπα μέλη της αποικίας εγκαθιδρύοντας με αυτόν τον τρόπο στιγμεργετική (*stigmergetic*) επικοινωνία. Τέλος, η «ψηφιακή» φερομόνη όπως και η τεχνητή θα πρέπει να υφίσταται εξάτμιση έτσι ώστε να υπάρχει αρνητική ανάδραση και να μην εγκλωβίζονται τα άτομα σε τοπικά βέλτιστα.
- **η απόφαση:** Όπως τα φυσικά έτσι και τα «ψηφιακά» μυρμήγκια αποφασίζουν την επόμενη κίνησή τους με κάποια στοχαστικότητα. Τα δεδομένα που έχουν στη διάθεσή τους είναι καθαρά τοπικά στο χώρο και το χρόνο. Αναλυτικότερα, τα μυρμήγκια, είτε πραγματικά είτε «ψηφιακά», δεν έχουν γνώση του τι συμβαίνει σε κάποιο άλλο σημείο όπου δραστηριοποιούνται μυρμήγκια τις αποικίας αλλά ούτε και τη γενικότερη κατάσταση της αποικίας. Επίσης, δεν γνωρίζουν τι έγινε τις προηγούμενες χρονικές στιγμές στο σημείο όπου βρίσκονται αλλά ούτε μπορούν να προβλέψουν μελλοντικές καταστάσεις.

Τα τοπικά δεδομένα θα μπορούσαν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: (α) τα δεδομένα που είναι γνωστά εκ των προτέρων (για παράδειγμα στο φυσικό μοντέλο η μορφολογία του εδάφους ενώ στο ψηφιακό η ευρετική πληροφορία – *heuristic information*) και (β) τα δεδομένα από τις τοπικές αλλαγές στο περιβάλλον (για παράδειγμα τα μονοπάτια φερομόνης).

Επίσης, τα τεχνητά μυρμήγκια έχουν μερικά χαρακτηριστικά που δεν τα έχουν τα πραγματικά μυρμήγκια:

- Τα τεχνητά μυρμήγκια ζουν σε διακριτό κόσμο και οι κινήσεις τους συνίστανται σε μεταβάσεις από διακριτές σε διακριτές θέσεις.
- Τα τεχνητά μυρμήγκια έχουν μια εσωτερική θέση (*internal state*). Αυτή η ιδιωτική θέση αποτελεί την μνήμη του μυρμηγκιού για προηγούμενες δράσεις του.
- Τα τεχνητά μυρμήγκια εναποθέτουν μια ποσότητα φερομόνης η οποία είναι συνάρτηση της ποιότητας λύσης του προβλήματος.
- Ο τεχνητός συγχρονισμός των μυρμηγκιών στην εναπόθεση της φερομόνης είναι ένα εξαρτώμενο πρόβλημα και δεν αντανάκλα τη συμπεριφορά των πραγματικών μυρμηγκιών. Για παράδειγμα, σε μερικές περιπτώσεις, τα τεχνητά μυρμήγκια ενημερώνουν τα ίχνη φερομόνης μόνο μετά την παραγωγή μιας λύσης.
- Για να βελτιωθεί η αποδοτικότητα των αλγορίθμων ACO, μπορούν να εμπλουτιστούν με πρόσθετες ικανότητες, όπως ύπαρξη «όρασης», τοπική βελτιστοποίηση, πράγματα που δεν συναντώνται στα πραγματικά μυρμήγκια.
- Τέλος, μια επιπλέον βασική διαφορά των τεχνητών μυρμηγκιών από τα πραγματικά μυρμήγκια είναι ότι εναποθέτουν φερομόνη όταν ολοκληρώσουν τα ταξίδια τους ενώ τα πραγματικά μυρμήγκια εναποθέτουν συνεχώς φερομόνη.

Ο Deneubourg θέλοντας να επιβεβαιώσει τα αποτελέσματα των πειραμάτων του δημιούργησε ένα μαθηματικό μοντέλο [6.14] της συμπεριφοράς των πραγματικών μυρμηγκιών του οποίου οι εξισώσεις διέπουν την απόφαση της επιλογή μιας εκ των δύο διαδρομών σε μια διακλάδωση (Σχήμα 6.1).

Έστω L_i και R_i τα μυρμήγκια που έχουν επιλέξει την αριστερή και τη δεξιά διαδρομή αντίστοιχα μετά το πέρας της κίνησης του i -οστού μυρμηγκιού (δηλαδή $i = L_i + R_i$ ο συνολικός αριθμός των μυρμηγκιών που έχουν περάσει το σημείο επιλογής διακλάδωσης Α - Σχήμα 6.1). Τότε η πιθανότητα P_L το επόμενο μυρμήγκι ($i+1$) να επιλέξει την αριστερή διαδρομή δίνεται από τη σχέση:

$$P_L = \frac{(k + L_i)^n}{(k + L_i)^n + (k + R_i)^n} = 1 - P_R \quad (6.1)$$

όπου n η παράμετρος που καθορίζει το βαθμό μη γραμμικότητας της συνάρτησης επιλογής, k η παράμετρος που ποσοτικοποιεί το βαθμό ελκυστικότητας μιας διαδρομής που δεν έχει εναποτεθεί φερομόνη. Να σημειωθεί ότι όσο μεγαλύτερη τιμή του n συνεπάγεται τόσο μικρότερη διαφοροποίηση στα επίπεδα φερομόνης στις δύο διαδρομές αυξάνει κατά πολύ την πιθανότητα επιλογής ενός κλάδου εκ των δύο από το επόμενο μυρμήγκι καθώς επίσης και όσο μεγαλύτερη τιμή έχει η παράμετρος k τόσο μεγαλύτερη ποσότητα φερομόνης απαιτείται ώστε η επιλογή ενός κλάδου να μην είναι πλέον τυχαία.

Η επιλογή μιας εκ των διακλαδώσεων γίνεται ως εξής:

$$L_{i+1} = \begin{cases} L_i + 1, & \alpha\nu \delta \leq P_L \\ L_i, & \alpha\nu \delta > P_L \end{cases} \quad \text{και} \quad R_{i+1} = \begin{cases} R_i + 1, & \alpha\nu \delta > P_L \\ R_i, & \alpha\nu \delta \leq P_L \end{cases} \quad (6.2)$$

όπου δ είναι μια τυχαία μεταβλητή ομοιόμορφα κατανεμημένη στο διάστημα $[0, 1]$.

Ενδεικτικά θα αναφέρουμε ότι στο [6.45] χρησιμοποιούνται οι παράμετροι $n=2$ και $k=20$. Οι παράμετροι αυτές μετά από προσομοιώσεις με τη μέθοδο Monte-Carlo έδωσαν αποτελέσματα που είναι σε πλήρη αρμονία με τα πειραματικά.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην (6.1) καθώς θα χρησιμοποιηθεί παρακάτω σε μια διαφορετική μορφή για την υλοποίηση των αλγορίθμων που βασίζονται στις αποικίες των μυρμηγκιών (*Ant Colony Optimization*).

6.2.6 Ο Αλγόριθμος των Μυρμηγκιών *Ant System (AS)*

Ο αλγόριθμος *Ant System (AS)* είναι πρόγονος όλων των ερευνητικών προσπαθειών που αφορούν τους αλγόριθμους μυρμηγκιών, και εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στο TSP [6.37]. Οι αλγόριθμοι τους οποίους οι ερευνητές εμπνεύστηκαν από τον AS εμφανίστηκαν σαν ευρετικές μέθοδοι οι οποίες βοηθούν στην επίλυση συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Ο AS είναι ένας αλγόριθμος στον οποίο ένα σύνολο τεχνητών μυρμηγκιών συνεργάζονται για την επίλυση ενός προβλήματος, ανταλλάσσοντας πληροφορίες μέσω της φερομόνης που εναποθέτουν στο γράφημα. Τα κύρια χαρακτηριστικά του AS είναι: 1) ακολουθείται η θετική ανάδραση (επιτρέπει τη γρήγορη εύρεση των καλών λύσεων), 2) βασίζεται στον κατανεμημένο υπολογισμό (αποφεύγεται η πρόωρη σύγκλιση), 3) χρησιμοποιεί μια εποικοδομητική άπληστη (*greedy*) ευρετική συνάρτηση (που βοηθά στην εύρεση αποδεκτών λύσεων), και 4) είναι μια βασισμένη στον πληθυσμό προσέγγιση.

Αναλυτικότερα, η λειτουργία του αλγόριθμου AS είναι η ακόλουθη: τα τεχνητά μυρμήγκια μια αποικίας κινούνται, ταυτόχρονα και ακανόνιστα, προς γειτονικές καταστάσεις ενός προβλήματος, οι οποίες αναπαριστώνται με τη μορφή ενός γραφήματος με βάρη. Η συγκεκριμένη κίνηση (επιλογή) πραγματοποιείται με βάση ένα τυχαίο - αναλογικό κανόνα μετάβασης (*random proportional transition rule*), μέσω ενός στοχαστικού μηχανισμού. Κάθε μυρμήγκι k που βρίσκεται στον κόμβο i και μέχρι τη συγκεκριμένη στιγμή έχει εντοπισθεί η μερική λύση s^p , η πιθανότητα να μεταβεί στον κόμβο j δίνεται από η σχέση:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) + n_{ij}^\beta(t)}{\sum_{c_{il} \in N(s^p)} \tau_{il}^\alpha(t) + n_{il}^\beta(t)}, & \text{εάν } c_{ij} \in N(s^p) \\ 0 & , \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (6.3)$$

όπου

- $N(s^p)$ είναι το σύνολο των εφικτών μεταβάσεων (κόμβων) όταν το μυρμήγκι βρίσκεται στον κόμβο i (για παράδειγμα, μετάβαση (i,l) όπου l είναι ο κόμβος που θα μεταβεί το μυρμήγκι k) (*tabu list*).
- τ_{ij} είναι η ποσότητα της φερομόνης που τοποθετείται στο τόξο που συνδέει τους κόμβους i και j και αντιπροσωπεύει την προτίμηση της επιλογής του κόμβου j όταν το μυρμήγκι βρίσκεται στον κόμβο i . Οι πληροφορίες από τα ίχνη φερομόνης αλλάζουν κατά την λύση του προβλήματος για να απεικονίζουν την εμπειρία που αποκτούν τα μυρμήγκια κατά την επίλυση του προβλήματος. Τα μυρμήγκια εναποθέτουν ποσότητα φερομόνης ανάλογα με την ποιότητα των λύσεων που παράγονται: όσο πιο σύντομες είναι οι διαδρομές που σχηματίζονται από ένα μυρμήγκι, τόσο μεγαλύτερο ποσό φερομόνης αυτό εναποθέτει στα τόξα που χρησιμοποίησε για να σχηματίσει τη διαδρομή.
- n_{ij} είναι η ορατότητα (*visibility*) και ορίζεται ως το αντίστροφο της απόστασης μεταξύ των κόμβων i και j :

$$n_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \quad (6.4)$$

Η ορατότητα εκφράζει την ευρετική προτίμηση (*heuristic desirability*) του κόμβου j ως επόμενου σταθμού του μυρμηγκιού k όταν αυτό βρίσκεται στον κόμβο i και βασίζεται καθαρά σε τοπικές πληροφορίες.

- α , β είναι παράμετροι που καθορίζονται από τον χρήστη και εξαρτώνται από το πρόβλημα προς επίλυση. Αν το $\alpha=0$, τότε είναι πιθανότερο να επιλεγούν οι πιο κοντινοί κόμβοι με τον αλγόριθμο να μην χρησιμοποιεί την εμπειρία της αποικίας (δηλαδή τη φερομόνη) και επομένως εκφυλλίζεται σε έναν πρακτικό στοχαστικό (*greedy stochastic*) αλγόριθμο με πολλαπλά σημεία εκκίνησης, αφού κάθε μυρμήγκι ξεκινάει το ταξίδι του από διαφορετικό κόμβο. Αν το $\beta=0$, τότε μόνο η ενίσχυση της φερομόνης είναι σε λειτουργία, οπότε η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης στηρίζεται μόνο στη θετική ανάδραση και όπως έχει ήδη αναφερθεί (§6.2.2) ο αλγόριθμος θα συγκλίνει γρήγορα σε τοπικά βέλτιστα. Αυτή η επιλογή θα οδηγήσει στην γρήγορη εμφάνιση στασιμότητας, μιας κατάστασης όπου όλα τα μυρμήγκια κάνουν την ίδια διαδρομή, η οποία είναι κατά πολύ κατώτερη της βέλτιστης [6.15].

Σημαντικός παράγοντας στην όλη διαδικασία είναι και η αρνητική ανάδραση η οποία υλοποιείται με την εξάτμιση της φερομόνης. Κατά αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η ενίσχυση των αρχικών τυχαίων διακυμάνσεων. Στον AS ο κανόνας της συνολικής εναπόθεσης (ανανέωσης) της φερομόνης την χρονική στιγμή t , εφαρμόζεται ως εξής: όταν το μυρμήγκι k ολοκληρώσει την διαδρομή του, κατά την επανάληψη $t+1$, η φερομόνη που εναποτίθεται ανάλογα σε όλα τα τόξα είναι (κανόνας ανανέωσης της φερομόνης – *pheromone update rule*):

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (6.5)$$

όπου ρ ο συντελεστής εξάτμισης της φερομόνης και ο οποίος λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0,1)$, $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ είναι η ποσότητα της φερομόνης, ανά μονάδα μήκους, που εναποτίθεται στο τόξο (i,j) από το μυρμήγκι k μεταξύ των χρονικών στιγμών t και $t+1$, και δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k(t)}, & \text{αν } (i,j) \in T^k(t) \\ 0, & \text{αν } (i,j) \notin T^k(t) \end{cases} \quad (6.6)$$

όπου $T^k(t)$ είναι διαδρομή (ταξίδι) του μυρμηγκιού k κατά την επανάληψη t , $L_k(t)$ είναι το συνολικό μήκος της διαδρομής $T_k(t)$ και Q είναι μια παράμετρος που καθορίζεται από τον

χρήστη η οποία δε διαφοροποιεί την απόδοση του αλγορίθμου (σε βελτιωμένες εκδόσεις του AS παραλείπεται).

Από την (6.6) προκύπτει ότι η ποσότητα της προστιθέμενης φερομόνης είναι αντιστρόφως ανάλογη της διανυόμενης απόστασης. Οπότε, συντομότερες διαδρομές είναι πιο ελκυστικές.

Έχουν διατυπωθεί αρκετές διαφορετικές εκδοχές για την βελτίωση του κλασικού αλγορίθμου AS [6.47]. Σε δύο από αυτές υπάρχουν αλγόριθμοι που εξαρτώνται από την πυκνότητα (*ant-density*) και την ποσότητα (*ant-quantity*) των μυρμηγκιών αντίστοιχα. Αυτές διαφέρουν ως προς τον τρόπο ενημέρωσης (ανανέωσης) της φερομόνης. Σε αυτά τα μοντέλα κάθε μυρμήγκι εναποθέτει το ίχνος του σε κάθε βήμα, χωρίς να περιμένει το τέλος της διαδρομής. Στο μοντέλο που εξαρτάται από την πυκνότητα των μυρμηγκιών μια ποσότητα Q φερομόνης εναποτίθεται στο τόξο (i, j) κάθε φορά που το μυρμήγκι πηγαίνει από τον κόμβο i στον κόμβο j . Στο μοντέλο που εξαρτάται από την ποσότητα των μυρμηγκιών, το μυρμήγκι εναποθέτει ποσότητα Q/d_{ij} ίχνους φερομόνης στο τόξο (i, j) κάθε φορά που κατευθύνεται από τον κόμβο i στον κόμβο j .

Για την επιτυχή επίλυση του προβλήματος επιλογής μεγέθους μετασχηματιστών χρησιμοποιείται ο ελιτιστικός αλγόριθμος EAS. Η έννοια του ελιτισμού χρησιμοποιείται στους εξελικτικούς αλγορίθμους. Ο Dorigo και συνεργάτες [6.16] αναπαρήγαγε και προσάρμοσε κατάλληλα αυτήν την ιδέα, στον αλγόριθμο AS με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί ο αλγόριθμος των «εκλεκτών μυρμηγκιών» (*elitist ants*), EAS. Η λειτουργία του κανόνα ενημέρωσης φερομόνης στον αλγόριθμο EAS βασίζεται στην ιδέα ότι ένας επιπλέον αριθμός μυρμηγκιών, «εκλεκτών μυρμηγκιών» e , ενισχύει τη βέλτιστη διαδρομή T_{best} που έχει βρεθεί έως και την τρέχουσα επανάληψη t με επιπλέον φερομόνη ίση με eQ/L_{best} . Η εξίσωση ενημέρωσης φερομόνης στον αλγόριθμο EAS είναι:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(t) + \varepsilon \cdot \Delta \tau_{ij}^{elite} \quad (6.7)$$

όπου:

$$\Delta \tau_{ij}^{elite}(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_{best}(t)}, & av(i, j) \in T_{best}(t) \\ 0 & , av(i, j) \notin T_{best}(t) \end{cases} \quad (6.8)$$

με $L_{best}(t)$ το μήκος της ολικά βέλτιστης διαδρομής μέχρι τη χρονική στιγμή t και $T_{best}(t)$ η αντίστοιχη σειρά των πόλεων.

Ο AS λόγω της ευελιξίας του φυσικού μοντέλου στο οποίο βασίζεται είναι ευπροσάρμοστος. Το γεγονός αυτό τον κάνει άμεσα αξιοποιήσιμο σε δυναμικώς μεταβαλλόμενα προβλήματα, δηλαδή σε προβλήματα στα οποία η ευρετική πληροφορία (ορατότητα) μεταβάλλεται.

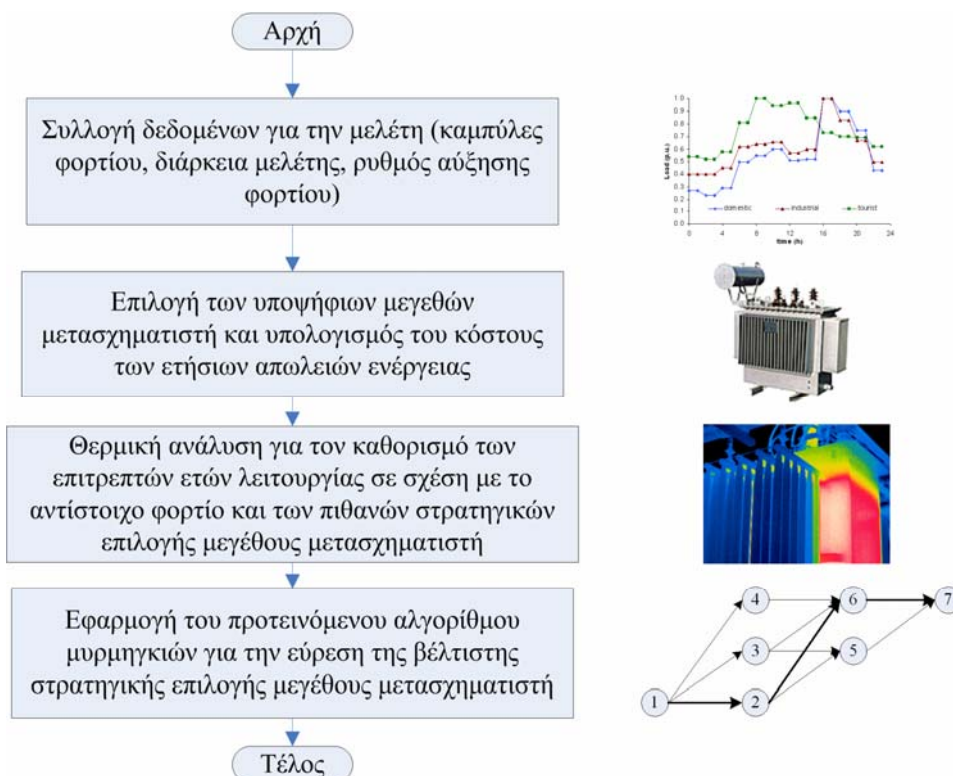
6.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΩΝ ΜΥΡΜΗΓΚΙΩΝ

6.3.1 Σύνοψη Προτεινόμενης Μεθοδολογίας

Το πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής μεγέθους του μετασχηματιστή συνίσταται στον προσδιορισμό κατάλληλων μεγεθών ονομαστικής ισχύος και τεχνικών χαρακτηριστικών των μετασχηματιστών που πρόκειται να εγκατασταθούν στο δίκτυο διανομής, έτσι ώστε το συνολικό κόστος εγκατάστασης και ενέργειας απωλειών κατά τη διάρκεια της μελέτης να ελαχίστο, ικανοποιώντας σε κάθε έτος την αιχμή του εξυπηρετούμενου φορτίου.

Λόγω των χαρακτηριστικών του παραπάνω προβλήματος, τα οποία αναλύθηκαν και στην εισαγωγή, επιλέχθηκε η μέθοδος ACO για την επίλυσή του, βασισμένη στον ελιτιστικό αλγόριθμο αποικίας μυρμηγκιών (EAS). Αρχικά πραγματοποιήθηκε προσπάθεια επίλυσης του προβλήματος βέλτιστης επιλογής μεγέθους ενός μετασχηματιστή σε συγκεκριμένο σημείο του δικτύου και για δεδομένο φορτίο [6.48] με χρήση του παραπάνω αλγορίθμου και

θεωρώντας, για απλοποίηση του προβλήματος, σταθερούς οικονομικούς παράγοντες (για παράδειγμα λαμβάνοντας μία σταθερή μέση τιμή κόστους ενέργειας κατά τη διάρκεια της μελέτης). Στη συνέχεια, η μέθοδος επεκτάθηκε και βελτιώθηκε για την αντιμετώπιση ρεαλιστικών προβλημάτων επιλογής της ονομαστικής ισχύος ενός πλήθους μετασχηματιστών προς εγκατάσταση σε ένα πραγματικό δίκτυο διανομής, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις μεταβολές οικονομικών και τεχνικών παραγόντων κατά τη διάρκεια της θεωρούμενης μελέτης, προτείνοντας με αυτόν τον τρόπο μια ολοκληρωμένη καινοτομική τεχνική [6.49], η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.



Σχήμα 6.2 Διάγραμμα ροής των κυρίων βημάτων της προτεινόμενης τεχνικής.

Η διαδικασία που ακολουθείται για τη βέλτιστη επιλογή μεγέθους μετασχηματιστή (Σχήμα 6.2), αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

- Συλλογή δεδομένων που αφορούν τα ειδικά χαρακτηριστικά του φορτίου κάθε υποσταθμού του αντίστοιχου δικτύου. Τα συγκεκριμένα δεδομένα αποτελούνται από την τυπική καμπύλη φορτίου και τον αναμενόμενο ρυθμό αύξησης φορτίου κατά τη διάρκεια της μελέτης.
- Επιλογή των υποψήφιων μετασχηματιστών διαφορετικού μεγέθους σύμφωνα με τα τυποποιημένα μεγέθη μετασχηματιστών, αν και μη τυποποιημένα μεγέθη μπορούν να ληφθούν υπόψη.
- Προσδιορισμός των επιτρεπόμενων ετών για κάθε υποψήφιο μετασχηματιστή που πρόκειται να εξυπηρετήσει συγκεκριμένο φορτίο κάθε υποσταθμού, βάσει θερμικών υπολογισμών φόρτισης (§6.3.2).
- Προσδιορισμός των πιθανών στρατηγικών επιλογής μεγέθους μετασχηματιστή (ανά υποσταθμό) κατά τη διάρκεια μιας μελέτης, οι οποίες αποτελούνται από το συνδυασμό των υποψήφιων μετασχηματιστών διαφορετικού μεγέθους και τα χρόνια τα οποία μπορούν λειτουργήσουν προκειμένου να εξυπηρετήσουν συγκεκριμένο φορτίο.

- Υπολογισμός του κόστους απωλειών ενέργειας για κάθε μετασχηματιστή (βάσει της μεθόδου που παρουσιάζεται στην §6.3.3) του δικτύου για τις περιόδους που έχουν καθοριστεί από τις στρατηγικές του προηγούμενου βήματος.
- Δημιουργία του γραφήματος με όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των διαφορετικών διαδρομών επιλογής μεγέθους μετασχηματιστών και ετών εγκατάστασης και/ή αντικατάστασης, για την επίλυση του προβλήματος επιλογής μεγέθους μετασχηματιστή χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο των ελιτιστικών μυρμηγκιών EAS, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στις §6.2 και §6.3.4, για κάθε υποσταθμό του δικτύου διανομής που μελετάται.
- Επιλογή μεγέθους μετασχηματιστή σύμφωνα με τη συντομότερη (άρα και μικρότερη σε κόστος) διαδρομή ανά υποσταθμό, χρησιμοποιώντας τον προτεινόμενο αλγόριθμο EAS. Το συγκεκριμένο μονοπάτι αντιστοιχεί στη βέλτιστη επιλογή μεγέθους μετασχηματιστή.

6.3.2 Υπολογισμοί Θερμικής Φόρτισης Μετασχηματιστή

Ο υπολογισμός της θερμικής φόρτισης του μετασχηματιστή υλοποιείται σύμφωνα με τις οδηγίες που επιβάλλονται από το πρότυπο IEEE C57.91-1995 [6.50]. Το συγκεκριμένο πρότυπο περιγράφει τον υπολογισμό της ανώτατης θερμοκρασίας λαδιού και τυλιγμάτων μετασχηματιστή κατά τη διάρκεια δεδομένου κύκλου φόρτισης. Η μεθοδολογία παρέχει το αποτέλεσμα της υψηλότερης θερμοκρασίας των τυλιγμάτων (*winding hottest-spot temperature*)⁷, το οποίο δεν πρέπει να υπερβαίνει την μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία, η οποία ορίζεται στους 140 °C βάσει του προτύπου [6.50]. Οι κύριες εξισώσεις που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται παρακάτω (όλες οι θερμοκρασίες εκφράζονται σε °C).

▪ Υπολογισμός Ανώτατης Θερμοκρασίας Λαδιού

Αρχικά είναι αναγκαίο να δοθεί ο ορισμός της ανώτατης θερμοκρασίας λαδιού, η οποία αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του ανώτατου στρώματος λαδιού στο εσωτερικό του δοχείου του μετασχηματιστή και το οποίο λαμβάνεται 50 mm κάτω από την επιφάνεια λαδιού [6.51]. Σύμφωνα με το πρότυπο [6.50], η ανύψωση της ανώτατης θερμοκρασίας λαδιού (*top-oil temperature rise*)⁸ $\Delta\Theta_{TO}$ μετά από μία βηματική μεταβολή του φορτίου, δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta\Theta_{TO} = (\Delta\Theta_{TO,U} - \Delta\Theta_{TO,i}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau_{TO}}}\right) + \Delta\Theta_{TO,i} \quad (6.9)$$

όπου $\Delta\Theta_{TO,i}$ και $\Delta\Theta_{TO,U}$ είναι η αρχική και η τελική ανύψωση ανώτατης θερμοκρασίας λαδιού σε σχέση με την θερμοκρασία περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου, ενώ τ_{TO} είναι η σταθερά χρόνου του λαδιού (σε ώρες) για το υπό μελέτη φορτίο, η οποία συσχετίζεται με την τιμή της σταθεράς χρόνου που αντιστοιχεί σε ονομαστικό φορτίο $\tau_{TO,R}$ σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\tau_{TO} = \tau_{TO,R} \frac{\left(\frac{\Delta\Theta_{TO,U}}{\Delta\Theta_{TO,R}}\right) - \left(\frac{\Delta\Theta_{TO,i}}{\Delta\Theta_{TO,R}}\right)}{\left(\frac{\Delta\Theta_{TO,U}}{\Delta\Theta_{TO,R}}\right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{\Delta\Theta_{TO,i}}{\Delta\Theta_{TO,R}}\right)^{\frac{1}{n}}} \quad (6.10)$$

όπου n είναι ένας εμπειρικός εκθέτης ίσος με την τιμή 0.8 για τους μετασχηματιστές φυσικής ροής λαδιού (*self-cooled transformers*) και $\Delta\Theta_{TO,R}$ είναι η ανύψωση ανώτατης θερμοκρασίας

⁷ Η υψηλότερη θερμοκρασία εσωτερικά των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή, η οποία είναι μεγαλύτερη από την μέση υπολογιζόμενη θερμοκρασία των τυλιγμάτων.

⁸ Η αριθμητική διαφορά μεταξύ της ανώτατης θερμοκρασίας λαδιού και της εξωτερικής θερμοκρασίας (θερμοκρασίας περιβάλλοντος).

λαδιού που αντιστοιχεί σε ονομαστικό φορτίο (ίση με 60 °C για τους μετασχηματιστές διανομής).

Η σταθερά χρόνου του ονομαστικού φορτίου $\tau_{TO,R}$ είναι συνάρτηση του βάρους του ενεργού μέρους του μετασχηματιστή WCC (σε kg), του βάρους του δοχείου και των εξαρτημάτων του WT (σε kg), του όγκου του λαδιού VO (σε lt), της ανώτατης αύξησης της θερμοκρασίας λαδιού (*top-oil temperature rise*) σε σχέση με την θερμοκρασία περιβάλλοντος στο ονομαστικό φορτίο $\Delta\Theta_{TO,R}$ και τις συνολικές απώλειες στο ονομαστικό φορτίο $P_{T,R}$ (σε W), σύμφωνα με τη σχέση (εφαρμόσιμη για τους μετασχηματιστές φυσικής ροής λαδιού):

$$\tau_{TO,R} = (0.0272 \cdot WCC + 0.01814 \cdot WT + 5.034 \cdot VO) \cdot \frac{\Delta\Theta_{TO,R}}{P_{T,R}} \quad (6.11)$$

Μια τυπική τιμή του $\tau_{TO,R}$ που μπορεί να ληφθεί ίση με 2.5 ώρες για μετασχηματιστές διανομής ισχύος μεγαλύτερης των 200 kVA, ενώ για μικρότερες ισχύεις μπορεί να υιοθετηθεί η τιμή των 3.5 ωρών [6.52].

Η αρχική ανύψωση $\Delta\Theta_{TO,i}$ ανώτατης θερμοκρασίας λαδιού σε σχέση με την θερμοκρασία περιβάλλοντος (που αντιστοιχεί στην αρχή του εξεταζόμενου χρονικού διαστήματος) είναι ίση με την υπολογιζόμενη τιμή $\Delta\Theta_{TO}$ του προηγούμενου κύκλου (διαστήματος) μεταβολής του φορτίου. Η τελική ανύψωση $\Delta\Theta_{TO,U}$ ανώτατης θερμοκρασίας λαδιού σε σχέση με την θερμοκρασία περιβάλλοντος (που αντιστοιχεί στο τέλος του εξεταζόμενου χρονικού διαστήματος) υπολογίζεται με τη βοήθεια της ανύψωσης $\Delta\Theta_{TO,R}$ της ανώτατης θερμοκρασίας λαδιού σε σχέση με την θερμοκρασία περιβάλλοντος στο ονομαστικό φορτίο, το λόγο K του φορτίου του εξεταζόμενου κύκλου (διαστήματος) μεταβολής προς το ονομαστικό φορτίο και το λόγο R των απωλειών φορτίου στο ονομαστικό φορτίο προς τις απώλειες κενού φορτίου, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta\Theta_{TO,U} = \Delta\Theta_{TO,R} \left(\frac{K^2 \cdot R + 1}{R + 1} \right)^n \quad (6.12)$$

Για τον υπολογισμό του πρώτου χρονικού διαστήματος της μελέτης, επιλέγεται αυθαίρετα η τιμή μηδέν για την αρχική τιμή του $\Delta\Theta_{TO,i}$. Μετά το πέρας των παραπάνω υπολογισμών για όλους τους κύκλους (διαστήματα μεταβολής) φορτίου, το τελικό $\Delta\Theta_{TO,U}$ του τελευταίου κύκλου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως η νέα τιμή του $\Delta\Theta_{TO,i}$ της πρώτης επανάληψης και να επαναληφθεί η διαδικασία έτσι ώστε να διασφαλιστούν σταθερές κατανομές θερμοκρασιών.

■ Υπολογισμός Ανώτατης Θερμοκρασίας Τυλιγμάτων

Έχοντας υπολογίσει την ανώτατη αύξηση της θερμοκρασίας λαδιού $\Delta\Theta_{TO}$ μετά από μία βηματική μεταβολή του φορτίου, στόχος είναι να υπολογιστεί η αντίστοιχη ανύψωση $\Delta\Theta_H$ της ανώτατης τιμής της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων σε σχέση με την ανώτατη θερμοκρασία λαδιού μετά τη βηματική μεταβολή του φορτίου. Ο υπολογισμός του $\Delta\Theta_H$ προκύπτει από την εξίσωση:

$$\Delta\Theta_H = (\Delta\Theta_{H,U} - \Delta\Theta_{H,i}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau_w}} \right) + \Delta\Theta_{H,i} \quad (6.13)$$

όπου $\Delta\Theta_{H,i}$ και $\Delta\Theta_{H,U}$ αντιπροσωπεύουν την αρχική και την τελική ανύψωση της ανώτατης θερμοκρασίας των τυλιγμάτων σε σχέση με την ανώτατη θερμοκρασία λαδιού κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου και τ_w είναι η σταθερά χρόνου των τυλιγμάτων στο σημείο στο οποίο εμφανίζεται η ανώτατη θερμοκρασία τυλιγμάτων (*hot-spot*) (σε ώρες). Τυπική τιμή της συγκεκριμένης σταθεράς είναι μικρότερη του 0.1 [6.54]. Επομένως, ο όρος $e^{-\frac{1}{\tau_w}}$ της (6.13) μπορεί να θεωρηθεί ίσος με μηδέν, δίνοντας:

$$\Delta\Theta_H = \Delta\Theta_{H,i} \quad (6.14)$$

Η τελική ανύψωση της ανώτατης θερμοκρασίας των τυλιγμάτων $\Delta\Theta_{H,U}$ σε σχέση με την ανώτατη θερμοκρασία λαδιού δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta\Theta_{H,U} = \Delta\Theta_{H,R} \cdot K^{2m} \quad (6.15)$$

όπου $\Delta\Theta_{H,R}$ αντιπροσωπεύει την ανύψωση της ανώτατης θερμοκρασίας των τυλιγμάτων σε σχέση με την ανώτατη θερμοκρασία λαδιού στο ονομαστικό φορτίο (προτείνεται 15 °C από το πρότυπο [6.50], όταν δεν υπάρχουν τιμές από πραγματικές δοκιμές) και m είναι ένας εμπειρικός παράγοντας ίσος με την τιμή 0.8 για τους μετασχηματιστές φυσικής ροής λαδιού (*self-cooled transformers*).

Τελικά, η ανώτατη τιμή της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων μετά από μια βηματική μεταβολή του φορτίου δίνεται από την εξίσωση:

$$\Theta_H = \Theta_A + \Delta\Theta_{TO} + \Delta\Theta_H \quad (6.16)$$

όπου Θ_A η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

■ **Γήρανση των Μονωτικών Υλικών του Μετασχηματιστή**

Το φαινόμενο της γήρανσης των μονωτικών υλικών του μετασχηματιστή πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τους υπολογισμούς της θερμικής φόρτισης, καθώς η φθορά των μονωτικών υλικών οδηγεί σε μείωση της ικανότητας θερμικής φόρτισης, η οποία επηρεάζει τη δυνατότητά του να εξυπηρετήσει το φορτίο. Ως κριτήριο για την επίδραση του φορτίου στη γήρανση των μονωτικών υλικών χρησιμοποιούνται οι θερμοκρασίες που υπολογίστηκαν παραπάνω, με πιο σημαντική την ανώτατη θερμοκρασία τυλιγμάτων.

Αν και το πρότυπο IEEE C57.91-1995 προδιαγράφει ότι η λειτουργία σε ανώτατη θερμοκρασία τυλιγμάτων άνω των 140 °C μπορεί να οδηγήσει σε πιθανούς κινδύνους για το μετασχηματιστή, η τιμή αυτή δε μπορεί να θεωρηθεί ως η μέγιστη επιτρεπόμενη κατά τους υπολογισμούς που πραγματοποιούνται για τον καθορισμό των ορίων θερμικής φόρτισης του μετασχηματιστή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η γήρανση των μονωτικών λόγω υπερθέρμανσης είναι μια σωρευτική διαδικασία, με αποτέλεσμα η φόρτιση πέραν της ονομαστικής να πρέπει να εξετάζεται σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις της στην κανονική διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή. Συνεπώς, για την παρούσα μελέτη, επιλέχθηκε μέγιστη τιμή ανώτατης θερμοκρασίας τυλιγμάτων ίση με 120 °C, σύμφωνα με το σχετικό ρυθμό γήρανσης των μονωτικών υλικών του μετασχηματιστή. Η λειτουργία των μετασχηματιστών διανομής σε θερμοκρασίες μικρότερες των 120 °C εξασφαλίζει ότι ο σχετικός ρυθμός γήρανσης των μονωτικών υλικών παραμένει σε αποδεκτό επίπεδο [6.52].

■ **Επιβεβαίωση Υπολογισμών Θερμικής Φόρτισης με τη Χρήση Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων**

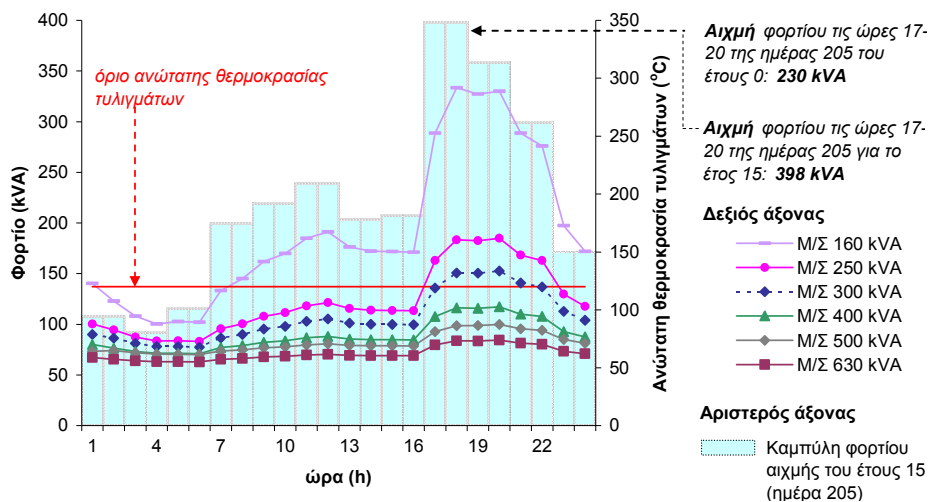
Για την επιβεβαίωση των παραπάνω αναλυτικών υπολογισμών θερμικής φόρτισης, είναι δυνατή η χρήση αριθμητικού μοντέλου βασισμένου στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο μπορεί να αναλύσει με λεπτομέρεια τη θερμική κατανομή στο μετασχηματιστή [6.53]. Η χρήση του μοντέλου αυτού μπορεί να θεωρηθεί σκόπιμη σε καταστάσεις φόρτισης κατά τις οποίες οι αναλυτικοί υπολογισμοί οδηγούν σε τιμές ανύψωσης θερμοκρασίας τυλιγμάτων οριακά μεγαλύτερες από τις επιτρεπόμενες, οδηγώντας σε ανάγκη επιβεβαίωσής τους, μέσω της μεγαλύτερης ακρίβειας που μπορεί να παρέχει η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Με τη χρήση του μοντέλου αυτού είναι δυνατή η μελέτη της θερμικής κατανομής και η πρόβλεψη της ανώτατης θερμοκρασίας τυλιγμάτων σε δεδομένες συνθήκες φόρτισης, χωρίς να απαιτείται γνώση του συνολικού κύκλου μεταβολής του εξεταζόμενου φορτίου, παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερη ευελιξία στη μελέτη οριακών συνθηκών φόρτισης οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή.

Δυνατότητα Υπερφόρτισης

Προκειμένου να διερευνηθούν τα όρια φόρτισης του μετασχηματιστή, ο υπολογισμός της ανώτατης θερμοκρασίας τυλιγμάτων επαναλαμβάνεται κάθε χρόνο της περιόδου μελέτης, σε ωριαία βάση, σύμφωνα με την ημερήσια καμπύλη φορτίου που εξυπηρετεί. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιείται η ημερήσια καμπύλη αιχμής του έτους (για παράδειγμα καμπύλη θέρους, για φορτία στα οποία το μέγιστο εμφανίζεται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού) έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η δυσμενέστερη, από πλευράς θερμικής καταπόνησης, φόρτιση του μετασχηματιστή. Ο ετήσιος ρυθμός ανάπτυξης του φορτίου s λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό του ανα μονάδα φορτίου K_t^k (ανηγμένο στη βάση ισχύος του μετασχηματιστή) τη χρονική στιγμή (ώρα) t κατά το έτος k της εξεταζόμενης περιόδου σύμφωνα με το ανά μονάδα φορτίο K_t^0 τη χρονική στιγμή (ώρα) t το έτος 0, σύμφωνα με τη σχέση:

$$K_t^k = K_t^0 \cdot (1 + s)^k \quad (6.17)$$

Το Σχήμα 6.3 δείχνει τη μεταβολή της ανώτατης θερμοκρασίας τυλιγμάτων έξι μετασχηματιστών ισχύος 160, 250, 300, 400, 500 και 630 kVA με λόγο R (απωλειών φορτίου σε ονομαστική φόρτιση προς απώλειες κενού φορτίου) ίσο με 5.61, 5.23, 5.68, 4.73, 5.44 και 7.11, αντίστοιχα, οι οποίοι εξυπηρετούν οικιακό φορτίο με αρχική αιχμή (το έτος 0) 230 kVA, στο 15^ο έτος της περιόδου μελέτης, για ρυθμό αύξησης φορτίου ίσο με 4%. Η κλίμακα του αριστερού άξονα στο Σχήμα 6.3 αντιστοιχεί στις τιμές της καμπύλης φορτίου K_t^k (εκφράζονται σε kVA, επειδή οι ανά μονάδα τιμές είναι διαφορετικές στη βάση ισχύος του κάθε μετασχηματιστή), η οποία απεικονίζεται ως ραβδόγραμμα. Η κλίμακα του δεξιού άξονα στο Σχήμα 6.3 δείχνει τη μεταβολή της ανώτατης θερμοκρασίας τυλιγμάτων του κάθε μετασχηματιστή, σε °C (για τα έξι μεγέθη μετασχηματιστή που εμφανίζονται στο Σχήμα 6.3). Οι θερμοκοί υπολογισμοί στηρίζονται σε τυπική καμπύλη φορτίου οικιακού καταναλωτή και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με 40°C. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3, οι μετασχηματιστές ισχύος 160, 250 και 300 kVA ξεπερνούν το όριο ανώτατης θερμοκρασίας τυλιγμάτων 120°C και δε μπορούν να εξυπηρετήσουν το φορτίο το 15^ο έτος της περιόδου μελέτης.



Σχήμα 6.3 Μεταβολή της ανώτατης θερμοκρασίας τυλιγμάτων έξι μετασχηματιστών (Μ/Σ) ισχύος 160, 250, 300, 400, 500 και 630 kVA, οι οποίοι εξυπηρετούν οικιακό φορτίο, κατά τη διάρκεια μίας ημέρας.

6.3.3 Υπολογισμός Κόστους Ενέργειας Απωλειών Μετασχηματιστή

Ο υπολογισμός του κόστους της ετήσιας ενέργειας απωλειών μετασχηματιστή των υποψήφιων μονοπατιών, τα οποία αντιπροσωπεύουν συνδυασμούς επιλογής και εγκατάστασης διαφόρων μεγεθών μετασχηματιστή σε διάφορα χρονικά στάδια της μελέτης, επιτυγχάνεται με τη χρήση της ενέργειας η οποία αντιστοιχεί στις απώλειες κενού φορτίου E_{NLL} (σε kWh) για κάθε έτος λειτουργίας του μετασχηματιστή και της ενέργειας η οποία αντιστοιχεί στις απώλειες φορτίου E_{LL}^k (σε kWh) για κάθε k -οστό έτος λειτουργίας του μετασχηματιστή [6.49]. Οι συγκεκριμένες ενέργειες υπολογίζονται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$E_{NLL} = NLL \cdot HPY \quad (6.18)$$

$$E_{LL}^k = LL \cdot \left[l_f \cdot \frac{S_{\max,0}^l}{S_{nom}^l} (1+s)^k \right]^2 \cdot HPY \quad (6.19)$$

όπου $S_{\max,0}^l$ είναι το αρχικό ανώτατο φορτίο του υποσταθμού με τύπο φορτίου l (σε kVA), S_{nom}^l είναι η ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή που εξυπηρετεί το είδος φορτίου l (σε kVA), HPY είναι ο αριθμός ωρών λειτουργίας του μετασχηματιστή ανά έτος (τυπική τιμή ίση με 8760 ώρες) και l_f είναι ο συντελεστής φορτίου, δηλαδή η μέση φόρτιση του μετασχηματιστή κατά της διάρκεια ζωής του (προερχόμενος από τη καμπύλη φορτίου του κάθε τύπου καταναλωτή που εξυπηρετείται από τον αντίστοιχο υποσταθμό). Το κόστος της ενέργειας των απωλειών κενού φορτίου του μετασχηματιστή για κάθε k -οστό έτος C_{NLL}^k (σε €) καθώς επίσης και το κόστος της ενέργειας των απωλειών φορτίου του μετασχηματιστή για κάθε k -οστό έτος C_{LL}^k (σε €) υπολογίζονται ως εξής:

$$C_{NLL}^k = E_{NLL} \cdot CYEC^k \quad (6.20)$$

$$C_{LL}^k = E_{LL}^k \cdot CYEC^k \quad (6.21)$$

όπου $CYEC^k$ αντιπροσωπεύει την παρούσα αξία του κόστους της ενέργειας (σε €/kWh) στο k -οστό έτος. Τελικά, το κόστος της συνολικής ενέργειας απωλειών του μετασχηματιστή C_L^k για το k -οστό έτος δίνεται από τον τύπο:

$$C_L^k = C_{NLL}^k + C_{LL}^k \quad (6.22)$$

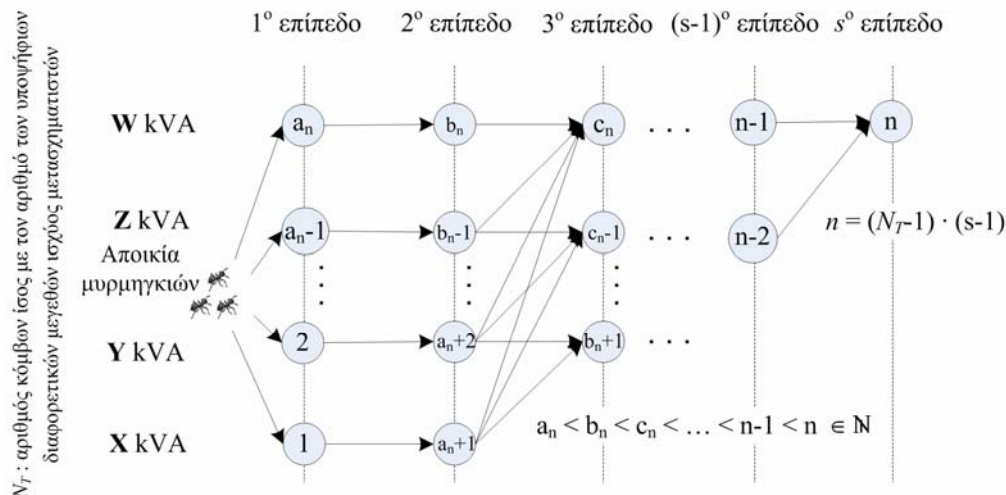
6.3.4 Επίλυση Προβλήματος Επιλογής Μεγέθους Μετασχηματιστή Χρησιμοποιώντας τον Ελιτιστικό Αλγόριθμο Αποικίας Μυρμηγκιών (EAS)

Ο κύριος στόχος του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι η εύρεση της βέλτιστης επιλογής μεγέθους των μετασχηματιστών διανομής, έτσι ώστε να καλύπτεται η ζήτηση του φορτίου για όλα τα χρόνια της μελέτης [6.49]. Για την επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου, κατασκευάζεται ένα γράφημα του οποίου τα μονοπάτια αντιπροσωπεύουν πιθανές στρατηγικές επιλογής μεγέθους (Σχήμα 6.4).

Το γράφημα έχει s επίπεδα και κάθε επίπεδο αναπαριστά μια χρονική περίοδο (σε χρόνια), τα όρια της οποίας καθορίζονται από την ανάγκη αλλαγής του μεγέθους του μετασχηματιστή εξαιτίας της παραβίασης των θερμικών ορίων φόρτισης. Συνεπώς, το επίπεδο s έχει ένα κόμβο λιγότερο σε σχέση με το επίπεδο $(s-1)$, το επίπεδο $(s-2)$ έχει ένα κόμβο λιγότερο σε σχέση με το επίπεδο $(s-1)$ και ούτω καθεξής. Το πρώτο επίπεδο δηλώνει την αρχή της μελέτης, το οποίο αποτελείται από τόσους κόμβους όσους και ο αριθμός των υποψήφιων διαφορετικών μετασχηματιστών N_T , ενώ s δηλώνει την ολοκλήρωση της μελέτης (η οποία αποτελείται από τη μεγαλύτερη απαραίτητη ονομαστική ισχύ η οποία εξυπηρετεί το φορτίο στο τελευταίο έτος της μελέτης. Οι συμβολισμοί X , Y , Z , W αναφέρονται σε διαφορετικές ονομαστικές ισχύεις ($X < Y < Z < W$). Είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι δεν

έχει νόημα να συνδεθεί για παράδειγμα ο κόμβος 2 με τον κόμβο (a_n+1) εξαιτίας του γεγονότος ότι αντιστοιχεί σε εγκατάσταση μετασχηματιστή του οποίου το μέγεθος ισχύος είναι μικρότερο από αυτό το οποίο ήδη είναι εγκατεστημένο (σε λειτουργία) (μόνο αναβάθμιση μεγεθών μπορεί να υλοποιηθεί). Επίσης, τα τόξα μεταξύ των κόμβων είναι κατευθυνόμενα από το προηγούμενο επίπεδο στο επόμενο, δηλαδή δεν επιτρέπονται οπισθοδρομικές κινήσεις, διότι κάθε επίπεδο αναπαριστά ένα επόμενο βήμα στη χρονική περίοδο της μελέτης. Οι κόμβοι 1 έως a_n (Σχήμα 6.4) προσδιορίζουν τους αρχικούς κόμβους οι οποίοι αντιστοιχούν σε κάθε υποψήφιο μέγεθος μετασχηματιστή ενώ ο κόμβος n προσδιορίζει τον τελικό κόμβο ή τον κόμβο προορισμού (Σχήμα 6.4). Η χρήση πολλαπλών αρχικών κόμβων επιτρέπει τη διερεύνηση περισσότερων υποψηφίων λύσεων του προβλήματος. Η αρίθμηση των n κόμβων (Σχήμα 6.4) πραγματοποιείται από κάτω προς τα πάνω για κάθε επίπεδο, δηλαδή ο κατώτατος κόμβος (κάτω-κάτω στο σχήμα) του 1^{ου} επιπέδου είναι ο κόμβος με τον αριθμό 1, ενώ ο τελευταίος κόμβος του 1^{ου} επιπέδου είναι ο κόμβος με τον αριθμό a_n . Ομοίως, το 2^ο επίπεδο ξεκινάει με τον κόμβο με τον αριθμό a_n+1 ενώ ο τελευταίος του κόμβος έχει το αριθμό b_n , το 3^ο επίπεδο ξεκινάει με τον κόμβο με τον αριθμό b_n+1 και τελειώνει στον κόμβο c_n και ούτω καθεξής, καταλήγοντας στο s -οστό επίπεδο, το οποίο αποτελείται μόνο από το κόμβο με τον αριθμό n .

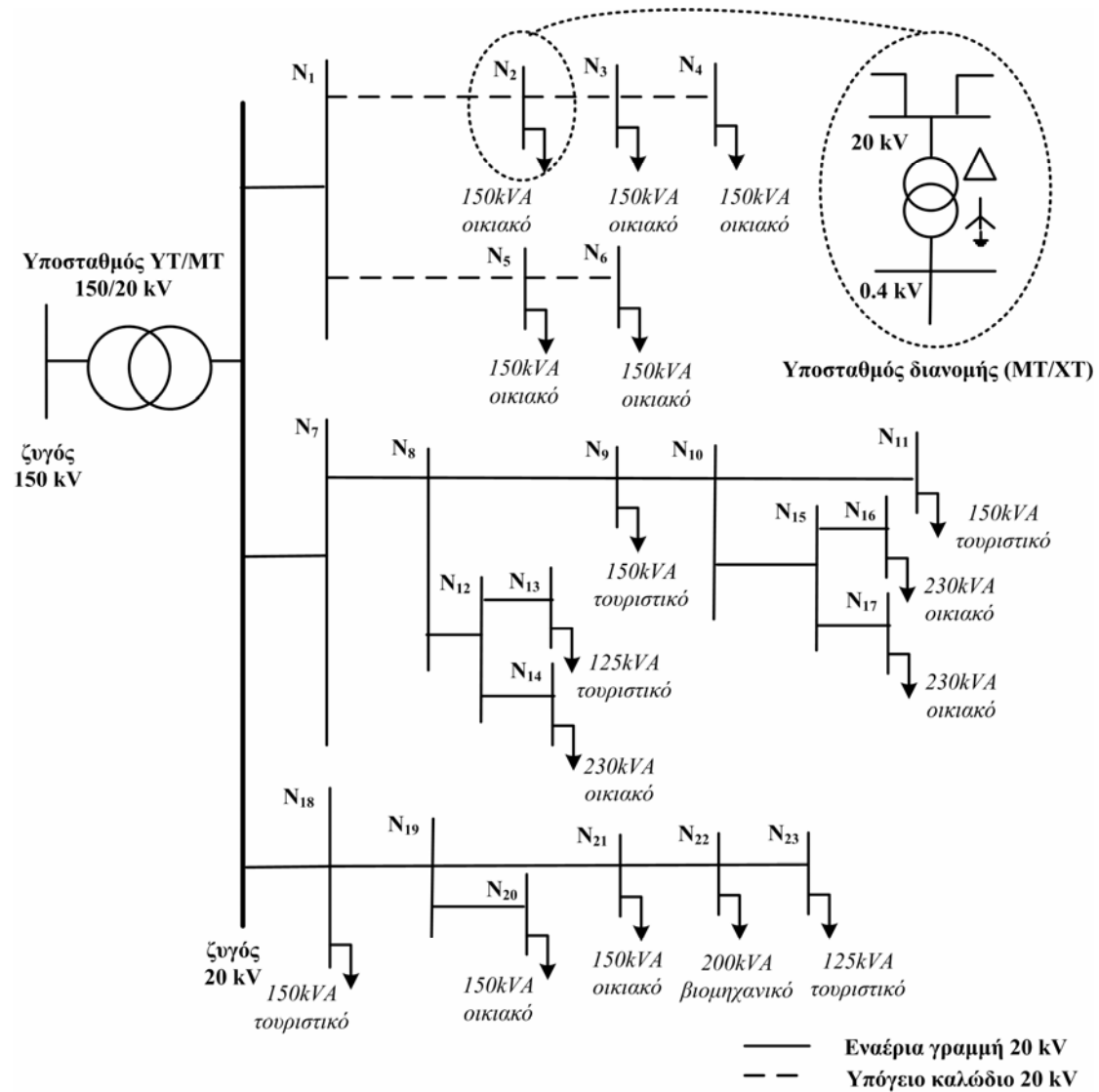
Ο στόχος της αποικίας των μυρμηγκιών είναι η εύρεση του μικρότερου σε κόστος μονοπατιού μεταξύ των κόμβων που ανήκουν στο 1^ο επίπεδο και τον κόμβο n ο οποίος ανήκει στο s -οστό επίπεδο.



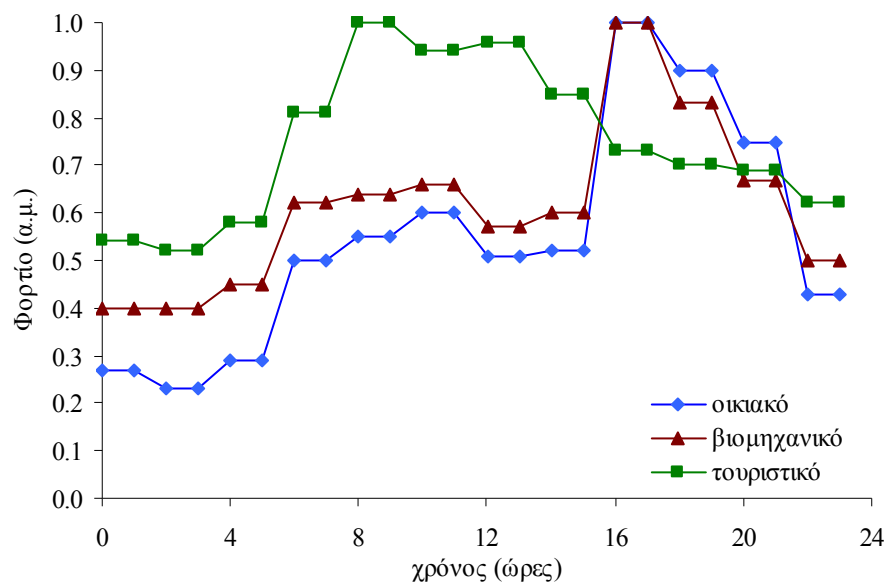
Σχήμα 6.4 Το γράφημα που χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος επιλογής μεγέθους του μετασχηματιστή.

6.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται για τη βέλτιστη επιλογή μεγέθους μετασχηματιστών σε ένα πραγματικό δίκτυο διανομής [6.49]. Το Σχήμα 6.5 αναπαριστά το μονογραμμικό διάγραμμα του εξεταζόμενου δικτύου διανομής, το οποίο αντιστοιχεί σε ένα τυπικό δίκτυο 20 kV (Μέσης Τάσης-MT) της Ελλάδας. Το δίκτυο συνδέεται στο σύστημα Υψηλής Τάσης (YT) των 150 kV μέσω μετασχηματιστή ισχύος 150/20 kV (YT/MT) και αποτελείται κυρίως από εναέριες γραμμές αλλά και από τμήματα υπογείων καλωδίων. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.5, το εξεταζόμενο δίκτυο MT περιλαμβάνει 23 κόμβους, οι οποίοι συμβολίζονται ως N_I-N_{23} , εκ των οποίων 16 αποτελούν τους υποσταθμούς διανομής ενώ οι υπόλοιποι 7 είναι σημεία διακλάδωσης. Το είδος των φορτίων όπως επίσης και η αρχική αιχμή τους (έτος 0 της περιόδου μελέτης) παραθέτονται στο Σχήμα 6.5. Τρεις τύποι καταναλωτών Χαμηλής Τάσης (XT) παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.5: 1) οικιακός, 2) τουριστικός και 3) βιομηχανικός, με τις ημερήσιες κατανομές φορτίου (Σχήμα 6.6) να αντιστοιχούν σε συντελεστή φόρτισης ίσο με 0.55, 0.75 και 0.61, αντίστοιχα. Το φορτίο κάθε κόμβου εξυπηρετείται από έναν υποσταθμό διανομής, ο οποίος αποτελείται από μετασχηματιστή διανομής 20/0.4 kV(MT/XT), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.5.



Σχήμα 6.5 Μονογραμμικό διάγραμμα του εξεταζόμενου δικτύου διανομής.



Σχήμα 6.6 Καμπύλες φορτίου για τα τρία είδη καταναλωτών που περιλαμβάνονται στο Σχήμα 6.5.

Ανάλογα με τον τύπο φορτίου και την αντίστοιχη αρχική αιχμή του, οι υποσταθμοί μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 6 τύπους, καθορίζοντας τον αριθμό των διαφορετικών στρατηγικών επιλογής μεγέθους μετασχηματιστή που πρέπει να προσδιοριστούν κατά τη διάρκεια επίλυσης του προβλήματος:

- Τύπος 1 (κόμβοι N_2, N_3, N_4, N_5, N_6 και N_{20}): οικιακό φορτίο με αρχική αιχμή ίση με 150 kVA και ρυθμό αύξησης φορτίου ίσο με 4% για 30 χρόνια, καταλήγοντας σε τελικό φορτίο αιχμής ίσο με 486.51 kVA (στο 30^ο έτος μελέτης).
- Τύπος 2 (κόμβοι N_9, N_{11} και N_{18}): τουριστικό φορτίο με αρχική αιχμή ίση με 150 kVA και ρυθμό αύξησης φορτίου ίσο με 4.5% για 30 χρόνια, καταλήγοντας σε τελικό φορτίο αιχμής ίσο με 561.8 kVA (στο 30^ο έτος μελέτης).
- Τύπος 3 (κόμβοι N_{13} και N_{23}): τουριστικό φορτίο με αρχική αιχμή ίση με 125 kVA και ρυθμό αύξησης φορτίου ίσο με 4.5% για 30 χρόνια, καταλήγοντας σε τελικό φορτίο αιχμής ίσο με 468.16 kVA (στο 30^ο έτος μελέτης).
- Τύπος 4 (κόμβος N_{22}): οικιακό φορτίο με αρχική αιχμή ίση με 175 kVA και ρυθμό αύξησης φορτίου ίσο με 4% για 30 χρόνια, καταλήγοντας σε τελικό φορτίο αιχμής ίσο με 567.59 kVA (στο 30^ο έτος μελέτης).
- Τύπος 5 (κόμβος N_{21}): βιομηχανικό φορτίο με αρχική αιχμή ίση με 200 kVA και ρυθμό αύξησης φορτίου ίσο με 4% για 30 χρόνια, καταλήγοντας σε τελικό φορτίο αιχμής ίσο με 648.68 kVA (στο 30^ο έτος μελέτης).
- Τύπος 6 (κόμβοι N_{14}, N_{16} και N_{17}): οικιακό φορτίο με αρχική αιχμή ίση με 230 kVA και ρυθμό αύξησης φορτίου ίσο με 4% για 30 χρόνια, καταλήγοντας σε τελικό φορτίο αιχμής ίσο με 745.98 kVA (στο 30^ο έτος μελέτης).

Για τους 16 υποσταθμούς διανομής του δικτύου λαμβάνονται υπόψη έξι διαφορετικά μεγέθη μετασχηματιστών διανομής, ονομαστικής ισχύος 160, 250, 300, 400, 500 και 630 kVA. Ο Πίνακας 6.1 παραθέτει τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά καθώς επίσης και την τιμή αγοράς των υπό εξέταση μετασχηματιστών. Οι θερμικοί υπολογισμοί (Σχήμα 6.3) επαναλαμβάνονται για κάθε τύπο μετασχηματιστή και για κάθε έτος μελέτης, δίνοντας τα αποτελέσματα των ετών της θερμικής αντοχής του κάθε μετασχηματιστή (δηλαδή των ετών κατά τα οποία ο εκάστοτε μετασχηματιστής μπορεί να εξυπηρετήσει το φορτίο χωρίς να υπερβεί τα όρια θερμικής υπερφόρτισης) που παρουσιάζει ο Πίνακας 6.1. Οι συγκεκριμένες περίοδοι, οι οποίες εκφράζονται σε έτη, καθορίζουν τα επίπεδα του γραφήματος του αλγορίθμου EAS (Σχήμα 6.4).

Πίνακας 6.1 Τεχνικές παράμετροι και έτη θερμικής αντοχής μετασχηματιστών που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστης επιλογής μεγέθους.

Τεχνικές παράμετροι μετασχηματιστή				Θερμική αντοχή μετασχηματιστή (σε χρόνια) ανά τύπο φορτίου υποσταθμού					
Μέγεθος (kVA)	Τιμή αγοράς (€)	NLL (kW)	LL (kW)	Τύπος 1	Τύπος 2	Τύπος 3	Τύπος 4	Τύπος 5	Τύπος 6
160	5275	0.454	2.544	5	4	8	3	0	0
250	6853	0.702	3.672	16	14	18	14	10	7
300	6932	0.738	4.186	21	18	23	19	15	12
400	9203	0.991	4.684	28	25	28	26	22	19
500	10296	1.061	5.771	30	30	30	30	28	24
630	12197	1.094	7.774	-	-	-	-	30	30

Το επόμενο σημαντικό βήμα για τη δημιουργία του γραφήματος είναι ο καθορισμός των βαρών κάθε τόξου. Για την υλοποίηση του συγκεκριμένου στόχου, πραγματοποιείται ο

υπολογισμός του κόστους των απωλειών του κάθε μετασχηματιστή για την υπό εξέταση περίοδο μελέτης, βάσει του κόστους της ετήσιας ενέργειας απωλειών μετασχηματιστή (§6.3.3). Το κόστος της ενέργειας των απωλειών $C_L^{i \rightarrow j}$ που αντιστοιχεί στη μετάβαση από τον κόμβο i (p -οστό έτος μελέτης) στον κόμβο j (q -οστό έτος μελέτης), υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση [6.49]:

$$C_L^{i \rightarrow j} = \sum_{k=p+1}^q C_L^k \quad (6.23)$$

Όταν η μετάβαση από το επίπεδο i στο j αντιστοιχεί σε αναβάθμιση μεγέθους μετασχηματιστή από ονομαστική ισχύ S_i σε ονομαστική ισχύ S_j , το κόστος εγκατάστασης $I_{i \rightarrow j}$ είναι [6.49]:

$$I_{i \rightarrow j} = BP_{S_j}^p - R_{S_i}^p \quad (6.24)$$

όπου $BP_{S_j}^p$ είναι η παρούσα αξία της τιμής αγοράς του μετασχηματιστή που θα εγκατασταθεί στο p -οστό έτος της μελέτης και $R_{S_i}^p$ είναι η απομένουσα αξία του μετασχηματιστή που αφαιρέθηκε από το δίκτυο (αντικαταστάθηκε), η οποία υπολογίζεται από τη εξίσωση [6.49]:

$$R_{S_i}^p = BP_{S_i} \cdot \left[\frac{(1+r)^N - (1+r)^m}{(1+r)^N - 1} \right] \quad (6.25)$$

όπου BP_{S_i} είναι η τιμή αγοράς του μετασχηματιστή S_i , r είναι ρυθμός αύξησης του πληθωρισμού, N είναι τα συνολικά έτη της διάρκειας ζωής του μετασχηματιστή και m είναι τα έτη λειτουργίας του μετασχηματιστή.

Το Σχήμα 6.7 απεικονίζει το γράφημα που χρησιμοποιείται από το προτεινόμενο αλγόριθμο EAS για την επίλυση του προβλήματος επιλογής μεγέθους μετασχηματιστή για τον υποσταθμό διανομής με φορτίο Τύπου 5 (Σχήμα 6.5), χρησιμοποιώντας τα μεγέθη των μετασχηματιστών που παρουσιάζει ο Πίνακας 6.1.

Ο Πίνακας 6.2 παρουσιάζει τα κόστη ορισμένων επιλεγμένων τόξων που φαίνονται στο Σχήμα 6.7 και τα οποία έχουν υπολογιστεί βάσει της παραγράφου 6.3.3 και των εξισώσεων (6.23)-(6.25). Για παράδειγμα, το κόστος της μετάβασης από τον κόμβο 11 στον κόμβο 17, οι οποίοι αντιστοιχούν σε μετάβαση από το 15^ο έτος στο 22^ο έτος, δεδομένου ότι οι απώλειες κενού φορτίου είναι ίσες με 1.094 kW, οι απώλειες φορτίου είναι ίσες με 7.774 kW, οι ώρες λειτουργίας του μετασχηματιστή ετησίως είναι ίσες με 8760 hr/year, η αρχική τιμή του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας είναι ίση με 0.054 €/kWh καθώς επίσης ο ρυθμός πληθωρισμού είναι ίσος με 3.7%, υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{κόστος τόξου}_{11 \rightarrow 17} = C_L^{11 \rightarrow 17} + I_{11 \rightarrow 17} \quad (6.26)$$

Επομένως λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις (6.18)-(6.22) και την (6.23),

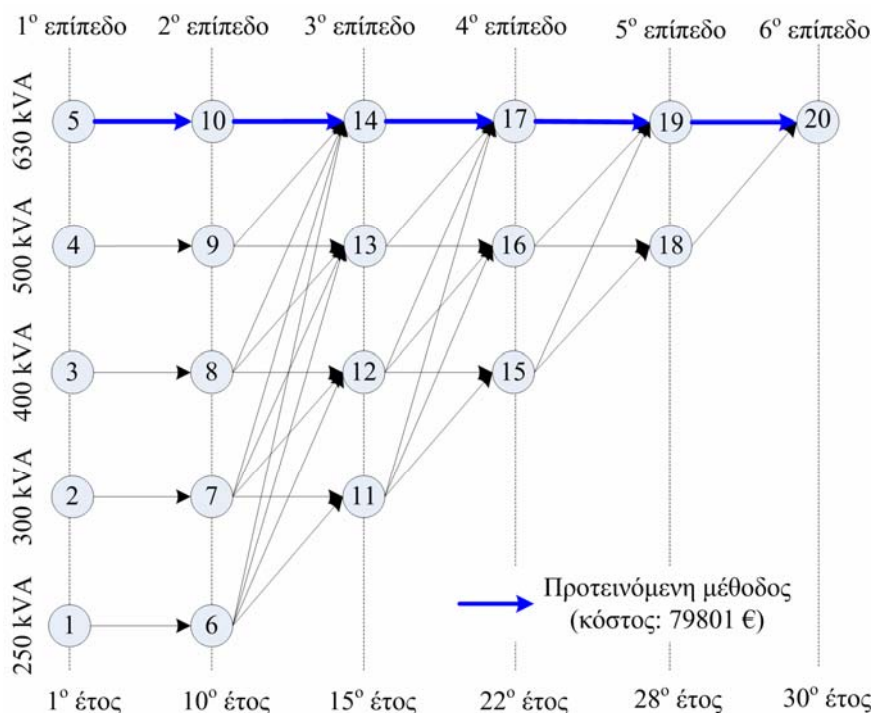
$$\begin{aligned} C_L^{11 \rightarrow 17} &= \sum_{k=16}^{22} C_L^k = \sum_{k=16}^{22} (C_{NLL}^k + C_{LL}^k) \\ \Rightarrow C_L^{11 \rightarrow 17} &= \sum_{k=16}^{22} CYEC^k \cdot E_{NLL} + \sum_{k=16}^{22} CYEC^k \cdot E_{LL} \\ \Rightarrow C_L^{11 \rightarrow 17} &= \sum_{k=16}^{22} CYEC^k \cdot HPY \cdot NLL + \sum_{k=16}^{22} (CYEC^k \cdot LL \cdot \left[l_f \cdot \frac{S_{\max,0}^l}{S_{nom}^l} (1+s)^k \right]^2 \cdot HPY) \\ \Rightarrow C_L^{11 \rightarrow 17} &= \sum_{k=16}^{22} (CYEC^k \cdot 1.094 \cdot 0.729 + CYEC^k \cdot 7.774 \cdot [0.61 \cdot \frac{200}{630} \cdot (1+0.04)^k]^2 \cdot 8760) \\ \Rightarrow C_L^{11 \rightarrow 17} &= 16016 \text{ €} \end{aligned} \quad (6.27)$$

και λαμβάνοντας υπόψη την (6.24) και (6.25), προκύπτει:

$$I_{11 \rightarrow 17} = BP_{630 \text{ kVA}}^{15} - R_{300 \text{ kVA}}^{15} = 21035 - 4388 = 16647 \text{ €} \quad (6.28)$$

Συνεπώς, κάνοντας αντικατάσταση στην (6.26) τις τιμές της (6.27) και (6.28), προκύπτει ότι το κόστος μετάβασης από τον κόμβο 11 στον κόμβο 17 είναι:

$$\text{κόστος τόξου}_{11 \rightarrow 17} = C_L^{11 \rightarrow 17} + I_{11 \rightarrow 17} \quad (6.29)$$



Σχήμα 6.7 Γράφημα το οποίο χρησιμοποιείται από τη προτεινόμενη τεχνική για την επιλογή μεγέθους μετασχηματιστή που θα εξυπηρετήσει φορτίο τύπου 5.

Πίνακας 6.2 Κόστη επιλεγμένων τόξων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.7.

Τόξο	Κόστος τόξου	Τιμή (€)	Τόξο	Κόστος τόξου	Τιμή (€)
2 → 7	$C_L^{2 \rightarrow 7} + BP_{300}^{1st-year}$	17972	3 → 8	$C_L^{3 \rightarrow 8} + BP_{400}^{1st-year}$	19389
7 → 11	$C_L^{7 \rightarrow 11}$	10179	8 → 12	$C_L^{8 \rightarrow 12}$	84067
11 → 17	$C_L^{11 \rightarrow 17} + I_{11 \rightarrow 17}$	32663	12 → 15	$C_L^{12 \rightarrow 15}$	19673
1 → 6	$C_L^{1 \rightarrow 6} + BP_{250}^{1st-year}$	19389	15 → 19	$C_L^{15 \rightarrow 19} + I_{15 \rightarrow 19}$	47230
6 → 11	$C_L^{6 \rightarrow 11} + I_{6 \rightarrow 11}$	14816	19 → 20	$C_L^{19 \rightarrow 20}$	11185
11 → 15	$C_L^{11 \rightarrow 15} + I_{11 \rightarrow 15}$	31156	5 → 10	$C_L^{5 \rightarrow 10} + BP_{630}^{1st-year}$	21738
15 → 18	$C_L^{15 \rightarrow 18} + I_{15 \rightarrow 18}$	45575	10 → 14	$C_L^{10 \rightarrow 14}$	72615
18 → 20	$C_L^{18 \rightarrow 20} + I_{18 \rightarrow 20}$	43831	14 → 17	$C_L^{14 \rightarrow 17}$	16016
9 → 13	$C_L^{9 \rightarrow 13}$	76908	17 → 19	$C_L^{17 \rightarrow 19}$	23601

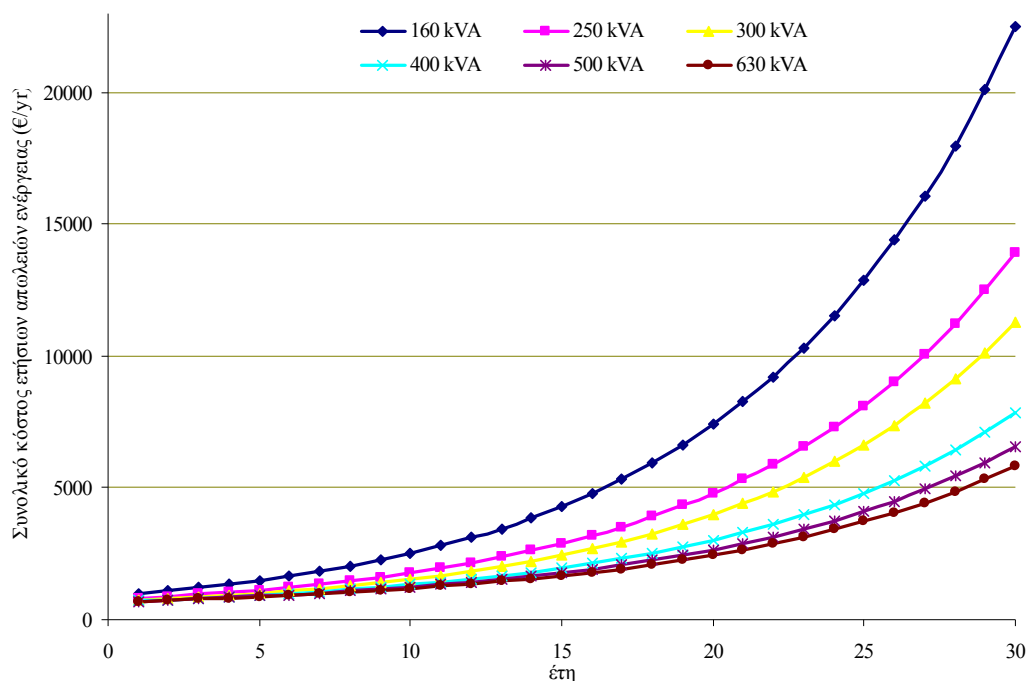
Για την εφαρμογή της μεθόδου EAS στην εύρεση της βέλτιστης επιλογής μεγέθους μετασχηματιστή, ελέγχθηκαν μια σειρά από διαφορετικές τιμές για κάθε παράμετρο, δηλαδή $\alpha \in \{0, 0.5, 1, 2, 5\}$, $\beta \in \{0, 0.5, 1, 2, 5\}$ και $\rho \in \{0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1\}$. Ο Πίνακας 6.3 παραθέτει τα αποτελέσματα των βέλτιστων στρατηγικών επιλογής μεγέθους μετασχηματιστών για κάθε τύπο φορτίου υποσταθμού που περιλαμβάνεται στο Σχήμα 6.7 και τα δεδομένα που

παρουσιάζει ο Πίνακας 6.1, τα οποία έχουν προκύψει χρησιμοποιώντας $k=20$, $\alpha=2$, $\beta=0.5$, $\rho=0.5$, $Q=2.7$ και μέγιστο αριθμό επαναλήψεων ίσο με 2000.

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.7, το βέλτιστο μονοπάτι (διαδρομή), το οποίο εκφράζει την καλύτερη στρατηγική επιλογής μεγέθους μετασχηματιστών βάσει της προτεινόμενης τεχνικής, αντιστοιχεί στην απευθείας εγκατάσταση του μεγαλύτερου ονομαστικού μεγέθους το οποίο μπορεί να εξυπηρετήσει το προβλεπόμενο φορτίο στο τέλος της μελέτης. Η ίδια διαδρομή επιλέγεται και για τους υπόλοιπους τύπους φορτίου υποσταθμών για το συγκεκριμένο πραγματικό δίκτυο, τα κόστη των οποίων παρουσιάζει ο Πίνακας 6.3. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μετασχηματιστές με σημαντικά μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ σε σχέση με την τιμή του φορτίου που πρόκειται να εξυπηρετηθεί μέχρι το τέλος της μελέτης (30 χρόνια) λειτουργούν σε χαμηλό ρεύμα φορτίου (χαμηλή φόρτιση), με αποτέλεσμα να καταναλώνουν μικρότερα ποσά ενέργειας ετησίως σε σύγκριση με τους μετασχηματιστές με ονομαστική ισχύ ίση ή κοντά στην τιμή του εξυπηρετούμενου φορτίου. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα γίνεται άμεσα αντιληπτό παρατηρώντας το Σχήμα 6.8, με βάση το οποίο όσο η ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή αυξάνει, τόσο λιγότερο κόστος συνολικών απωλειών ενέργειας εμφανίζει ο μετασχηματιστής αυτός, επιβεβαιώνοντας τη σημαντικότητα των απωλειών ενέργειας κατά την επιλογή του βέλτιστου μεγέθους μετασχηματιστή σε σχέση με το φορτίο που πρόκειται να εξυπηρετηθεί.

Πίνακας 6.3 Αποτελέσματα της προτεινόμενης τεχνικής EAS για την επιτυχή επίλυση του προβλήματος επιλογής μεγέθους μετασχηματιστή το οποίο αφορά το Σχήμα 6.7.

Συνολικό κόστος μετασχηματιστή	Τύπος φορτίου υποσταθμών						Σύνολο
	Τύπος 1	Τύπος 2	Τύπος 3	Τύπος 4	Τύπος 5	Τύπος 6	
Κόστος εγκατάστασης (€)	10677	10296	10677	10677	12648	12648	177573
Κόστος ενέργειας απωλειών (€)	48529	61195	66372	56025	67153	70047	940822
Συνολικό κόστος (€)	59206	71491	77049	66702	79801	82695	1118395



Σχήμα 6.8 Καμπύλες συνολικού κόστους απωλειών ενέργειας για τους έξι μετασχηματιστές διανομής που εξυπηρετούν το φορτίο του υποσταθμού Τύπου 5.

6.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η βέλτιστη επιλογή μεγέθους μετασχηματιστών στα δίκτυα διανομής αποτελεί μια σύνθετη και επίπονη διαδικασία, η οποία εξαρτάται από ένα πλήθος τεχνικών και οικονομικών παραμέτρων. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο προτείνεται μια καινοτομική τεχνική για την επίλυση του προαναφερθέντος προβλήματος, χρησιμοποιώντας τον ελιτιστικό αλγόριθμο των μυρμηγκιών EAS, ελαχιστοποιώντας το συνολικό κόστος του μετασχηματιστή, το οποίο αποτελείται από το άθροισμα του κόστους αγοράς του και του κόστους ενέργειας των απωλειών του κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης. Ταυτόχρονα, λαμβάνονται υπόψη όλοι οι περιορισμοί του προβλήματος, δηλαδή το φορτίο που πρόκειται να εξυπηρετηθεί καθώς επίσης και τα θερμικά όρια φόρτισης. Η συγκεκριμένη καινοτομική τεχνική εφαρμόζεται για την επιλογή του βέλτιστου μεγέθους μετασχηματιστών διανομής σε ένα πραγματικό δίκτυο, αποτελούμενο από 16 υποσταθμούς διανομής οι οποίοι εξυπηρετούν συγκεκριμένο φορτίο κατά τη διάρκεια 30 ετών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εφαρμογής διαπιστώθηκε ότι η προτεινόμενη τεχνική EAS είναι αρκετά αποτελεσματική εξαιτίας του γεγονότος ότι πάντα συγκλίνει στο ολικό βέλτιστο του προβλήματος της επιλογής μεγέθους μετασχηματιστή, μεταξύ της πληθώρας πιθανών στρατηγικών διαστασιολόγησης οι οποίες προκύπτουν μέσω των διαφορετικών πιθανών επιλογών μεγεθών μετασχηματιστών και ετών εγκατάστασής τους.

6.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [6.1] C.-S. Chen, T.-H. Wu, "Optimal distribution transformer sizing by dynamic programming," *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 20, pp. 161-167, 1998.
- [6.2] D. Jovanovic, "Planning of optimal location and sizes of distribution transformers using integer programming," *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 25, pp. 717-723, 2003.
- [6.3] M. Robinson, S. Wallace, D. Woodward, G. Engstrom, "US Navy power transformer sizing requirements using probabilistic analysis," *Journal of Ship Production*, vol. 22, pp. 212-218, 2006.
- [6.4] D. Corne, M. Dorigo, F. Glover, *New Ideas in Optimization*, McGraw-Hill, 1999.
- [6.5] Z. Michalewicz, D. B. Fogel, *How to solve it: Modern Heuristics*, Springer, 2000.
- [6.6] A. Colomi, M. Dorigo, F. Maffioli, V. Maniezzo, G. Righini and M. Trubian, Heuristics from nature for hard combinatorial optimization problems, *International Transactions in Operational Research*, vol. 3, no. 1, pp. 1-21, 1996.
- [6.7] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [6.8] I. Rechenberg, *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme und Prinzipien der biologischen Evolution*, Frommann-Holzboog, Stuttgart, 1973.
- [6.9] S. Kirkpatrick, C. D. Gellat, Jr., and M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing," *Science*, vol. 220, pp. 671-680, 1983.
- [6.10] F. Glover, "Tabu Search – Part I", *ORSA Journal on Computing*, vol. 1, pp. 190-206, 1989.
- [6.11] J. J. Hopfield, D. W. Tank, "Neural computation of decisions in optimization problems," *Biological Cybernetics*, vol. 55, pp. 141-146, 1985.
- [6.12] M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Colomi, "The Ant System: An Autocatalytic Optimizing Process," *Technical Report No. 91-016 Revised*, Politecnico di Milano, Italy, 1991.
- [6.13] J. L. Deneubourg, S. Goss, N. Franks, J. M. Pasteels, "The blind leading the blind: modeling chemically mediated army ant raid patterns," *Journal of Insect Behavior*, vol. 2, no. 5, pp. 719-725, 1989.

- [6.14] J. L. Deneubourg, S. Aron, S. Goss, J. M. Pasteels, "The Self-organizing exploratory pattern of the argentine ant," *Journal of Insect Behavior*, vol. 3, no. 2, pp. 159-169, 1990.
- [6.15] M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Coloni, "Ant system: an autocatalytic optimizing process", *Technical Report 91-016*, Dip. di Elettronica, Politecnico di Milano, Italy, 1991.
- [6.16] M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Coloni, "The ant system: optimization by a colony of cooperating agents," *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, vol. 26, no. 1, pp. 29-41, 1996.
- [6.17] M. Dorigo, L.M. Gambardella, "Ant colonies for the traveling salesman problem," *BioSystems*, vol. 43, pp. 73-81, 1997.
- [6.18] M. Dorigo, L. M. Gambardella, "Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem," *IEEE Transactions on Evolutionary computation*, vol. 1, no. 1, pp. 53-66, 1997.
- [6.19] T. Stützle, H. Hoos, "MAX-MIN Ant System," *Future Generation Computer Systems*, vol. 16, pp. 889-914, 2000.
- [6.20] B. Bullnheimer, R. F. Hartl, C. Strauss, "A new rank-based version of the Ant System: a computational study," *Central European Journal of Operations Research Economy*, vol. 7, no. 1, pp. 25-38, 1999.
- [6.21] C.S. Chang, L. Tian, F.S. Wen, "A new approach to fault section estimation in power systems using Ant system," *Electric Power Systems Research*, vol. 49, pp. 63-70, 1999.
- [6.22] V. Maniezzo, A. Carbonaro, "An ANTS heuristic for the frequency assignment problem," *Future Generation Computer Systems*, vol. 16, pp. 927-935, 2000.
- [6.23] G. D. Caro, M. Dorigo, "AntNet: distributed stigmergetic control for communication networks," *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 9, pp. 317-365, 1998.
- [6.24] C. J. Tong, H. C. Lau, A. Lim, "Ant colony optimization for the ship berthing problem," P.S. Thiagarajan, R. Yap (Eds.): ASIAN'99, LNCS 1742, 359-370, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999.
- [6.25] G. Bilchev, I.C. Parmee, "The ant colony metaphor for searching continuous design spaces," In: T. Fogarty, ed. *Lecture Notes in Computer Science*, 993, Springer Verlag, pp. 25- 39, 1995.
- [6.26] M. Wodrich, G. Bilchev, "Cooperative distributed search: the ants' way," *Control and Cybernetics*, vol. 26, no. 3, pp. 413-445, 1997.
- [6.27] M. Mathur, S. B. Karale, S. Priye, V. K. Jayaraman, B. D. Kulkarni, "Ant Colony Approach to Continuous Function Optimization," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 39, no. 10, pp. 3814- 3822, 2000.
- [6.28] V. K. Jayaraman, B. D. Kulkarni, K. Gupta, J. Rajesh, H.S. Kusumaker, "Dynamic optimisation of fed-batch bioreactors using the ant algorithm," *Biotechnology Progress*, vol. 17, no. 1, pp. 81-88, 2001.
- [6.29] Y. H. Song, C. S. Chou, T. J. Stonham, "Combined heat and power economic dispatch by improved ant colony search algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 52, pp. 115-121, 1999.
- [6.30] T. Stützle, H. H. Hoos, "MAX-MIN Ant System," *Future Generation Computer Systems*, vol. 16, pp. 889-914, 2000.
- [6.31] I. K. Yu, C. S. Chou, Y. H. Song, "Application of the ant colony search algorithm to short-term generation scheduling problem of thermal units," in *Proc International Conference of Power Systems Technology*, vol. 1, pp. 552-556, 1998.

- [6.32] S. J. Huang, "Enhancement of hydroelectric generation scheduling using ant colony system based optimization approaches," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 16, pp. 296–301, 2001.
- [6.33] J. H. Teng, Y.-H. Liu, "A Novel ACS-based optimum switch relocation method," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, pp. 113–120, 2003.
- [6.34] Y. J. Jeon, J. C. Kim, S. Y. Yun, K. Y. Lee, "Application of ant colony algorithm for network reconfiguration in distribution systems," in *Proc. Power Plants Power System Control*, pp. 266–271, 2003.
- [6.35] J. G. Vlachogiannis, N. D. Hatziaargyriou, K. Y. Lee, "Ant colony system-based algorithm for constrained load flow problem," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, pp. 1241–1249, 2005.
- [6.36] C. Blum, "Ant colony optimization: introduction and recent trends," *Physics of Life Reviews*, vol. 2, pp. 353–373, 2005.
- [6.37] M. Dorigo, *Optimization, Learning and Natural Algorithms*, Ph.D. Thesis (in Italian), Politecnico de Milano, Milan, Italy, 1992.
- [6.38] M. Dorigo, E. Bonabeau, G. Theraulaz, "Ant algorithms and stigmergy," *Future Generation Computer Systems*, vol. 16, pp. 851–871, 2000.
- [6.39] T. S. Collet, M. Collet, "Path integration in insects," *Current opinion in Neurobiology*, vol. 10, pp. 757–762, 2000.
- [6.40] S. Camazine, N. R. Franks, J. Sneyd, E. Bonabeau, J.-L. Deneubourg, G. Theraula, *Self-Organization in Biological Systems*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 2001.
- [6.41] E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz, *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*, Oxford University Press, Oxford, 1999.
- [6.42] Γ. Φαινέκος, "Η μέθοδος βελτιστοποίησης με αποικίες μυρμηγκιών - Εφαρμογή σε διακριτά και συνεχή προβλήματα," Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ, 2001.
- [6.43] G. Theraulaz, E. Bonabeau, "A brief history of stigmergy," *Artificial Life*, vol. 5, pp. 97–116, 1999.
- [6.44] P. Grasse, La reconstruction du nid et les coordinations inter-individuelles chez *bellicositermes natalensis* et *cubitermes*, sp. la theorie de la stigmergie: essai d'interpretation du comportement des termites constructeurs, *Insectes Sociaux*, 6, pp. 41–81, 1959.
- [6.45] S. Goss, S. Aron, J. L. Deneubourg, J. M. Pasteels, "Self-organized shortcuts in the Argentine ant," *Naturwissenschaften*, vol. 76, pp. 579–581, 1989.
- [6.46] M. Dorigo, G. Di Caro, L. M. Gambardella, "Ant algorithms for discrete optimization," *Artificial Life*, vol. 5, no. 2, pp. 137–172, 1999.
- [6.47] M. Dorigo, T. Stützle T, *Ant Colony Optimization*, MIT Press, 2004.
- [6.48] E. I. Amoiralis, M. A. Tsili, P. S. Georgilakis, A. G. Kladas, "Ant colony solution to optimal transformer sizing problem", in *CD Proceedings of the 9th International Conference on the Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU 2007)*, Barcelona, Spain, October 9–11, 2007.
- [6.49] E. I. Amoiralis, P. S. Georgilakis, M. A. Tsili, A. G. Kladas, "Ant colony system-based algorithm for optimal multi-stage planning of distribution transformer sizing", *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, LNAI 5178, 2008 (accepted).
- [6.50] *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers*, IEEE Standard C57.91-1995 (R2002).
- [6.51] *IEEE Standard Terminology for Power and Distribution Transformers*, IEEE Standard C57.12.80-2002.

- [6.52] S.W. Heunis, R. Herman, "A thermal loading guide for residential distribution transformers based on time-variant current load models," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1294-1298, 2004.
- [6.53] M. A. Tsili, E. I. Amoiralis, A. G. Kladas, A. T. Souflaris, "Hybrid numerical-analytical technique for power transformer thermal modeling," *IEEE Transactions on Magnetics*, 2008. (accepted)
- [6.54] K. Schneider, R. Hoad, "Initial transformer sizing for single-phase residential load," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 4, pp. 2074-2081, 1992.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μία ανασκόπηση των μεθόδων που αναπτύχθηκαν, παρουσιάζοντας τα συμπεράσματα και τη συμβολή της διατριβής. Επίσης, προτείνονται νέα πεδία έρευνας και μελέτης ως συνέχεια της παρούσας διατριβής.

7.1 ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ

Η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί το πρώτο και ουσιαστικότερο βήμα για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας σε εθνικό επίπεδο αλλά και σε επίπεδο τελικού καταναλωτή. Βασικός στόχος της διδακτορικής διατριβής ήταν η εξοικονόμηση ενέργειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία επιτεύχθηκε με την προδιαγραφή, την επιλογή και την εγκατάσταση στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας των πλέον οικονομικών και ενεργειακά αποδοτικών μετασχηματιστών, χρησιμοποιώντας τα ενιαία μοντέλα εκτίμησης κόστους κατασκευής και λειτουργίας μετασχηματιστών, που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης διατριβής.

Η μείωση του κόστους των μετασχηματιστών και η αύξηση της απόδοσής τους επιτυγχάνεται κυρίως με την τεχνική και οικονομική βελτιστοποίηση της σχεδίασής τους. Για το σκοπό αυτό είναι αναγκαία η ανάπτυξη κατάλληλων μοντέλων εκτίμησης του κόστους κατασκευής τους, σε συνδυασμό με κατάλληλες μεθόδους βελτιστοποίησης, προσαρμοσμένες στο πρόβλημα της σχεδίασης μετασχηματιστών. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, αρχικά διατυπώθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης σχεδίασης των τριφασικών μετασχηματιστών διανομής με τυλιγμένους πυρήνες χρησιμοποιώντας ως μονωτικό ορυκτό λάδι. Κύριος στόχος είναι η εύρεση των βέλτιστων τιμών των κατασκευαστικών παραμέτρων, βάσει των οποίων εξασφαλίζεται σχεδίαση με το ελάχιστο δυνατό κόστος (κατασκευής ή συνολικό κόστος κατοχής) ενώ παράλληλα ικανοποιούνται οι περιορισμοί σχεδίασης. Η βέλτιστη σχεδίαση συνίσταται στον υπολογισμό των ηλεκτρικών και μηχανολογικών χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή, μέσω αναλυτικών σχέσεων και εμπειρικών συντελεστών, ακολουθώντας μια αλληλουχία υπολογισμών οι οποίοι εμπλέκουν μια σειρά από μεταβλητές σχεδίασης. Βάσει των χαρακτηριστικών αυτών υπολογίζεται το κόστος των επιμέρους συνιστωσών του ενεργού και μηχανικού μέρους του μετασχηματιστή, το οποίο χρησιμοποιείται για την εξαγωγή της αντικειμενικής συνάρτησης βελτιστοποίησης. Η μη γραμμική μορφή της συνάρτησης αυτής, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι μεταβλητές σχεδίασης μπορεί να λαμβάνουν συνεχείς ή διακριτές τιμές καθιστούν τη βελτιστοποίηση ένα δύσκολο πρόβλημα μη γραμμικού μικτού ακέραιου προγραμματισμού με μη γραμμικούς περιορισμούς. Παράλληλα περιγράφηκε ο τρόπος με τον οποίο επιλύεται από την υφιστάμενη ευρετική μεθοδολογία βελτιστοποίησης και οι αδυναμίες της στην εύρεση του ολικού βέλτιστου. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν και τεκμηριώθηκαν οι αναλυτικές εξισώσεις της σχεδίασης, οι οποίες συνθέτουν τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης, αποτελώντας τη βάση για τις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν.

Έχοντας ορίσει τις αναλυτικές εξισώσεις της συνολικής σχεδίασης και πριν την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης με καινοτομικές μεθοδολογίες, αντιμετωπίστηκε ένα

σημαντικό υποπρόβλημα του κύριου προβλήματος το οποίο συνίσταται στην επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές. Αναλυτικότερα, αναπτύχθηκαν καινοτομικές μεθοδολογίες τεχνητής νοημοσύνης, ικανές να επιλέγουν αυτόματα το υλικό των τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές, το οποίο αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο για τη μείωση του κατασκευαστικού κόστους, χωρίς να χρειάζεται να γίνει δύο φορές η βελτιστοποίηση της σχεδίασης: μία φορά με τυλίγματα χαλκού και μία φορά με τυλίγματα αλουμινίου. Η επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές αποτελεί μια σημαντική παράμετρο για τη μείωση του κατασκευαστικού κόστους. Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος, δημιουργήθηκε μια πλούσια βάση γνώσης που περιείχε 2646 βέλτιστες σχεδιάσεις. Για κάθε μία από αυτές τις 2646 σχεδιάσεις υπολογίστηκαν 13 ιδιότητες εισόδου. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και τα δέντρα απόφασης επιλέχθηκαν ως οι πλέον κατάλληλες τεχνικές επίλυσης του προβλήματος επιλογής του υλικού των τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές, χρησιμοποιώντας με επιτυχία τη προαναφερθείσα βάση γνώσης.

Αφού δημιουργήθηκε μια πρώτη προσέγγιση του προβλήματος με την τεχνική των νευρωνικών δικτύων, αναπτύσσοντας ένα πλήθος από διαφορετικές τοπολογίες νευρωνικών δικτύων, αναζητώντας εκείνη με το μεγαλύτερο βαθμό επιτυχίας ταξινόμησης στο σύνολο ελέγχου, η έρευνα επεκτάθηκε με την ανάπτυξη ενός καινοτομικού μοντέλου επιλογής του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών. Το συγκεκριμένο μοντέλο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα δύο μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης, των δέντρων απόφασης και των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Τα δέντρα απόφασης επιλέγουν αυτόματα τις πιο σημαντικές παραμέτρους εισόδου που επηρεάζουν τον προσδιορισμό του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων, ενώ τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για την επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών με βάση όχι μόνο τις συνολικές υποψήφιες παραμέτρους εισόδου αλλά και τις επιλεγμένες παραμέτρους από τα δέντρα απόφασης. Επίσης, διεξήχθησαν πειράματα με τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα τα οποία αποτελούνταν από ένα ή δύο κρυφά στρώματα και δύο διαφορετικές διαμερίσεις της βάσης γνώσης. Καταλήγοντας, παρατηρήθηκε ότι το καλύτερο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποίησε και τις 13 ιδιότητες ως νευρώνες εισόδου ήταν εκείνο με ένα κρυφό στρώμα, το οποίο διαμέρισε το σύνολο μάθησης στο 50% της βάσης γνώσης και το υπόλοιπο 50% στο σύνολο ελέγχου, αποδίδοντας την καλύτερη συμπεριφορά με βαθμό επιτυχίας ταξινόμησης ίσο με 95.92%. Από την άλλη μεριά, το καλύτερο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποίησε τις 6 ιδιότητες (που προέκυψαν από το δέντρο απόφασης) ως νευρώνες εισόδου ήταν εκείνο με δύο κρυφά στρώματα, το οποίο διαμέρισε το σύνολο μάθησης στο 50% της βάσης γνώσης και το υπόλοιπο 50% στο σύνολο ελέγχου, αποδίδοντας βαθμό επιτυχίας ταξινόμησης ίσο με 94.58%.

Στη συνέχεια, αναπτύχθηκε μία υβριδική τεχνική τεχνητής νοημοσύνης-αριθμητικής μεθόδου για την επιβεβαίωση της προτεινόμενης μεθόδου επιλογής του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών, χρησιμοποιώντας τα δέντρα απόφασης για την επιλογή των παραμέτρων εισόδου, την υβριδική τεχνική πεπερασμένων στοιχείων-οριακών στοιχείων για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών του μετασχηματιστή και τα νευρωνικά δίκτυα για την επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών. Στόχος της τεχνικής ήταν να συνδυάσει την ακρίβεια της αριθμητικής μεθόδου στην πρόβλεψη των χαρακτηριστικών κάθε σχεδίασης, με όσο το δυνατόν μικρότερη υπολογιστική επιβάρυνση, λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε η υβριδική μέθοδος πεπερασμένων-οριακών στοιχείων. Η ακρίβεια της προτεινόμενης τεχνικής είναι 96%, δηλαδή ο βαθμός επιτυχίας ταξινόμησης στο σύνολο ελέγχου για την επιλογή υλικού τυλιγμάτων στους μετασχηματιστές είναι 96%, γεγονός που την αναδεικνύει ως μια μέθοδο πολύ αποδοτική, ειδικά για βιομηχανική χρήση.

Έχοντας επιλύσει επιτυχώς το υποπρόβλημα της επιλογής του υλικού των τυλιγμάτων, επόμενος στόχος ήταν να αναπτυχθούν μεθοδολογίες ικανές να επιλύσουν το συνολικό πρόβλημα σχεδίασης του μετασχηματιστή. Με βάση τα παραπάνω, παρουσιάστηκαν υβριδικές μεθοδολογίες μικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού σε συνδυασμό με τα πεπερασμένα στοιχεία και νέες τεχνικές που επεμβαίνουν στη σχεδίαση του μετασχηματιστή, μεθοδολογίες που αποδείχθηκαν ότι είναι ικανές να επιλύσουν επιτυχημένα

το πρόβλημα βελτιστοποίησης, δηλαδή να ελαχιστοποιήσουν το κατασκευαστικό κόστος των μετασχηματιστών διανομής τυλιγμένου πυρήνα. Η εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων είχε ως στόχο την εύρεση της βέλτιστης σχεδίασης των μετασχηματιστών διανομής. Συγκεκριμένα, λόγω της ευρετικής φύσης του αλγόριθμου βελτιστοποίησης, η υφιστάμενη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία δεν έχει την ικανότητα να υπολογίσει το ολικό βέλτιστο μιας σχεδίασης, παρά μόνο να προσεγγίσει τη βέλτιστη λύση, αδυνατώντας να μειώσει περαιτέρω το κόστος κατασκευής των μετασχηματιστών διανομής. Στόχος που υλοποιήθηκε ήταν να εφαρμοστούν μεθοδολογίες καινοτομικές, ικανές να προσδιορίσουν τη βέλτιστη σχεδίαση μετασχηματιστών, μειώνοντας το κατασκευαστικό κόστος ενώ παράλληλα να ικανοποιούν τους περιορισμούς (πελατών και βιομηχανίας) και τα διεθνή πρότυπα.

Τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας συνολικής σχεδίασης του μετασχηματιστή σε σύγκριση με την υφιστάμενη μεθοδολογία είναι τα ακόλουθα:

1. Η προτεινόμενη μεθοδολογία χρειάζεται 26 παραμέτρους εισόδου για τη βέλτιστη σχεδίαση, σε αντίθεση με την υφιστάμενη που χρειάζεται 134 παραμέτρους εισόδου. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι στην προτεινόμενη μέθοδο ένα μεγάλο ποσοστό των δεδομένων εισόδου ορίζονται αυτόματα, λαμβάνοντας υπόψη τις 14 παραμέτρους εισόδου που αφορούν τα απαραίτητα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός μετασχηματιστή, ενώ οι υπόλοιπες 12 παράμετροι εισόδου αφορούν τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.
2. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εντοπίζει βέλτιστη λύση που είναι κατά μέσο όρο 1.60% φθηνότερη από τη λύση που δίνει η υφιστάμενη μεθοδολογία. Το συγκεκριμένο ποσοστό προέκυψε μετά από μια πληθώρα βέλτιστων σχεδιάσεων που πραγματοποιήθηκαν σε ευρύ φάσμα μετασχηματιστών διανομής διαφορετικής ονομαστικής ισχύος, απωλειών και γενικότερα διαφορετικών τεχνικών χαρακτηριστικών.
3. Η προτεινόμενη μεθοδολογία καταλήγει σχεδόν πάντα στη βέλτιστη λύση ανεξαρτήτως από το εύρος των διαστημάτων των μεταβλητών σχεδίασης. Με άλλα λόγια, ο χρήστης κατά τη σχεδίαση ενός μετασχηματιστή μπορεί να ορίσει τα ανώτερα και κατώτερα διαστήματα των μεταβλητών σχεδίασης με τέτοιες τιμές, οι οποίες να καθορίζουν ένα αρκετά μεγάλο διάστημα. Για παράδειγμα, μπορεί να καθορίσει το διάστημα [5 , 35], το οποίο αντιπροσωπεύει το διάστημα μέσα στο οποίο πρέπει να επιλεγεί ο αριθμός των σπειρών του πηνίου της χαμηλής τάσης για ένα μετασχηματιστή με ονομαστική ισχύ 1600 kVA. Αντίστοιχα μπορεί να καθορίσει και τα υπόλοιπα διαστήματα που αντιπροσωπεύουν τις υπόλοιπες μεταβλητές σχεδίασης. Παρά το γεγονός ότι μπορεί να έχουν επιλεγεί μεγάλα διαστήματα, κυρίως από έναν άπειρο χρήστη, η προτεινόμενη μεθοδολογία εντοπίζει τη βέλτιστη λύση σε σύντομο χρονικό διάστημα, σε αντίθεση με την υφιστάμενη μεθοδολογία, βάσει της οποίας αν επιλέξει ο χρήστης μεγάλο πλήθος τιμών για τις μεταβλητές σχεδίασης η διαδικασία βελτιστοποίησης είναι αρκετά χρονοβόρα.
4. Οι τρεις καινοτομικές προσεγγίσεις που αφορούν τον υπολογισμό της τιμής της πυκνότητας ρεύματος εξασφαλίζουν την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης εντοπίζοντας την ολικά βέλτιστη σχεδίαση, η οποία ικανοποιεί τις διεθνείς προδιαγραφές και τις απαιτήσεις του πελάτη. Αντίθετα, ο βηματικός τρόπος (αρκετές εναλλακτικές τιμές στις μεταβλητές σχεδίασης) που αναζητά η υφιστάμενη μεθοδολογία τη βέλτιστη λύση δεν εγγυάται ολικό βέλτιστο.
5. Η ταχύτητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας στον εντοπισμό της βέλτιστης λύσης είναι ακόμη ένα πλεονέκτημα σε σχέση με την υφιστάμενη μεθοδολογία.
6. Η προτεινόμενη μεθοδολογία καταλήγει πάντα σε μια βέλτιστη λύση σε αντίθεση με την υφιστάμενη μεθοδολογία που μπορεί να απορρίψει όλες τις υποψήφιες λύσεις.
7. Η προτεινόμενη μεθοδολογία δεν απαιτεί ιδιαίτερη εμπειρία από το μελετητή ώστε να εντοπιστεί η βέλτιστη λύση, σε αντίθεση με την υφιστάμενη μεθοδολογία όπου ο χρήστης χρειάζεται τεχνογνωσία και εμπειρία για τον επιτυχή χειρισμό και βελτιστοποίηση μιας σχεδίασης μετασχηματιστή.

8. Το γραφικό περιβάλλον της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι πολύ φιλικό, συγκεντρώνοντας τις απαραίτητες μεταβλητές εισόδου στο κύριο παράθυρο (Παράρτημα Α), χωρίς να κουράζει το χρήστη με πολλαπλά παράθυρα. Με άλλα λόγια, το γραφικό περιβάλλον είναι αρκετά ευέλικτο για κάθε χρήστη, είτε πρόκειται για έναν εξειδικευμένο σχεδιαστή μετασχηματιστών είτε για έναν αρχάριο.

Μετά την αντιμετώπιση του προβλήματος ελαχιστοποίησης του κατασκευαστικού κόστους του μετασχηματιστή, η έρευνα επεκτάθηκε στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής του απόδοσης, μέσω ανάπτυξης κατάλληλων μοντέλων κόστους λειτουργίας. Στα μοντέλα αυτά αντικατοπτρίζεται η επίπτωση των απωλειών ενέργειας του μετασχηματιστή κατά τη διάρκεια ζωής του, τόσο από την πλευρά οικονομικής αποτίμησής τους από το χρήστη (ηλεκτρική εταιρεία ή βιομηχανικό χρήστη) όσο και σε επίπεδο περιβαλλοντικών επιπτώσεών τους. Το πρόβλημα αυτό συνδέεται άμεσα με το ζήτημα της εξοικονόμησης ενέργειας, το οποίο αντιμετωπίζεται με όλο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον τις τελευταίες δεκαετίες σε παγκόσμιο επίπεδο. Λόγω του πλήθους των εγκατεστημένων μετασχηματιστών στα δίκτυα διανομής, η εξοικονόμηση ενέργειας συνδέεται άμεσα με τη μείωση των απωλειών τους και την αύξηση της ενεργειακής τους απόδοσης. Με δεδομένη την πρόσφατη έντονη ευαισθητοποίηση της παγκόσμιας κοινότητας στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των εκπομπών αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου λόγω της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, είναι πλέον αναγκαίο να ληφθούν και αυτές υπόψη κατά την κοστολόγηση των απωλειών ενέργειας. Με βάση τα παραπάνω, αναπτύχθηκε ένα καινοτομικό μοντέλο οικονομικής αξιολόγησης των μετασχηματιστών, το οποίο λαμβάνει υπόψη το περιβαλλοντικό κόστος το οποίο προέρχεται από τα αέρια του θερμοκηπίου που δημιουργούνται από τις απώλειες των μετασχηματιστών διανομής. Συγκεκριμένα, το προτεινόμενο μοντέλο ενσωματώνει το περιβαλλοντικό κόστος στη κλασσική σχέση του συνολικού κόστους κατοχής, αναδεικνύοντας τα οφέλη που προκύπτουν για τις ηλεκτρικές εταιρίες από την εγκατάσταση μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης, ύστερα από εφαρμογή σε μετασχηματιστές που εξυπηρετούν διάφορα είδη φορτίου σύμφωνα με πραγματικά δεδομένα προερχόμενα από το Ελληνικό σύστημα. Η προτεινόμενη μεθοδολογία επεκτείνει τον οδηγό κοστολόγησης απωλειών του προτύπου IEEE.

Τέλος, αντιμετωπίστηκε το πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής μεγέθους μετασχηματιστών στα δίκτυα διανομής, το οποίο αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία, εξαρτώμενη από ένα πλήθος τεχνικών και οικονομικών παραμέτρων. Με βάση το συγκεκριμένο πρόβλημα προτείνεται μια καινοτομική τεχνική για την επίλυσή του, χρησιμοποιώντας τον ελιτιστικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (EAS), ελαχιστοποιώντας το συνολικό κόστος του μετασχηματιστή, το οποίο αποτελείται από το άθροισμα του κόστους αγοράς του και του κόστους των απωλειών του κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης. Ταυτόχρονα, λαμβάνονται υπόψη όλοι οι περιορισμοί του προβλήματος, δηλαδή το φορτίο που πρόκειται να εξυπηρετηθεί καθώς επίσης και τα θερμικά όρια φόρτισης. Η συγκεκριμένη καινοτομική τεχνική εφαρμόζεται για την επιλογή του βέλτιστου μεγέθους μετασχηματιστών διανομής σε ένα πραγματικό δίκτυο, αποτελούμενο από 16 υποσταθμούς διανομής οι οποίοι εξυπηρετούν συγκεκριμένο φορτίο κατά τη διάρκεια 30 ετών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εφαρμογής διαπιστώθηκε ότι η προτεινόμενη τεχνική EAS είναι αρκετά αποτελεσματική εξαιτίας του γεγονότος ότι πάντα συγκλίνει στο ολικό βέλτιστο του προβλήματος της επιλογής μεγέθους μετασχηματιστή, μεταξύ της πληθώρας πιθανών στρατηγικών διαστασιολόγησης οι οποίες προκύπτουν μέσω των διαφορετικών πιθανών επιλογών μεγεθών μετασχηματιστών και ετών εγκατάστασής τους στο δίκτυο.

7.2 ΣΥΜΒΟΛΗ ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η συμβολή και τα σημεία προαγωγής της επιστήμης της παρούσας διδακτορικής διατριβής εντοπίζονται κυρίως στην ανάπτυξη και εφαρμογή των ακόλουθων μεθοδολογιών:

1. *Εισαγωγή υβριδικής αιτιοκρατικής μεθόδου βελτιστοποίησης για την εύρεση του ολικού βέλτιστου σχεδίασης μετασχηματιστών διανομής τύπου τυλιγμένου πυρήνα.* Αναπτύσσεται μεθοδολογία επίλυσης του προβλήματος της βέλτιστης σχεδίασης του μετασχηματιστή με εφαρμογή του μικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού, καταλήγοντας σε μία καινοτομική υβριδική τεχνική ικανή να εξασφαλίσει ολική βέλτιστη λύση. Τα βασικά σημεία υπεροχής της μεθοδολογίας συνίστανται: i) στην επιλογή κατάλληλου αλγορίθμου βελτιστοποίησης του συνολικού κατασκευαστικού και λειτουργικού κόστους του μετασχηματιστή, ii) στην επέκταση του χώρου των πιθανών λύσεων μέσω κατάλληλου προσδιορισμού του τρόπου μεταβολής καίριων μεταβλητών σχεδίασης, όπως η διατομή των αγωγών, εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο ολικά βέλτιστες σχεδιάσεις, iii) στην ενσωμάτωση αριθμητικών πεδιακών τεχνικών για την επιβεβαίωση της βέλτιστης σχεδίασης. Με τον τρόπο αυτό ξεπεράστηκε ένα από τα βασικά προβλήματα της υφιστάμενης μεθοδολογίας σχεδίασης που χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία, η οποία, λόγω της ευρετικής φύσης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, δεν έχει την ικανότητα να υπολογίσει το ολικό βέλτιστο μιας σχεδίασης, παρά μόνο να προσεγγίσει τη βέλτιστη λύση, αδυνατώντας να μειώσει περαιτέρω το κόστος κατασκευής των μετασχηματιστών διανομής.
2. *Ενσωμάτωση μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης στην επιλογή του υλικού των τυλιγμάτων μετασχηματιστών.* Για την επίλυση του υποπροβλήματος της βέλτιστης σχεδίασης που αφορά την επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών, αναπτύσσεται καινοτομικό μοντέλο τεχνητής νοημοσύνης. Το συγκεκριμένο μοντέλο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα δύο μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης, των δέντρων απόφασης και των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Τα δέντρα απόφασης επιλέγουν αυτόματα τις πιο σημαντικές παραμέτρους εισόδου που επηρεάζουν τον προσδιορισμό του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων, ενώ τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται για την επιλογή του υλικού κατασκευής των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών με βάση όχι μόνο τις συνολικές υποψήφιες παραμέτρους εισόδου αλλά και τις επιλεγμένες παραμέτρους από τα δέντρα απόφασης. Συνεπώς, αποφεύγεται η ανάγκη του κατασκευαστή να εξετάσει για κάθε σχεδίαση ενός μετασχηματιστή ποιο υλικό τυλιγμάτων είναι το οικονομικότερο, ο χαλκός ή το αλουμίνιο, οπότε μειώνεται σημαντικά ο χρόνος που απαιτείται για τη βελτιστοποίησή της.
3. *Ενσωμάτωση περιβαλλοντικού κόστους στην οικονομική αξιολόγηση μετασχηματιστών.* Στα πλαίσια της διατριβής αναπτύσσεται μεθοδολογία οικονομικής αξιολόγησης μετασχηματιστών μέσω επέκτασης του μοντέλου που περιγράφεται στο διεθνές πρότυπο C57.120 του Ινστιτούτου των ηλεκτρολόγων και ηλεκτρονικών μηχανικών (IEEE) με εισαγωγή του περιβαλλοντικού κόστους. Κατά την ανάπτυξη του μοντέλου λαμβάνονται υπόψη όλα τα χαρακτηριστικά τόσο του φορτίου που εξυπηρετείται από τους μετασχηματιστές όσο και του δικτύου στο οποίο εγκαθίστανται, δίνοντας με αυτόν τον τρόπο ρεαλιστική αποτύπωση των συνθηκών λειτουργίας τους κατά τη διάρκεια ζωής τους, και καταλήγοντας σε αξιόπιστα αποτελέσματα για την επίπτωση του συνυπολογισμού του περιβαλλοντικού κόστους στη διαδικασία οικονομικής αξιολόγησης των μετασχηματιστών
4. *Ανάπτυξη και εφαρμογή στοχαστικής μεθόδου βελτιστοποίησης για τη διαστασιολόγηση μετασχηματιστών προς εγκατάσταση σε δίκτυο διανομής:* Λόγω των χαρακτηριστικών του συγκεκριμένου προβλήματος συνδυαστικής βελτιστοποίησης, επιλέχθηκε για την επίλυσή του μέθοδος βασισμένη στον ελιτιστικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών. Η προτεινόμενη μέθοδος επιλέγει επιτυχώς την ονομαστική ισχύ ενός πλήθους μετασχηματιστών προς εγκατάσταση σε ένα δίκτυο διανομής, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβολές οικονομικών και τεχνικών παραγόντων κατά τη διάρκεια της θεωρούμενης μελέτης. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου καταδεικνύουν την καταλληλότητά της για την επίλυση του προβλήματος της επιλογής μεγέθους μετασχηματιστή, κατά τον προγραμματισμό των δικτύων διανομής, λόγω της δυνατότητας της μεθόδου να αξιολογήσει σωστά και με μικρό υπολογιστικό κόστος το

πλήθος των πιθανών στρατηγικών διαστασιολόγησης των μετασχηματιστών σε ένα δίκτυο.

7.3 ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής αναδεικνύονται σημεία, η ανάλυση των οποίων αξίζει να αποτελέσει αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης. Τέτοια σημεία είναι τα ακόλουθα:

1. Η διερεύνηση νέων μεθόδων για τη βελτιστοποίηση της συνολικής σχεδίασης των μετασχηματιστών διανομής, όπως για παράδειγμα η εφαρμογή στοχαστικών μεθόδων και πιο συγκεκριμένα των γενετικών αλγορίθμων ή των εξελικτικών αλγορίθμων.
2. Επέκταση της μεθόδου βελτιστοποίησης της σχεδίασης του μετασχηματιστή που αναπτύχθηκε στη διατριβή σε άλλους τύπους μετασχηματιστών εκτός από τους μετασχηματιστές διανομής τύπου τυλιγμένου πυρήνα:
 - μετασχηματιστές ξηρού τύπου
 - μετασχηματιστές στοιβαχτού πυρήνα
 - μονοφασικούς μετασχηματιστές
 - μετασχηματιστές με πυρήνα από άμορφο σίδηρο
 - υπεραγωγίμους μετασχηματιστές
 - μετασχηματιστές με νέα μονωτικά υλικά και μονωτικά λάδια, όπως φυσικοί εστέρες ή φυτικά λάδια
3. Επέκταση της μεθοδολογίας οικονομικής αξιολόγησης που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή, με λεπτομερέστερη κοστολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ανά τύπο και ισχύ μετασχηματιστή, για τη σχεδίαση μετασχηματιστών που πληρούν τους διεθνείς περιβαλλοντικούς κανονισμούς. Αναλυτικότερα, ανάλογα με την ονομαστική ισχύ του μετασχηματιστή και τις απώλειες του, παρουσιάζει ενδιαφέρον η ανάπτυξη λεπτομερούς μεθοδολογίας υπολογισμού των ορίων απωλειών πάνω από τα οποία ο ιδιοκτήτης των μετασχηματιστών πρέπει να πληρώνει ορισμένες ρήτρες ανάλογα με το πόσο υπερβαίνει τα προκαθορισμένα όρια (απώλειες αναφοράς). Σε αντίθετη περίπτωση, όχι μόνο δεν πληρώνει, αλλά επωφελείται ανάλογα με τους κανονισμούς που διέπουν κάθε χώρα. Στόχος της παραπάνω διαδικασίας είναι να μην επιλέγονται οι απώλειες αναφοράς από τις κατηγορίες απωλειών των υφιστάμενων προτύπων (CENELEC ή IEEE), αλλά να προκύπτουν από τη συνολική συμβολή των μετασχηματιστών (ανά ισχύ) στις απώλειες του δικτύου στο οποίο εγκαθίστανται, η οποία θα χρησιμοποιείται ως κριτήριο για την εξαγωγή της ανώτερης επιτρεπτής τιμής απωλειών τους. Βάσει των παραπάνω, εξαιρετικά χρήσιμη θα ήταν η διερεύνηση και σχεδίαση μετασχηματιστών οι οποίοι θα πληρούν ή όχι τις συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες ανάλογα με τις απαιτήσεις του αγοραστή.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

A

ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

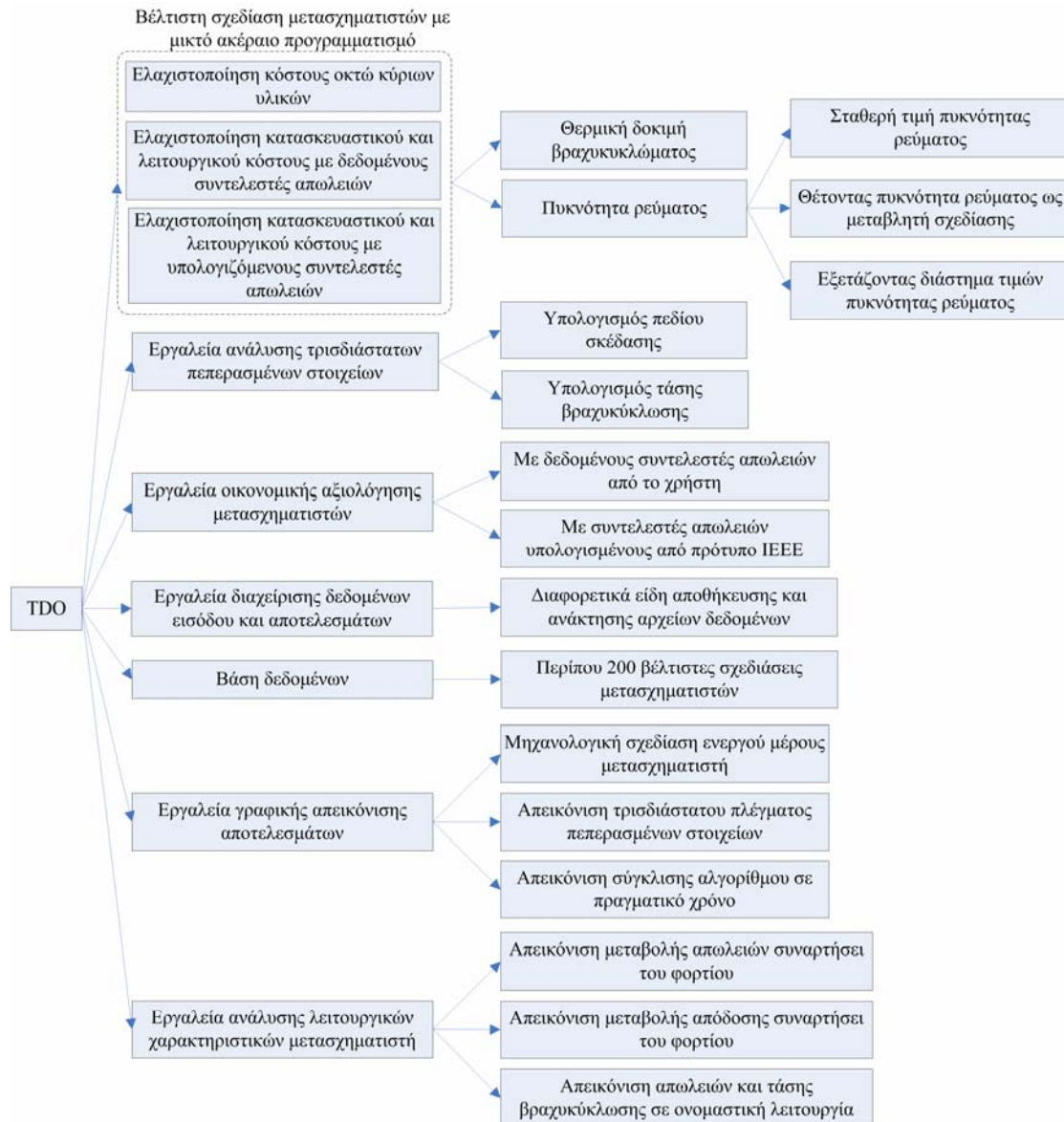
Η εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών με τις ολοένα και μεγαλύτερες δυνατότητες διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων αλλά και με την αύξηση της ταχύτητας εκτελέσεως των αριθμητικών πράξεων σε συνδυασμό με την εξέλιξη των μεθόδων βελτιστοποίησης, κατέστησε εφικτή την επίλυση σύνθετων προβλημάτων του μηχανικού, τα οποία θεωρούνταν απροσπέλαστα πριν από μερικά χρόνια. Το πακέτο προγράμματος που ονομάζεται TDO αποτελεί ένα πλήρες λογισμικό για τη σχεδίαση και απεικόνιση μετασχηματιστών διανομής παρέχοντας στο χρήστη φιλικό και εύχρηστο περιβάλλον εργασίας. Το TDO είναι μια συλλογή από εργαλεία βελτιστοποίησης, ανάλυσης και απεικόνισης, η οποία παρέχει τη δυνατότητα της διεπιδραστικής κατασκευής και ανάλυσης μετασχηματιστών διανομής. Επιπλέον, μια μεγάλη βάση δεδομένων με περίπου 200 βέλτιστες σχεδιάσεις μετασχηματιστών έχει ενσωματωθεί στο παρόν λογισμικό, παρέχοντας την δυνατότητα στο χρήστη να τις εισάγει στο πρόγραμμα για περαιτέρω επεξεργασία. Παράλληλα, η τρισδιάστατη τεχνική των πεπερασμένων στοιχείων, μέσω της δημιουργίας και επίλυσης του αριθμητικού μοντέλου του φυσικού προβλήματος, αναλύει και σχεδιάζει τη βέλτιστη λύση, αποτιμώντας περαιτέρω την ποιότητα της υπάρχουσας σχεδίασης.

A.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με δεδομένη την υπολογιστική ισχύ των ηλεκτρονικών υπολογιστών που εξασφαλίζουν σε ελάχιστο χρόνο τη ανάλυση και διαστασιολόγηση ενός δεδομένου προϊόντος τίθεται το θέμα της δημιουργίας μιας νέας γενιάς προγραμμάτων που θα διευρύνουν τις δυνατότητες σχεδιασμού των προϊόντων προσφέροντας καλύτερες λύσεις σε σχέση με κάποια κριτήρια. Το λογισμικό TDO (Transformer Design Optimization) είναι μια συλλογή από εργαλεία, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης μετασχηματιστών διανομής. Αναλυτικότερα, το συγκεκριμένο πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα να σχεδιάσει συνολικά μετασχηματιστές διανομής χρησιμοποιώντας την τεχνική του μικτού ακέραιου προγραμματισμού. Στη συνέχεια, ο χρήστης του λογισμικού μπορεί να αξιολογήσει την ποιότητα της κάθε βέλτιστης λύσης με μια σειρά από γραφικά εργαλεία απεικόνισης και κατάλληλα αρχεία εξόδου. Επίσης, η αριθμητική μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί επιπλέον εργαλείο ανάλυσης, υπολογίζοντας το πεδίο σκέδασης και την τάση βραχυκύκλωσης του βέλτιστου μετασχηματιστή. Ακόμη, το λογισμικό TDO παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να αξιολογήσει οικονομικά όχι μόνο την κάθε βέλτιστη σχεδίαση αλλά και να την συγκρίνει και με άλλες σχεδιάσεις. Παράλληλα, στο πρόγραμμα TDO έχει ενσωματωθεί μια μεγάλη βάση δεδομένων με υπάρχουσες βέλτιστες σχεδιάσεις (200 μετασχηματιστές), οι οποίες μπορούν να εισαχθούν στο πρόγραμμα για περαιτέρω επεξεργασία. Η βασική δομή του προγράμματος TDO παρουσιάζεται στο Σχήμα A.1. Το λογισμικό TDO έχει δημιουργηθεί σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab.

Πριν περιγράψουν αναλυτικά οι δυνατότητες του προγράμματος, θα αναλυθεί το κεντρικό ή κύριο παράθυρο του λογισμικού TDO. Για την καλύτερη κατανόηση του

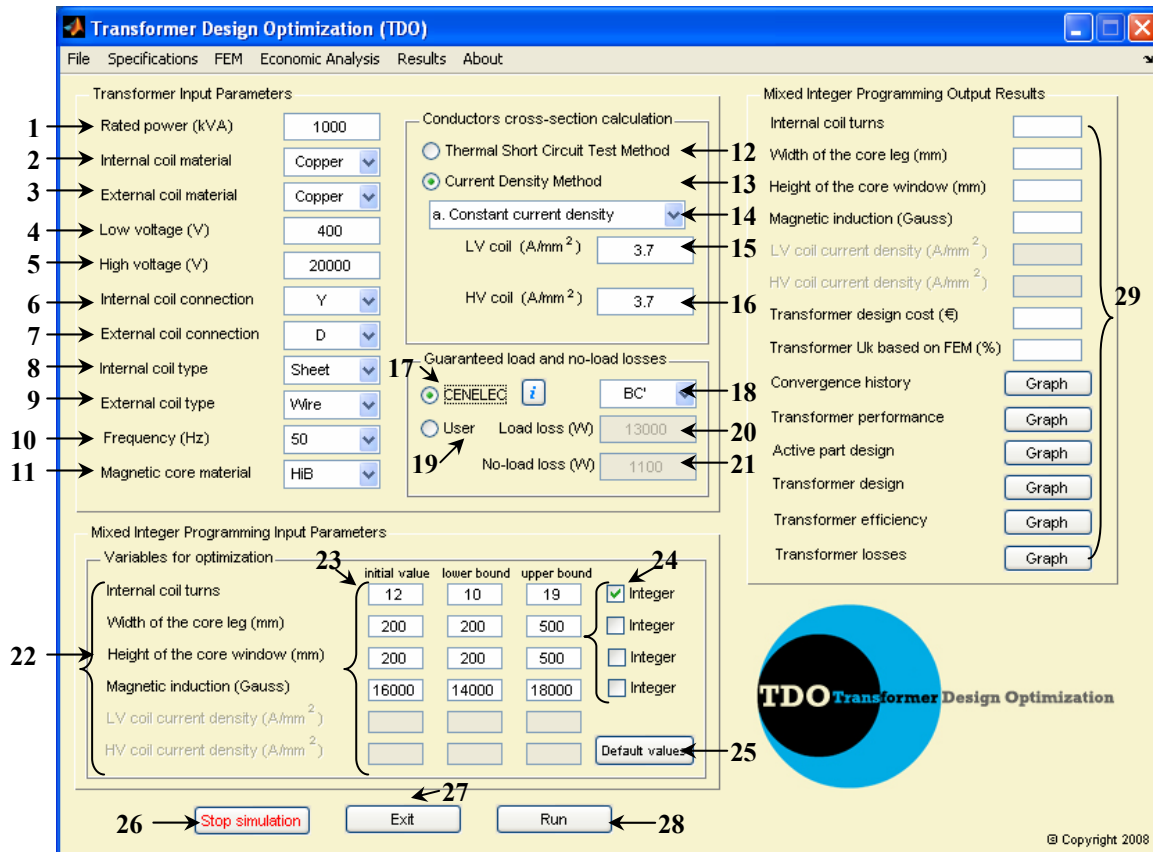
προγράμματος, έχουν εισαχθεί ως παράδειγμα τα δεδομένα εισόδου που χρειάζονται για τη σχεδίαση ενός μετασχηματιστή με ονομαστική ισχύ 1000 kVA (Σχήμα Α.2).



Σχήμα Α.1 Η δομή και τα χαρακτηριστικά του λογισμικού *TDO*.

Πριν ξεκινήσει η βέλτιστη σχεδίαση του μετασχηματιστή, δυο κύρια βήματα είναι απαραίτητα. Τα βήματα αυτά αποτελούνται από την εισαγωγή δεδομένων εισόδου του μετασχηματιστή και της τεχνικής του μικτού ακέραιου προγραμματισμού. Μετά την επιτυχή συμπλήρωση των δεδομένων εισόδου, ξεκινά η βελτιστοποίηση της σχεδίασης. Πλεονέκτημα του λογισμικού *TDO* αποτελεί το γεγονός ότι κατορθώνει με μόλις 15 δεδομένα εισόδου να εντοπίσει και να κατασκευάσει μια σχεδόν βέλτιστη σχεδίαση και υπό προϋποθέσεις βέλτιστη σχεδίαση, ορίζοντας ο χρήστης 14 παραμέτρους που αφορούν το μετασχηματιστή και μόλις μια που αφορά το μικτό ακέραιο προγραμματισμό. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι 14 παράμετροι αποτελούν ικανοποιητικό αριθμό δεδομένων διότι στο λογισμικό *TDO* έχουν ενσωματωθεί αλγόριθμοι ικανοί να ορίσουν τα υπόλοιπα δεδομένα εισόδου, μεταφράζοντας κατάλληλα την εμπειρία μηχανικών μελέτης και σχεδίασης μετασχηματιστών. Παράλληλα, μια μόνο παράμετρος (η ονομαστική ισχύς του υπό εξέταση μετασχηματιστή) είναι ικανή να ορίσει τις αρχικές συνθήκες της μεθόδου βελτιστοποίησης, λαμβάνοντας και σε αυτή την περίπτωση υπόψη προηγούμενη εμπειρία δοκιμών και

σφαλμάτων. Όμως, σε κάθε περίπτωση, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επέμβει και να επαναπροσδιορίσει όλες τις παραμέτρους που αφορούν όχι μόνο τη σχεδίαση ενός μετασχηματιστή αλλά και τη μέθοδο βελτιστοποίησης, οι οποίες έχουν ορισθεί αυτόματα από το πρόγραμμα. Συνεπώς, είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί η πλήρης παραμετροποίηση που προσφέρει το πρόγραμμα *TDO*. Παρακάτω περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο εισάγει ο χρήστης τα δεδομένα εισόδου χρησιμοποιώντας το φιλικό περιβάλλον του *TDO*.



Σχήμα Α.2 Γραφικό περιβάλλον του προγράμματος *TDO*.

- | | | | |
|-----|--------------------------|--------|---|
| 1. | Rated power (kVA) | 1000 | Εισαγωγή τιμής της ονομαστικής ισχύος |
| 2. | Internal coil material | Copper | Επιλογή υλικού του πηνίου χαμηλής τάσης |
| 3. | External coil material | Copper | Επιλογή υλικού του πηνίου υψηλής τάσης |
| 4. | Low voltage (V) | 400 | Εισαγωγή τιμής της πολικής τάσης του πηνίου χαμηλής τάσης |
| 5. | High voltage (V) | 20000 | Εισαγωγή τιμής της πολικής τάσης του πηνίου υψηλής τάσης |
| 6. | Internal coil connection | Y | Επιλογή συνδεσμολογίας του πηνίου χαμηλής τάσης |
| 7. | External coil connection | D | Επιλογή συνδεσμολογίας του πηνίου υψηλής τάσης |
| 8. | Internal coil type | Sheet | Επιλογή τύπου αγωγού του πηνίου χαμηλής τάσης |
| 9. | External coil type | Wire | Επιλογή τύπου αγωγού του πηνίου υψηλής τάσης |
| 10. | Frequency (Hz) | 50 | Επιλογή της τιμής της συχνότητας |

11. Magnetic core material Επιλογή του μαγνητικού υλικού
12. ☐ Thermal Short Circuit Test Method Επιλογή υπολογισμού της διατομής των αγωγών με βάση τη θερμική δοκιμή βραχυκύκλωσης
13. ☒ Current Density Method Επιλογή υπολογισμού της διατομής των αγωγών με βάση την πυκνότητα ρεύματος
14. Επιλογή μεθόδου υπολογισμού των πυκνοτήτων ρεύματος
15. LV coil (A/mm²) Εισαγωγή τιμής της πυκνότητας ρεύματος του πηνίου χαμηλής τάσης
16. HV coil (A/mm²) Εισαγωγή τιμής της πυκνότητας ρεύματος του πηνίου υψηλής τάσης
17. ☒ CENELEC Υπολογισμός απωλειών βάσει CENELEC [A.1]. Το σύμβολο *i* εμφανίζει πληροφορίες για τις απώλειες.
18. Επιλογή κατηγορίας απωλειών CENELEC [A.1].
19. ☐ User Επιλογή υπολογισμού των απωλειών φορτίου και κενού φορτίου με βάση τιμή που δίνει ο χρήστης
20. Load loss (W) Εισαγωγή τιμής των εγγυημένων απωλειών φορτίου από το χρήστη
21. No-load loss (W) Εισαγωγή τιμής των εγγυημένων απωλειών κενού φορτίου από το χρήστη
22. Internal coil turns
Width of the core leg (mm)
Height of the core window (mm)
Magnetic induction (Gauss)
LV coil current density (A/mm²)
HV coil current density (A/mm²)
Σπείρες χαμηλής τάσης
Διάσταση *D* του πυρήνα (πλάτος πυρήνα)
Διάσταση *G* του πυρήνα (ύψος πυρήνα)
Μαγνητική επαγωγή
Πυκνότητα ρεύματος του πηνίου χαμηλής τάσης
Πυκνότητα ρεύματος του πηνίου υψηλής τάσης
23.

initial value	lower bound	upper bound
12	10	19
200	200	500
200	200	500
16000	14000	18000

 Για κάθε μια από τις τέσσερις (ή έξι) μεταβλητές σχεδίασης (παραμέτρους), η πρώτη στήλη εκφράζει την αρχική τιμή για κάθε παράμετρο, η δεύτερη και η τρίτη στήλη εκφράζει το κατώτατο και ανώτατο όριο του διαστήματος αντίστοιχα (δεδομένα για τη μέθοδο του μικτού ακέραιου προγραμματισμού).
24. ☒ Integer
☐ Integer
☐ Integer
☐ Integer Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει ποιες από τις τέσσερις παραμέτρους επιθυμεί να λαμβάνει ακέραιες ή συνεχείς τιμές ενεργοποιώντας ή όχι το αντίστοιχο κουτί.
25. Εισάγει κατάλληλες τιμές ανάλογα με την ισχύ.
26. Τερματίζει την προσομοίωση
27. Τερματισμός προγράμματος.
28. Εκτελεί την αλληλουχία εντολών για την εύρεση του βέλτιστου μετασχηματιστή

29.

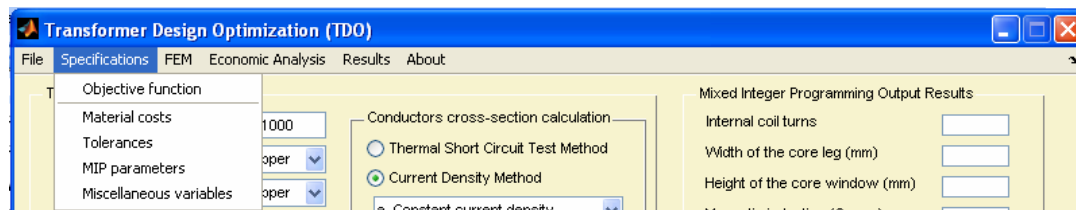
Internal coil turns	13
Width of the core leg (mm)	290
Height of the core window (mm)	290
Magnetic induction (Gauss)	17478
LV coil current density (A/mm ²)	
HV coil current density (A/mm ²)	
Transformer design cost (€)	6280
Transformer Uk based on FEM (%)	
Convergence history	Graph
Transformer performance	Graph
Active part design	Graph
Transformer design	Graph
Transformer efficiency	Graph
Transformer losses	Graph

Άμεσα απεικόνιση αποτελεσμάτων της βέλτιστης σχεδίασης, ανάλογα με τα δεδομένα εισόδου. Ο χρήστης μπορεί να αξιολογήσει τις τελικές τιμές των μεταβλητών σχεδίασης αλλά και να εκτιμήσει την ποιότητα της λύσης παρατηρώντας μια σειρά γραφημάτων που του προσφέρει το πρόγραμμα.

A.1.1 Εισαγωγή Δεδομένων Εισόδου του Μετασχηματιστή

Τα ελάχιστα δεδομένα εισόδου που πρέπει να ορίσει ο χρήστης πριν τη βελτιστοποίηση κάθε σχεδίασης μετασχηματιστή είναι οι εξής 14 παράμετροι: η ονομαστική ισχύς, το υλικό κατασκευής του πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης (υπάρχει η επιλογή του χαλκού και του αλουμινίου), η πολιτική τάση του πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης, το είδος συνδεσμολογίας του πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης (σε κάθε περίπτωση το πρόγραμμα δίνει την επιλογή αστέρα, τριγώνου και ζιγκ ζαγκ), η επιλογή τύπου αγωγού του πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης (σε κάθε περίπτωση το πρόγραμμα δίνει πέντε επιλογές: 1. απλό σύρμα κυκλικής διατομής, 2. διπλό σύρμα κυκλικής διατομής, 3. απλό σύρμα τετραγωνικής διατομής, 4. διπλό σύρμα τετραγωνικής διατομής και 5. ταινία), η τιμή της συχνότητας (υπάρχει η επιλογή των 50 Hz και 60 Hz), η επιλογή του μαγνητικού υλικού (οι επιλογές που υπάρχουν είναι M4 0.27, MOH 0.27 και εισαγωγή οποιωνδήποτε τιμών από τον χρήστη μέσω αρχείου κειμένου που αναγνωρίζεται από το λογισμικό *TDO*), η επιλογή της μεθόδου υπολογισμού της διατομής των αγωγών (είτε με βάση τη θερμική δοκιμή βραχυκύκλωσης, είτε με βάση την πυκνότητα ρεύματος), τις απώλειες φορτίου και κενού φορτίου (είτε βάσει CENELEC, είτε βάσει επιλογής του χρήστη).

Έχοντας ορίσει τα παραπάνω δεδομένα εισόδου, το λογισμικό υπολογίζει αυτόματα όλες εκείνες τις παραμέτρους που βρίσκονται στο μενού *Specifications* και στη συνέχεια στο μενού *Miscellaneous variables* (Σχήμα A.3 και Σχήμα A.4). Είναι σημαντικό να ειπωθεί ότι παρά το γεγονός ότι οι τιμές έχουν σε πρώτη φάση παραχθεί αυτόματα από το πρόγραμμα (Σχήμα A.4), ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επέμβει και να τροποποιήσει την τιμή οποιασδήποτε από αυτές τις μεταβλητές.



Σχήμα A.3 Μενού με τις προδιαγραφές (*Specifications*), οι οποίες αφορούν τα δεδομένα εισόδου που εισάγονται αυτόματα από το λογισμικό και που μπορούν επίσης να τροποποιηθούν από το χρήστη.

Variables with default values		Variables that hardly change		Various variables	
Internal coil taps lower limit (%)	0	BIL internal (kV)	10	Maximum ambient temperature (Celsius)	40
Internal coil taps upper limit (%)	0	BIL external (kV)	125	Maximum oil temperature (Celsius)	100
External coil taps lower limit (%)	5	LV to core distance (mm)	6	Maximum winding temperature (Celsius)	105
External coil taps upper limit (%)	5	HV to core distance (mm)	19	Number of LV ducts	9
		LV insulation type	2	Number of HV ducts	10
		HV insulation type	2	Distance between cores K (mm)	11
		HV taps insulation + magnification (mm)	0	DB distance (coil mould) (mm)	6
		HV taps insulation + magnification (mm)	1.4	Pitch of panels (mm)	45
		Insulation between LV and core (mm)	1.5	Additional impedance voltage %	0
		Insulation between HV and LV (mm)	6.9		
		External perimetric duct	Y	Internal gap paper thickness (mm)	0
		Insulation between HV (mm)	6.9	External gap paper thickness (mm)	0
		Insulation LV layers (mm)	0	Short circuit initial temperature (Celsius)	105
		Insulation HV layers (mm)	0	Short circuit final temperature (Celsius)	250
				Short circuit A factor	8.15
				Duration of the short circuit current (sec)	2
				System instantaneous power (VA)	2.5e+008
				Core space factor	0.965
				LV turns direction space factor	1
				HV turns direction space factor	0.98
				LV layer direction space factor	0.909091
				HV layer direction space factor	1
				LV conductor density (gr/cm3)	8.856
				HV conductor density (gr/cm3)	8.856
				Duct strips density (gr/cm3)	1.25
				Magnetic steel density (gr/cm3)	7.65
				Steel density (gr/cm3)	7.86
				Oil density (gr/cm3)	0.87
				LV conductor resistivity (Ohm*mm2/m)	0.020968
				HV conductor resistivity (Ohm*mm2/m)	0.020968
				Transformer tank steel thickness (mm)	4
				Frame steel thickness (mm)	4
				Tank cover steel thickness (mm)	4
				The width of the internal ducts (mm)	15
				Conservator tank exists	Y
				Core to coil each end in mm (mm)	3

Σχήμα Α.4 Δεδομένα για διάφορες μεταβλητές (*Miscellaneous variables*) που εισάγονται αυτόματα από το λογισμικό. Τα δεδομένα αυτά μπορούν επίσης να τροποποιηθούν από το χρήστη.

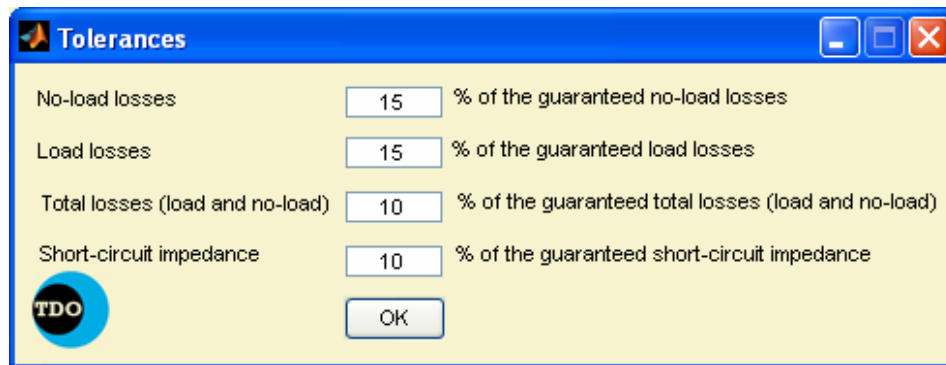
Επίσης, το λογισμικό *TDO* παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα να εισάγει τα κόστη των οκτώ υλικών από τη γραμμή μενού *Specifications* και κατόπιν *Material costs* (Σχήμα Α.3) συμπληρώνοντας το αντίστοιχο παράθυρο (Σχήμα Α.5), ή εναλλακτικά τροποποιώντας τις τιμές των υλικών που υπάρχουν στο αρχείο κειμένου με όνομα *TDO_material_costs.txt*.

Internal conductor cost (€/kg)	7
External conductor cost (€/kg)	7
Magnetic steel cost (€/kg)	3.2
Oil cost (€/kg)	1
Paper cost (€/kg)	4.5
Duct strips cost (€/kg)	5
Sheet cost (€/kg)	0.6
Radiator cost (€/kg)	0.7

Σχήμα Α.5 Κόστη υλικών.

Παράλληλα, ο χρήστης του προγράμματος μπορεί να τροποποιήσει το ποσοστό των επιτρεπόμενων ανοχών απόκλισης των χαρακτηριστικών απόδοσης του σχεδιαζόμενου μετασχηματιστή από τις αντίστοιχες εγγυημένες τιμές τους από το μενού *Specifications* επιλέγοντας *Tolerances* (Σχήμα Α.6). Οι ανοχές αυτές αφορούν τις απώλειες φορτίου, τις απώλειες κενού φορτίου, τις συνολικές απώλειες και την τάση βραχυκύκλωσης και μπορούν

να τροποποιηθούν χρησιμοποιώντας το παράθυρο που παρουσιάζεται στο Σχήμα Α.6, μεταβάλλοντας με τον τρόπο αυτό τους περιορισμούς της βελτιστοποίησης.

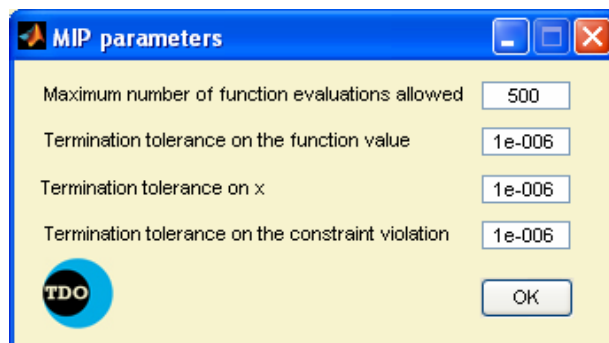


Σχήμα Α.6 Ανοχές απωλειών και τάσης βραχυκύκλωσης.

Α.1.2 Εισαγωγή Δεδομένων Εισόδου της Τεχνικής του Μικτού Ακέραιου Μη Γραμμικού Προγραμματισμού

Στη συγκεκριμένη ενότητα παρουσιάζονται τα δεδομένα εισόδου που αφορούν την τεχνική του μικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού. Ουσιαστικά πρόκειται για εκείνες τις μεταβλητές σχεδίασης για τις οποίες το πρόγραμμα *TDO* αναζητά τις βέλτιστες δυνατές τιμές, χωρίς να παραβιάζει τους περιορισμούς και τις ανοχές. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι σπείρες χαμηλής τάσης, η διάσταση D του πυρήνα (πλάτος πυρήνα) (σε mm), η διάσταση G του πυρήνα (ύψος πυρήνα) (σε mm), η μαγνητική επαγωγή (σε Gauss) και ανάλογα με την επιθυμία του χρήστη προστίθενται η πυκνότητα ρεύματος του πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης (σε A/mm²). Για κάθε μια από τις τέσσερις (ή έξι) μεταβλητές σχεδίασης-παραμέτρους (Σχήμα Α.2, μεταβλητές με κωδικό 23), η πρώτη στήλη εκφράζει την αρχική τιμή για κάθε παράμετρο ενώ η δεύτερη και η τρίτη στήλη εκφράζει το κατώτατο και ανώτατο όριο του διαστήματος, αντίστοιχα. Επιπλέον, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει ποιες από τις τέσσερις πρώτες παραμέτρους επιθυμεί να λαμβάνουν ακέραιες ή συνεχείς τιμές ενεργοποιώντας ή όχι το αντίστοιχο κουτί (Σχήμα Α.2, μεταβλητές με κωδικό 24). Η συγκεκριμένη λειτουργία του προγράμματος είναι ανούσια για τις μεταβλητές σχεδίασης που αφορούν την πυκνότητα ρεύματος του πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης, διότι οι συγκεκριμένες μεταβλητές λαμβάνουν τιμές με κατώτατο και ανώτατο όριο συνήθως ίσο με 2 και 4.5 αντίστοιχα. Σε αυτή την περίπτωση, αν επιλεγόταν από το χρήστη η πυκνότητα ρεύματος να λαμβάνει ακέραιες τιμές, τότε θα έπρεπε η βέλτιστη σχεδίαση του μετασχηματιστή να είχε τιμή πυκνότητας ρεύματος ίση με 2 ή 3 ή 4. Κάτι τέτοιο όμως, δεν έχει νόημα στη συντριπτική πλειοψηφία των εκτελέσεων του *TDO* διότι η πυκνότητα ρεύματος είναι μια παράμετρος που από τη φύση της (καθώς μεταβάλλεται σε επίπεδο μέχρι και δύο δεκαδικών ψηφίων) μπορεί με πολύ μικρές μεταβολές της να επιφέρει σημαντικότερες αλλαγές στη βέλτιστη σχεδίαση του μετασχηματιστή. Συνεπώς, η πυκνότητα ρεύματος δεν έχει νόημα να λαμβάνει ακέραιες τιμές αλλά αυστηρά συνεχείς τιμές.

Τέλος, ο χρήστης του προγράμματος *TDO* έχει την δυνατότητα να επέμβει σε εκείνες τις παραμέτρους που αφορούν αποκλειστικά το μικτό ακέραιο προγραμματισμό από το μενού *Specifications* επιλέγοντας *MIP Parameters* (Σχήμα Α.7) και να τροποποιήσει το μέγιστο αριθμό των επιτρεπόμενων επαναλήψεων υπολογισμού της αντικειμενικής συνάρτησης καθώς επίσης και τις συνθήκες τερματισμού.

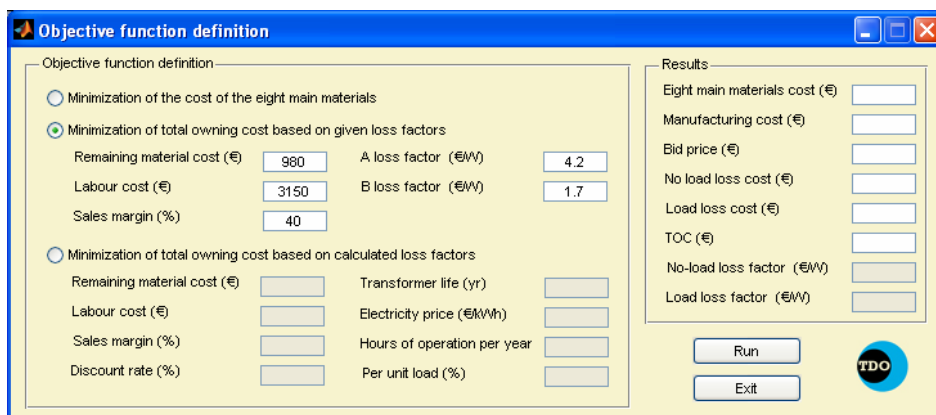


Σχήμα Α.7 Παράμετροι εισόδου που αφορούν τη μέθοδο βελτιστοποίησης.

Α.1.3 Επιλογή Αντικειμενικής Συνάρτησης

Το πρόγραμμα βέλτιστης σχεδίασης μετασχηματιστών διανομής προσφέρει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει την αντικειμενική συνάρτηση που επιθυμεί να ελαχιστοποιήσει, από το μενού *Specifications* επιλέγοντας *Objective function* (Σχήμα Α.3). Αναλυτικότερα, το λογισμικό *TDO* μπορεί να ελαχιστοποιήσει τις εξής τρεις αντικειμενικές συναρτήσεις: α. το κόστος των οκτώ κύριων υλικών, β. το συνολικό κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος με δεδομένους συντελεστές κόστους απωλειών (οριζόμενους από το χρήστη) γ. το συνολικό κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος με υπολογιζόμενους συντελεστές κόστους απωλειών. Σε κάθε μια από τις περιπτώσεις, ο χρήστης ορίζει τα κατάλληλα δεδομένα εισόδου χρησιμοποιώντας την ευέλικτη φόρμα του προγράμματος (Σχήμα Α.8). Για παράδειγμα, για να υπολογιστεί το συνολικό κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος για δεδομένους συντελεστές κόστους απωλειών, ο χρήστης ορίζει το κόστος των υπόλοιπων υλικών του μετασχηματιστή, το κόστος εργασίας, το περιθώριο κέρδους και τους συντελεστές κόστους απωλειών και κατόπιν, το πρόγραμμα ενεργοποιώντας και απενεργοποιώντας τα κατάλληλα κουτιά δεδομένων (Σχήμα Α.8) παρουσιάζει ένα σύνολο αποτελεσμάτων. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για την ελαχιστοποίηση του συνολικού κατασκευαστικού και λειτουργικού κόστους με υπολογιζόμενους συντελεστές κόστους απωλειών, αποτελώντας εξαιρετικά χρήσιμη τεχνική για τους βιομηχανικούς χρήστες. Τέλος, όλα τα συγκεκριμένα αποτελέσματα, αποθηκεύονται σε κάθε εκτέλεση αυτόματα από το πρόγραμμα στο αρχείο κειμένου με όνομα *output_objective_function.txt*.

Συμπερασματικά, η επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα του λογισμικού *TDO*, προσφέροντας στο χρήστη ευελιξία και πληθώρα αποτελεσμάτων.



Σχήμα Α.8 Επιλογή αντικειμενικής συνάρτησης.

A.2 ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΜΕ ΜΙΚΤΟ ΑΚΕΡΑΙΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ

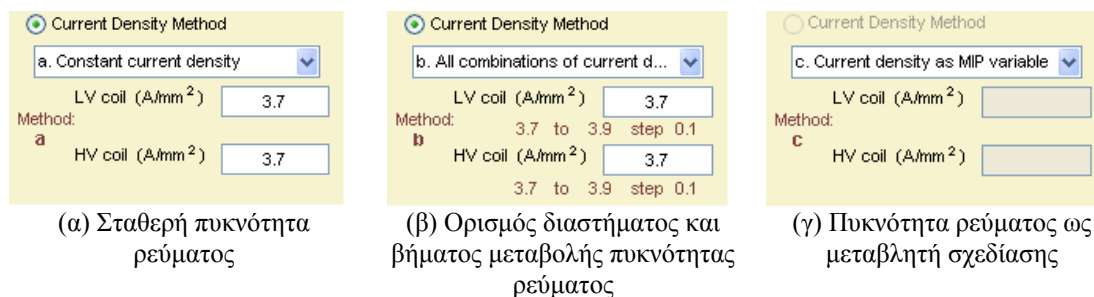
Έχοντας εισάγει τα δεδομένα εισόδου του μετασχηματιστή και της τεχνικής του μικτού ακέραιου προγραμματισμού, ο χρήστης πρέπει να επιλέξει τον τρόπο υπολογισμού της διατομής των πηνίων χαμηλής και υψηλής τάσης χρησιμοποιώντας είτε τη θερμική δοκιμή βραχυκύκλωσης είτε την τιμή της πυκνότητας ρεύματος. Μια από τις σημαντικότερες καινοτομίες του προγράμματος *TDO* είναι το γεγονός ότι παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα να βελτιστοποιήσει τη σχεδίαση του μετασχηματιστή χρησιμοποιώντας μια από τις τρεις πρωτοποριακές τεχνικές, οι οποίες έχουν βάση την πυκνότητα ρεύματος: 1) απευθείας εισαγωγή σταθερής πυκνότητας ρεύματος, 2) εισαγωγή διαστήματος και βήματος μεταβολής πυκνότητας ρεύματος, 3) προσδιορισμός της πυκνότητας ρεύματος από το πρόγραμμα, ως μεταβλητής σχεδίασης. Στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας των παραπάνω μεθόδων.

A.2.1 Υπολογισμός Διατομής Αγωγών με Κριτήριο τη Θερμική Δοκιμή Βραχυκύκλωσης

Υπολογίζεται η διατομή των πηνίων της χαμηλής και υψηλής τάσης κάνοντας χρήση της θερμικής δοκιμής βραχυκύκλωσης. Αναλυτικότερα, στο λογισμικό *TDO* έχουν ενσωματωθεί κατάλληλοι αλγόριθμοι υπολογισμού των διατομών των πηνίων, λαμβάνοντας υπόψη την συνδεσμολογία και την πολική τάση τους, χωρίς να είναι αναγκαία η περαιτέρω εισαγωγή δεδομένων, όπως η πυκνότητα ρεύματος.

A.2.2 Υπολογισμοί Διατομής Αγωγών με Κριτήριο την Πυκνότητα Ρεύματος

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται ο υπολογισμός της διατομής των πηνίων της χαμηλής και υψηλής τάσης κάνοντας χρήση της πυκνότητας ρεύματος. Πρόκειται για το κριτήριο που χρήζει ιδιαίτερης σημασίας, καθώς η κατάλληλη επιλογή του μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ποιότητα της βέλτιστης λύσης. Λαμβάνοντας υπόψη τη σημαντικότητα της μεθόδου, το πρόγραμμα *TDO* παρέχει στο χρήστη τρεις διαφορετικές και πρωτοποριακές τεχνικές. Οι τεχνικές αυτές εκμεταλλεύονται το βασικό κριτήριο της πυκνότητας ρεύματος, προσφέροντας στο χρήστη τη δυνατότητα να επιλέξει εκείνος ποια από τις τρεις του προσφέρει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Οι τρεις αυτές τεχνικές αναλύονται στις παρακάτω ενότητες.



Σχήμα Α.9 Οι τρεις διαφορετικές τεχνικές υπολογισμού των διατομών των πηνίων της χαμηλής και υψηλής τάσης κάνοντας χρήση της πυκνότητας ρεύματος.

A.2.2.1 Σταθερή Πυκνότητα Ρεύματος

Υπολογίζεται η διατομή των πηνίων της χαμηλής και υψηλής τάσης κάνοντας χρήση μιας σταθερής τιμής της πυκνότητας ρεύματος για κάθε ένα από τα δύο επίπεδα τάσης (Σχήμα Α.9, μέθοδος α). Πρόκειται για την τεχνική εκείνη η οποία απαιτεί από το χρήστη εμπειρία και γνώση. Μια άστοχη τιμή πυκνότητας ρεύματος μπορεί να οδηγήσει σε μη επιθυμητά αποτελέσματα.

A.2.2.2 Ορισμός Διαστήματος και Βήματος Μεταβολής Πυκνότητας Ρεύματος Λαμβάνοντας Υπόψη Όλους τους Πιθανούς Συνδυασμούς

Υπολογίζεται η διατομή των πηνίων χαμηλής και υψηλής τάσης κάνοντας χρήση ενός διαστήματος τιμών με διακριτές τιμές πυκνότητας ρεύματος για κάθε ένα από τα δύο επίπεδα τάσης. Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί ένα από τα δυνατότερα σημεία του προγράμματος *TDO*, παρέχοντας στο χρήστη τη δυνατότητα να εντοπίσει την ολικά βέλτιστη λύση. Τα βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν είναι να οριστεί μια αρχική τιμή, το βήμα και το συνολικό πλήθος των τιμών της πυκνότητας ρεύματος. Για παράδειγμα, στο Σχήμα Α.9 (μέθοδος β) έχουν οριστεί τα διαστήματα [3.7 3.9] με βήμα 0.1 (συνολικό πλήθος τριών τιμών), δηλαδή έχουν κατασκευαστεί δυο πίνακες (ένας για το πηνίο χαμηλής τάσης και ένας για το πηνίο υψηλής τάσης) με τιμές [3.7 3.8 3.9]. Όταν ξεκινάει η βελτιστοποίηση, το λογισμικό εκτελεί τόσες βέλτιστες σχεδιάσεις, όσοι και οι πιθανοί συνδυασμοί των δυο δημιουργημένων πινάκων. Για το παραπάνω παράδειγμα, υπάρχουν συνολικά εννέα συνδυασμοί πυκνοτήτων ρεύματος (καταγράφοντας τον αριθμό των αποτυχημένων και επιτυχημένων σχεδιάσεων). Επομένως, το λογισμικό *TDO* θα παράγει εννέα βέλτιστες σχεδιάσεις και θα επιλέξει την καλύτερη.

Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνικής είναι το γεγονός ότι μπορεί όχι μόνο ένας έμπειρος αλλά και ένας άπειρος μηχανικός σχεδίασης μετασχηματιστών να εντοπίσει τη βέλτιστη σχεδίαση, καθορίζοντας απλά το διάστημα που επιθυμεί να βρίσκεται η τιμή της πυκνότητας ρεύματος. Παράλληλα, η συγκεκριμένη καινοτομική τεχνική βοηθάει στον εντοπισμό της βέλτιστης λύσης, ξεπερνώντας το βασικό μειονέκτημα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης που δεν είναι άλλο από το εγκλωβισμό σε τοπικά βέλτιστα. Το τίμημα στη συγκεκριμένη τεχνική είναι ότι όσο περισσότερες τιμές πυκνοτήτων ρεύματος είναι διαθέσιμες, τόσο πιο χρονοβόρος είναι ο αλγόριθμος εντοπισμού της βέλτιστης σχεδίασης.

A.2.2.3 Υπολογισμός Πυκνότητας Ρεύματος ως Μεταβλητής Σχεδίασης στον Αλγόριθμο Βελτιστοποίησης

Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζεται η τρίτη και τελευταία τεχνική υπολογισμού της διατομής των πηνίων της χαμηλής και υψηλής τάσης κάνοντας χρήση της πυκνότητας ρεύματος. Η κύρια διαφορά της παρούσας μεθόδου με τις προηγούμενες δυο, είναι ότι ο χρήστης θέτει την εύρεση των τιμών των πυκνοτήτων ρεύματος ως υπόθεση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης και συγκεκριμένα του μικτού ακέραίου προγραμματισμού. Σε αυτήν την περίπτωση, οι μεταβλητές σχεδίασης αυξάνονται και από τέσσερις γίνονται έξι (Σχήμα Α.10).

Το μειονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνικής είναι ότι ο χώρος των υποψήφιων λύσεων αυξάνεται αισθητά σε σχέση με τις τέσσερις μεταβλητές σχεδίασης, έχοντας ως αποτέλεσμα είτε τη δυσκολία σύγκλισης του αλγορίθμου είτε τον εγκλωβισμό του αλγορίθμου σε τοπικά βέλτιστα. Παρόλα αυτά, η σωστή επιλογή των αρχικών τιμών, μπορεί να οδηγήσει και σε αυτήν την περίπτωση σε εξαιρετικά αποτελέσματα.

	initial value	lower bound	upper bound	
Internal coil turns	12	10	19	☒ Integer
Width of the core leg (mm)	200	200	500	☐ Integer
Height of the core window (mm)	200	200	500	☐ Integer
Magnetic induction (Gauss)	16000	14000	18000	☐ Integer
LV coil current density (A/mm ²)	3.7	3.7	4.2	
HV coil current density (A/mm ²)	3.5	3.5	4	

Default values

Σχήμα Α.10 Η πυκνότητα ρεύματος για τον υπολογισμό της διατομής των πηνίων της χαμηλής και υψηλής τάσης ως παράμετρος σχεδίασης στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

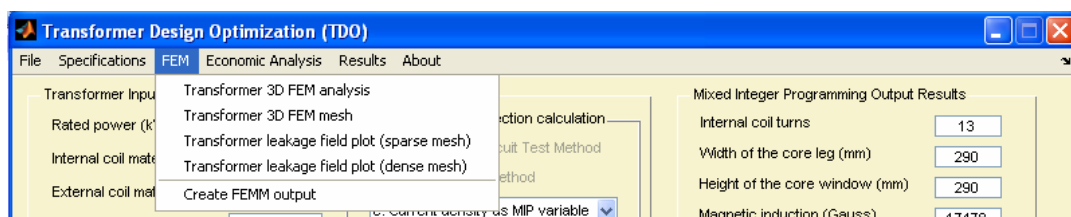
A.3 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Καθώς η ανάπτυξη των εφαρμογών σήμερα έχει οδηγήσει στην εύκολη διασύνδεση τεχνολογιών, το λογισμικό *TDO* παρέχει διασυνδέσεις σε εξειδικευμένα εργαλεία ανάλυσης

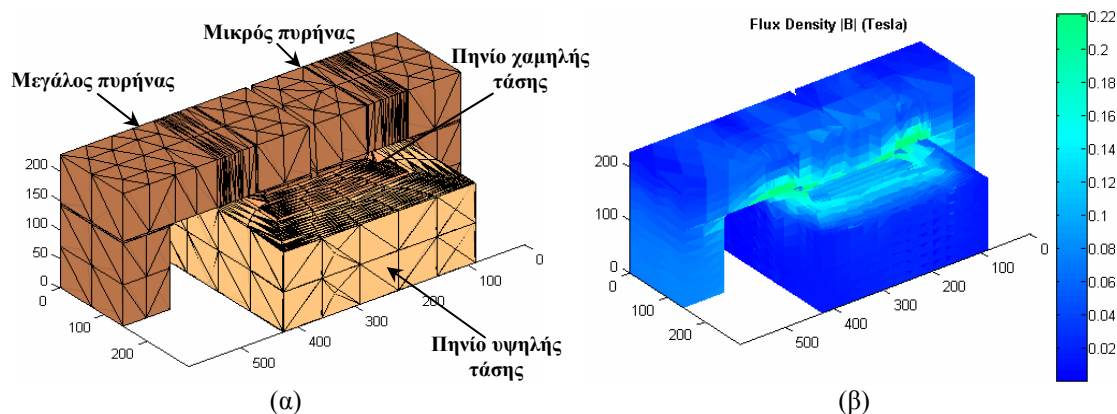
και επεξεργασίας. Μέσα λοιπόν σε ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον αυτής της μορφής, όπου η συμβατότητα μεταξύ των εργαλείων διαχείρισης και ανάλυσης με διάφορα πακέτα εφαρμογών είναι εφικτή, ο χρήστης του *TDO* μπορεί να διεκπεραιώσει και πιο εξειδικευμένες επεξεργασίες και αναλύσεις.

Το μενού *FEM* δίνει τη δυνατότητα ανάλυσης της βέλτιστης λύσης που παράγεται από το πρόγραμμα *TDO* με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Τα εργαλεία ανάλυσης μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες: την ενσωματωμένη μαγνητοστατική ανάλυση με τη χρήση τρισδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων [A.2] και την παραγωγή κατάλληλων αρχείων εξόδου τα οποία κατασκευάζουν τη γεωμετρία διδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για μαγνητοστατική και θερμική ανάλυση, με ανεξάρτητη χρήση του λογισμικού Finite Element Method Magnetics, FEMM [A.3].

Το ενσωματωμένο τρισδιάστατο μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων κατασκευάζεται αυτόματα, χρησιμοποιώντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της βέλτιστης λύσης και λύνει το μαγνητοστατικό πρόβλημα της λειτουργίας του μετασχηματιστή σε συνθήκες δοκιμής βραχυκύκλωσης, λαμβάνοντας ως δεδομένα τα βασικά ηλεκτρικά του χαρακτηριστικά. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζει το πεδίο σκέδασης και την τάση βραχυκύκλωσης, τα οποία αποτελούν τα δύο βασικά αποτελέσματα της ανάλυσης. Προκειμένου να ξεπεραστούν οι δυσκολίες που οφείλονται στην πολυπλοκότητα του πλέγματος και της επακόλουθης αύξησης του χρόνου επίλυσης της τρισδιάστατης μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, κατά την ανάπτυξη του μοντέλου του μετασχηματιστή δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στη λεπτομερή αναπαράσταση της γεωμετρίας του, με έμφαση στην περιοχή των πηνίων, η οποία επηρεάζει στο μεγαλύτερο ποσοστό το πεδίο σκέδασης και την τάση βραχυκύκλωσης. Συνεπώς, το μοντέλο είναι σε θέση να παράγει ακριβή αποτελέσματα με τη χρήση μικρής πυκνότητας πλέγματος, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα ενσωμάτωσής του χωρίς σημαντική υπολογιστική επιβάρυνση. Επιπλέον έχει αυτοματοποιηθεί ώστε να μην απαιτείται καμία παρέμβαση από το χρήστη για τον προσδιορισμό περίπλοκων λεπτομερειών που αφορούν τόσο στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλέγματος (και τις υπόλοιπες λειτουργίες προεπεξεργασίας όπως είναι ο ορισμός των υλικών και των οριακών συνθηκών) όσο και στις παραμέτρους επίλυσης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Τα βήματα κατασκευής του μοντέλου, πλεγματοποίησης και επίλυσης του μαγνητοστατικού προβλήματος πραγματοποιούνται από την πρώτη γραμμή του μενού *Transformer 3D FEM analysis*, μετά την εκτέλεση του οποίου εμφανίζεται η τιμή της υπολογισμένης τάσης βραχυκύκλωσης στο αντίστοιχο πεδίο της κεντρικής φόρμας (Σχήμα A.2, πεδίο *Transformer Uk based on FEM* του τμήματος 29). Στη συνέχεια, δίνεται στο χρήστη η δυνατότητα απεικόνισης του τρισδιάστατου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, μέσω της επιλογής *Transformer 3D FEM mesh*, η οποία αντιστοιχεί στο Σχήμα A.12 α. Το σχήμα αυτό απεικονίζει το πλέγμα του ενεργού μέρους του μετασχηματιστή, ενώ περιορίζεται στο ένα όγδοο της πραγματικής γεωμετρίας, αξιοποιώντας τη συμμετρία της για τη μείωση της πυκνότητας του πλέγματος και του συνολικού χρόνου που απαιτεί η ανάλυση. Επιπλέον, δίνεται και η δυνατότητα οπτικοποίησης της κατανομής του πεδίου σκέδασης του μετασχηματιστή με τη μορφή χρωματικού διαγράμματος (μέσω κατάλληλων λειτουργιών μετεπεξεργασίας που υλοποιούνται από τον κώδικα των πεπερασμένων στοιχείων), η οποία αντιστοιχεί στο Σχήμα A.12 β. Παρέχεται η δυνατότητα απεικόνισης τόσο με αραιό πλέγμα, της τάξης των 3000 κόμβων, μέσω της επιλογής *Transformer leakage field plot (sparse mesh)* ή με πυκνότερο πλέγμα, της τάξης των 10000 κόμβων, μέσω της επιλογής *Transformer leakage field plot (dense mesh)*. Η ύπαρξη των δύο αυτών επιλογών δίνει την ευελιξία της άμεσης απεικόνισης που παρέχει το αραιό πλέγμα ή της λεπτομερέστερης απεικόνισης που δίνει το πυκνότερο πλέγμα, απαιτώντας λίγο περισσότερο χρόνο εκτέλεσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι λειτουργίες απεικόνισης τόσο του πλέγματος, όσο και της κατανομής του πεδίου προϋποθέτουν ότι έχει ολοκληρωθεί προηγουμένως η ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων, για αυτό και σε περίπτωση που ο χρήστης επιλέξει τις αντίστοιχες γραμμές του μενού πριν την επιλογή *Transformer 3D FEM analysis*, εμφανίζεται μήνυμα προειδοποίησης από το πρόγραμμα που τον παραπέμπει στην εκτέλεσή της.

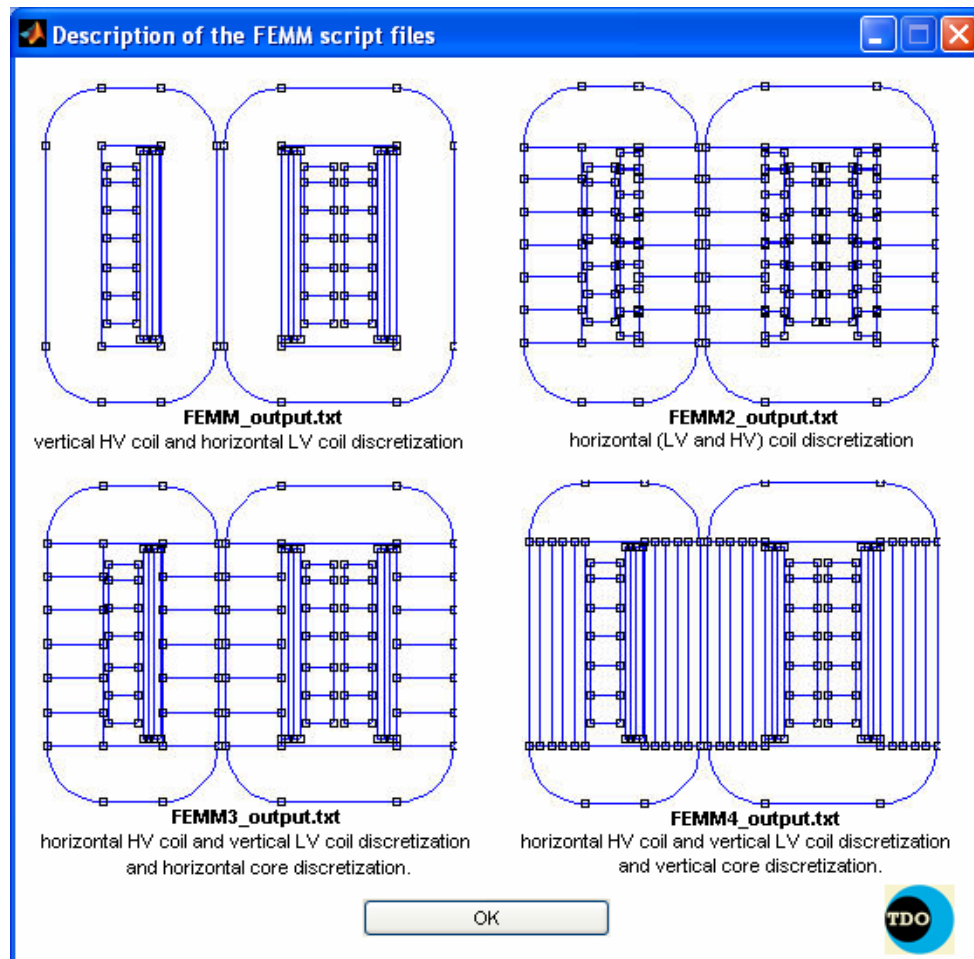


Σχήμα Α.11 Εργαλεία ανάλυσης τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα Α.12 Απεικόνιση πλέγματος και αποτελεσμάτων ανάλυσης τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων (α) πλέγμα (β) κατανομή πεδίου σκέδασης.

Η επιλογή *Create FEMM output* αντιστοιχεί στη δημιουργία τεσσάρων *txt* αρχείων εξόδου, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αρχεία εισόδου από το πρόγραμμα FEMM. Ειδικότερα, τα αρχεία αυτά είναι γραμμένα σε γλώσσα προγραμματισμού (Lua scripting language) η οποία υποστηρίζεται από το FEMM και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως *script* ή αυτόνομες εντολές στο παράθυρο εισόδου του προγράμματος FEMM για την αυτόματη σχεδίαση της γεωμετρίας του διδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων του μετασχηματιστή. Στο Σχήμα Α.13 απεικονίζεται η γεωμετρία που αντιστοιχεί σε κάθε αρχείο. Τα χαρακτηριστικά της αντιστοιχούν στη βέλτιστη λύση που παράγεται από το *TDO*, με διαφορετική διακριτοποίηση στον πυρήνα και στα πηνία, η οποία εξυπηρετεί τις ανάγκες καλύτερης ανάλυσης του πεδίου στις περιοχές αυτές, μέσω κατάλληλου ορισμού των υλικών και των οριακών συνθηκών σε αυτές κατά την ανεξάρτητη εκτέλεση του λογισμικού FEMM. Η διδιάστατη γεωμετρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για μαγνητοστατική όσο και για θερμική ανάλυση, ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη. Επισημαίνεται ότι κατά την κατασκευή του διδιάστατου μοντέλου δεν αξιοποιήθηκε πλήρως η συμμετρία της γεωμετρίας (απεικονίζεται το μισό αντί του ενός τετάρτου της τομής του ενεργού μέρους που χρησιμοποιείται στο τρισδιάστατο μοντέλο στο Σχήμα Α.12) για να δίνεται η δυνατότητα χρήσης της σε θερμική ανάλυση, κατά την οποία πρέπει να μοντελοποιηθεί όλο το ύψος του ενεργού μέρους.



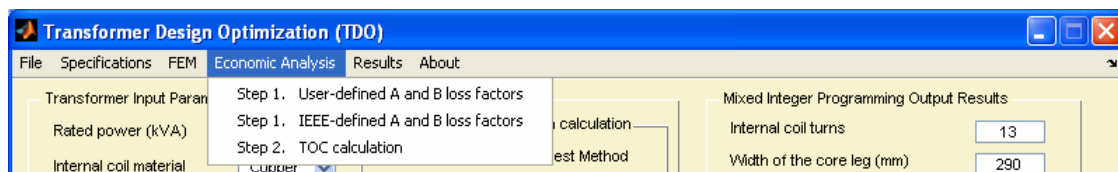
Σχήμα Α.13 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και διακριτοποίηση διδιάστατου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων το οποίο μπορεί να κατασκευαστεί με το λογισμικό FEMM [Α.3] με τη χρήση των αντίστοιχων αρχείων που παράγονται από το πρόγραμμα TDO.

Α.4 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ

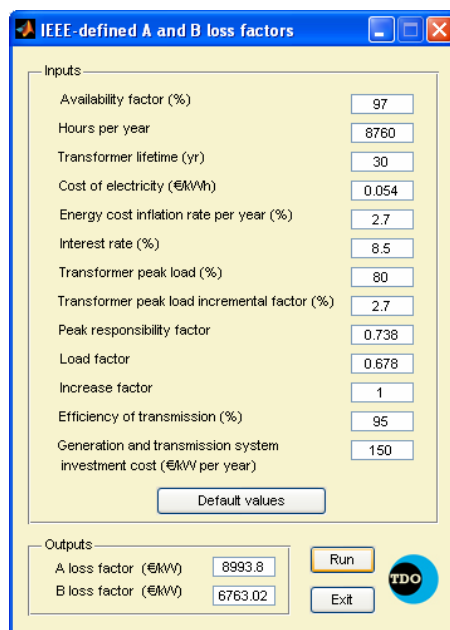
Μια από τις δημοφιλέστερες μεθοδολογίες αξιολόγησης των μετασχηματιστών είναι η μέθοδος του συνολικού κόστους κατοχής (*Total Owning Cost - TOC*). Η συγκεκριμένη τεχνική εφοδιάζει όχι μόνο το σχεδιαστή αλλά και τον υποψήφιο αγοραστή μετασχηματιστών με ένα εργαλείο ικανό να συγκρίνει μια σειρά από διαφορετικές σχεδιάσεις μετασχηματιστών. Ο μετασχηματιστής που ικανοποιεί τις τεχνικές προδιαγραφές που έχουν τεθεί και έχει παράλληλα το μικρότερο συνολικό κόστος κατοχής αποτελεί την επικρατέστερη (οικονομικά) λύση. Όμως, για τον επιτυχή προσδιορισμό του συγκεκριμένου κόστους απαιτείται ο σωστός προσδιορισμός των συντελεστών κόστους απωλειών A και B , ο οποίος περιλαμβάνει πολλούς οικονομικούς και τεχνικούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα επιτόκιο, κόστος ενέργειας, κόστος παραγωγικής ικανότητας, ρυθμό ανάπτυξης της αιχμής του φορτίου, αποδοτική φόρτιση κτλ. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η τιμή των συντελεστών A και B διαφέρει ανάλογα με το χρήστη του μετασχηματιστή (για παράδειγμα ηλεκτρική εταιρεία ή βιομηχανικός χρήστης).

Το λογισμικό TDO παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να υπολογίσει το συνολικό κόστος κατοχής της βέλτιστης λύσης, είτε λαμβάνοντας υπόψη ως δεδομένους τους συντελεστές κόστους απωλειών είτε υπολογίζοντάς τους βάσει του προτύπου του Ινστιτούτου των ηλεκτρολόγων και ηλεκτρονικών μηχανικών (IEEE) [Α.4]. Ο καθορισμός των συντελεστών απωλειών αποτελεί το πρώτο βήμα στο πρόγραμμα TDO, ακολουθώντας στη γραμμή μενού *Economic Analysis* και στη συνέχεια, είτε *User-defined A and B loss factors* (Σχήμα Α.14) για

να εισάγει ο χρήστης τις τιμές που επιθυμεί, είτε *IEEE-defined A and B loss factors* (Σχήμα Α.14) για να υπολογίσει τους συντελεστές *A* και *B* μέσω του προτύπου IEEE (Σχήμα Α.15).



Σχήμα Α.14 Εργαλείο οικονομικής αξιολόγησης μετασχηματιστών.



Σχήμα Α.15 Υπολογισμός συντελεστών *A* και *B* μέσω προτύπου IEEE.

Έχοντας ολοκληρώσει το πρώτο βήμα, το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να υπολογίσει το συνολικό κόστος κατοχής έως πέντε μετασχηματιστών. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο χρήστης δε χρειάζεται να εισάγει τα αποτελέσματα της βέλτιστης σχεδίασης, εάν αυτή υπάρχει (προερχόμενη από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης), διότι το πρόγραμμα *TDO* αυτόματα την εισάγει στο παράθυρο υπολογισμού του συνολικού κόστους κατοχής (Σχήμα Α.16). Με άλλα λόγια, η οικονομική αξιολόγηση ενός ή περισσότερων μετασχηματιστών μπορεί να υλοποιηθεί από το λογισμικό είτε ως αυτόνομο εργαλείο είτε λαμβάνοντας υπόψη τη βέλτιστη σχεδίαση. Στο Σχήμα Α.16 υπάρχουν τρεις μετασχηματιστές, οι οποίοι αξιολογούνται με βάση του συντελεστές κόστους απωλειών που έχουν προκύψει από το πρότυπο του IEEE και ταξινομούνται λαμβάνοντας υπόψη το συνολικό κόστος κατοχής. Ένα ακόμα πλεονέκτημα που προσφέρει το πρόγραμμα είναι το γεγονός ότι αν ο χρήστης επιθυμεί να τροποποιήσει τους συντελεστές απωλειών, μπορεί να το πραγματοποιήσει από την υπάρχουσα φόρμα και να επαναξιολογήσει τους υπό εξέταση μετασχηματιστές.

	Transformer 1	Transformer 2	Transformer 3	Transformer 4	Transformer 5
No load losses cost (€)	11377.2	11000	12333		
Load losses cost (€)	96339.2	95543	89878		
Bid price (€)	6148	5000	5540		
TOC (€)	113864	750091	724307		
TOC classification	1	3	2		

Σχήμα Α.16 Οικονομική αξιολόγηση μετασχηματιστών.

Σκοπός αυτής της μεθόδου οικονομικής αξιολόγησης είναι ο συνυπολογισμός της αξίας της ηλεκτρικής ενέργειας που δαπανάται για την τροφοδότηση των απωλειών ενός μετασχηματιστή. Οι χρήστες (αγοραστές) των μετασχηματιστών μπορούν να χρησιμοποιήσουν την προτεινόμενη μέθοδο για να προσδιορίσουν το σχετικό οικονομικό όφελος από την αγορά ενός μετασχηματιστή με χαμηλό κόστος κτήσης και υψηλό κόστος απωλειών, σε αντιπαράθεση με έναν άλλο μετασχηματιστή ο οποίος έχει υψηλό κόστος κτήσης και χαμηλό κόστος απωλειών. Οι κατασκευαστές μετασχηματιστών μπορούν να τη χρησιμοποιήσουν για τη βελτιστοποίηση της σχεδιάσής τους, ώστε να προκύψει ένας μετασχηματιστής που συμφέρει οικονομικά από άποψη κατασκευαστικού αλλά και λειτουργικού κόστους. Επίσης, το κόστος που προκύπτει από την αξιολόγηση, παρέχει τη δυνατότητα στον αγοραστή του μετασχηματιστή (ηλεκτρική εταιρία μεταφοράς ή διανομής) να συγκρίνει δύο ή περισσότερες προσφορές και να καταλήξει στην πιο οικονομική.

Α.5 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Τα εργαλεία διαχείρισης δεδομένων εισόδου και αποτελεσμάτων του *TDO* δίνουν τη δυνατότητα στο χρήστη να διαχειριστεί δεδομένα εύκολα, γρήγορα και αποτελεσματικά. Ακολουθώντας στη γραμμή μενού *File* και *Save workspace as...* ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αποθηκεύσει τα δεδομένα εισόδου που εκείνος έχει εισάγει στο κεντρικό παράθυρο του προγράμματος σε ένα αρχείο κειμένου, το οποίο εκείνος επιλέγει πως θα ονομαστεί. Το συγκεκριμένο αρχείο αποθηκεύει μόνο τα δεδομένα εισόδου που αναγράφονται στη κύρια φόρμα του λογισμικού ενώ τα δεδομένα των υπολοίπων παραθύρων αντιστοιχούν στις προδιαγεγραμμένες τιμές που προκύπτουν ανάλογα με την ονομαστική ισχύ του μετασχηματιστή. Το μεγάλο πλεονέκτημα του λογισμικού είναι ότι ο χρήστης μπορεί να αποθηκεύσει τα δεδομένα της κύριας φόρμας είτε σε ένα αρχείο κειμένου (για παράδειγμα *transformer.txt*) είτε σε συγκεκριμένο αρχείο κειμένου της μορφής **.tdo* (για παράδειγμα *transformer.tdo*). Κατόπιν, το συγκεκριμένο αρχείο (*transformer.tdo*) μπορεί να εισαχθεί και να αναγνωριστεί μόνο από το λογισμικό *TDO*.

Σχήμα Α.17 Εργαλεία διαχείρισης δεδομένων εισόδου και αποτελεσμάτων.

Επίσης, το πρόγραμμα μπορεί να αποθηκεύσει τα αποτελέσματα της γραφικής απεικόνισης της απόδοσης ή απωλειών του βέλτιστου μετασχηματιστή συναρτήσει του

φορτίου, ακολουθώντας στη γραμμή μενού *File* και *Save transformer efficiency as...* ή *Save transformer losses as...* αντίστοιχα. Ακόμη, στο *TDO* έχει εισαχθεί και η εντολή *clear form*, μέσα από την οποία ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επανεισάγει δεδομένα εισόδου σε ένα κενό από τιμές κεντρικό παράθυρο.

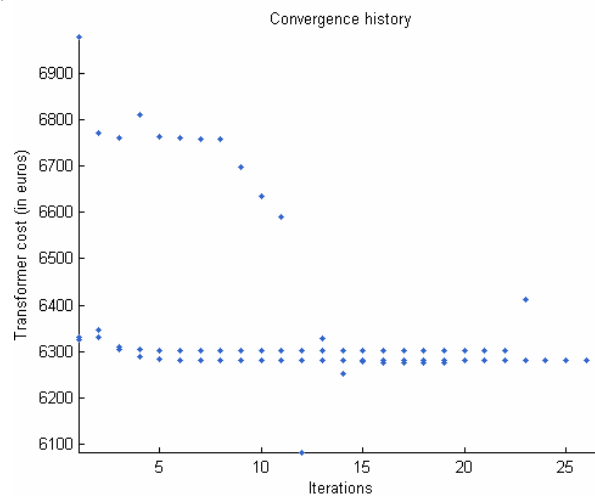
Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι μετά την ολοκλήρωση της βελτιστοποίησης, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ελέγξει αναλυτικότερα τα αποτελέσματα, ανοίγοντας τα αρχεία κειμένου με όνομα *output_prn.txt*, το *output_vprn.txt* και το *MIP.txt*, τα οποία έχουν δημιουργηθεί από το λογισμικό *TDO* μετά το πέρας κάθε προσομοίωσης. Τα δύο πρώτα αφορούν τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά της βέλτιστης σχεδίασης του μετασχηματιστή και το τρίτο αφορά τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Πρέπει να επισημανθεί ότι δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στη συμβατότητα των αρχείων εξόδου του λογισμικού *TDO* με τα αρχεία εισόδου το υφιστάμενου λογισμικού σχεδίασης που χρησιμοποιείται από τη βιομηχανική μονάδα σχεδίασης μετασχηματιστών [Α.5].

Α.6 ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Από το μενού του προγράμματος, υπάρχει η επιλογή *Open* (Σχήμα Α.17), η οποία επιτρέπει στον χρήστη να εισάγει μια ποικιλία από έτοιμες σχεδιάσεις μετασχηματιστών, οι οποίες περιέχονται σε βάση δεδομένων, συνδεδεμένη με το πρόγραμμα (δηλαδή με εισαγωγή που πραγματοποιείται από τη βάση σε περιοχές της μνήμης και στη συνέχεια εσωτερική καταχώρησή τους σε πολυδιάστατους πίνακες). Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων περιέχει περίπου 200 σχεδιάσεις μετασχηματιστών, οι οποίες δημιουργήθηκαν και ενσωματώθηκαν από το λογισμικό *TDO*. Συγκεκριμένα, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να εισάγει μια συγκεκριμένη σχεδίαση μετασχηματιστή από την επιλογή *Open*, διαμορφώνοντας κατάλληλα το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος *TDO*, ανάλογα με τα προ-επιλεγμένα χαρακτηριστικά του αλγορίθμου βελτιστοποίησης για τον εκάστοτε μετασχηματιστή.

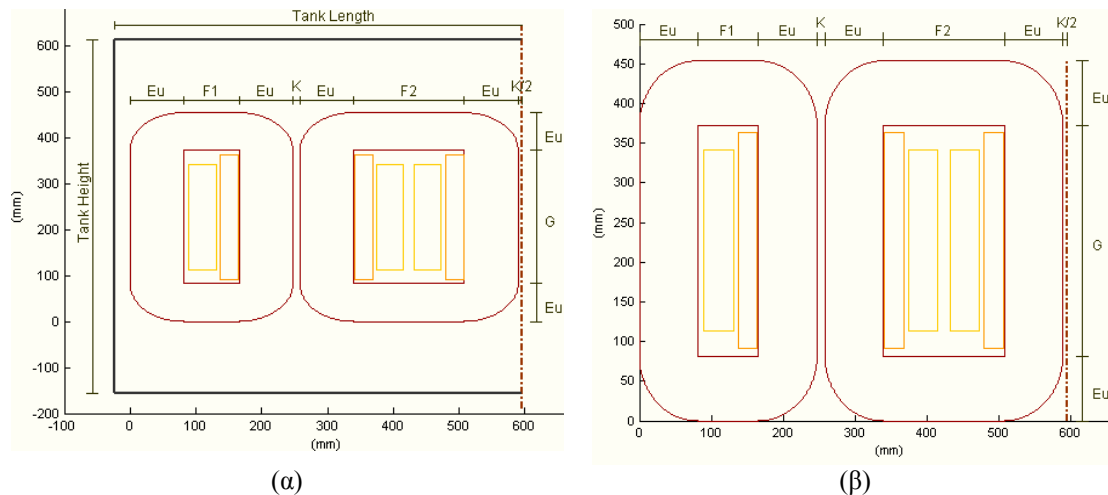
Α.7 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΓΡΑΦΙΚΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η χρησιμοποίηση των εργαλείων γραφικής απεικόνισης των αποτελεσμάτων αποτελεί την πρώτη προσέγγιση του χρήστη για να εκτιμήσει την ποιότητα της λύσης. Όπως περιγράφηκε παραπάνω, πέρα από την οπτικοποίηση της ανάλυσης του μετασχηματιστή με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων και των αντίστοιχων σχημάτων, ο χρήστης έχει επιπλέον τη δυνατότητα να επιβλέπει την πορεία σύγκλισης σε πραγματικό χρόνο (Σχήμα Α.18) και αν επιθυμεί μπορεί να τερματίσει πρόωρα την προσομοίωση.



Σχήμα Α.18 Απεικόνιση σύγκλισης αλγορίθμου σε πραγματικό χρόνο από το λογισμικό *TDO*.

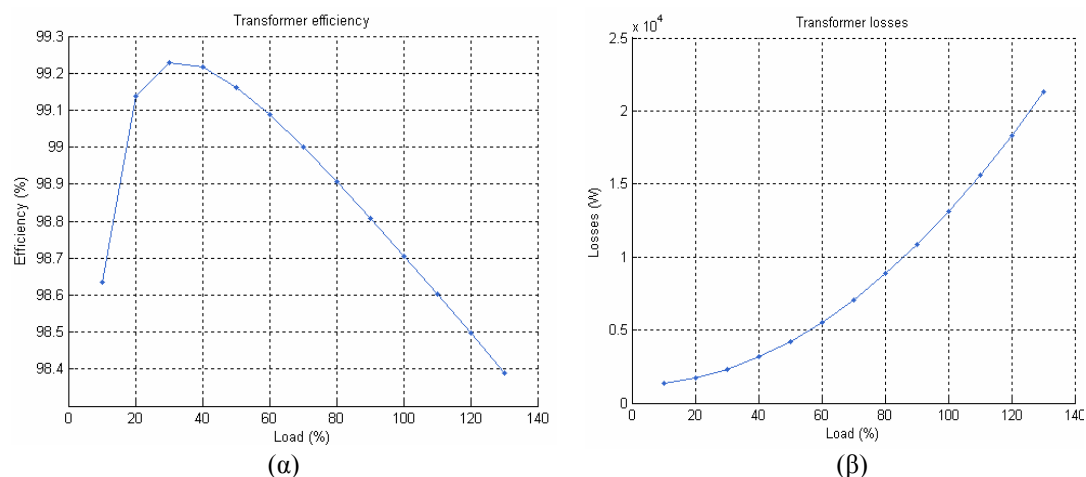
Επίσης, το λογισμικό *TDO* προσφέρει στο χρήστη τη δημιουργία μηχανολογικής σχεδίασης του ενεργού μέρους της βέλτιστης σχεδίασης του μετασχηματιστή συμπεριλαμβάνοντας το δοχείο του (Σχήμα Α.19 α.) αλλά και χωρίς αυτό (Σχήμα Α.19 β.). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι άξονες και κατά επέκταση οι διαστάσεις είναι οι πραγματικές και εκείνες που αποτελούν τη βέλτιστη σχεδίαση, αποτελώντας μια απεικόνιση χρήσιμη για κάθε μηχανικό σχεδίασης μετασχηματιστών.



Σχήμα Α.19 Σχεδίαση του μετασχηματιστή και του ενεργού μέρους από το λογισμικό *TDO*.

Α.8 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ

Το λογισμικό *TDO* έχει τη δυνατότητα ανάλυσης των λειτουργικών χαρακτηριστικών του βέλτιστου μετασχηματιστή. Αναλυτικότερα, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να μελετήσει τη συμπεριφορά της βέλτιστης σχεδίασης εξετάζοντας είτε τη μεταβολή της απόδοσης συναρτήσει του φορτίου (Σχήμα Α.20 α.) είτε τη μεταβολή των απωλειών συναρτήσει του φορτίου (Σχήμα Α.20 β.).



Σχήμα Α.20 Η γραφική απεικόνιση της μεταβολής της (α) απόδοσης του μετασχηματιστή συναρτήσει του φορτίου και (β) απωλειών του μετασχηματιστή συναρτήσει του φορτίου από το λογισμικό *TDO*.

Επίσης, ένα από τα σημαντικότερα γραφήματα που παράγει το λογισμικό *TDO* είναι η απεικόνιση των απωλειών και της τάσης βραχυκύκλωσης στην ονομαστική λειτουργία του μετασχηματιστή (Σχήμα Α.21). Αναλυτικότερα, ο χρήστης μπορεί να εξετάσει τις σχεδιασμένες απώλειες φορτίου, κενού φορτίου και το άθροισμά τους σε σχέση με τις

εγγυημένες και τις μέγιστες απώλειες φορτίου, κενού φορτίου και το αντίστοιχο άθροισμά τους για τη βέλτιστη σχεδίαση, υπό μορφή ραβδογράμματος. Ταυτόχρονα, απεικονίζεται και η σχεδιασμένη τάση βραχυκύκλωσης σε σχέση με την εγγυημένη, τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή της.



Σχήμα Α.21 Γραφική απεικόνιση απωλειών και τάσης βραχυκύκλωσης σε ονομαστική λειτουργία του μετασχηματιστή από το λογισμικό *TDO*.

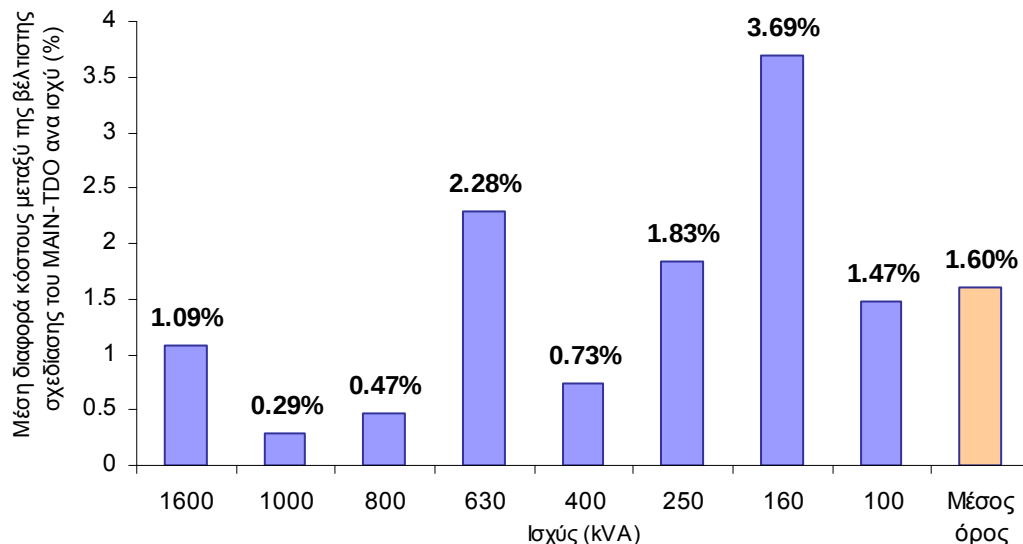
Α.9 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το πρόγραμμα βέλτιστης σχεδίασης μετασχηματιστών διανομής συγκρίθηκε με το υπάρχον λογισμικό που χρησιμοποιείται από τη βιομηχανία [Α.5], αποδεικνύοντας την υπεροχή του στις περίπου 200 εξεταζόμενες περιπτώσεις. Για την ορθή και αντικειμενική εξαγωγή αποτελεσμάτων των δύο λογισμικών, έπρεπε να πραγματοποιηθεί σύγκριση των βέλτιστων σχεδιάσεων ανάμεσα στα δύο λογισμικά έχοντας ως κοινό σημείο αναφοράς τα παρακάτω δεδομένα εισόδου:

- Εγγυημένες απώλειες φορτίου και κενού φορτίου καθώς επίσης και τα αντίστοιχα ποσοστά τους
- Τιμές των οκτώ κύριων υλικών
- Υλικό πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης
- Τιμή τάσης πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης
- Συνδεσμολογία πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης
- Τύπος αγωγού πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης
- Πυκνότητα ρεύματος πηνίου χαμηλής και υψηλής τάσης
- Συχνότητα
- Μαγνητικό υλικό
- Κοινό εύρος διαστημάτων στις μεταβλητές σχεδίασης (Σπείρες χαμηλής τάσης, διάσταση D του πυρήνα (πλάτος πυρήνα), διάσταση G του πυρήνα (ύψος πυρήνα), μαγνητική επαγωγή)

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω δεδομένα εισόδου ως κοινά σημεία αναφοράς, πραγματοποιήθηκαν 200 σχεδιάσεις στα δύο λογισμικά. Αναλυτικότερα, πραγματοποιήθηκαν 14 σχεδιάσεις στα 1600 kVA, 24 σχεδιάσεις στα 1000 kVA, 20 σχεδιάσεις στα 800 kVA, 48

σχεδιάσεις στα 630 kVA, 28 σχεδιάσεις στα 400 kVA, 16 σχεδιάσεις στα 250 kVA, 24 σχεδιάσεις στα 160 kVA και 14 σχεδιάσεις στα 100 kVA. Στο Σχήμα Α.21 παρουσιάζεται η μέση διαφορά κόστους μεταξύ της βέλτιστης σχεδίασης που προέκυψε με τη χρήση του υφιστάμενου λογισμικού (*MAIN*) και του *TDO* ανά ισχύ. Όπως φαίνεται στο Σχήμα Α.21, το λογισμικό *TDO* οδηγεί σε βέλτιστες σχεδιάσεις οι οποίες είναι φθηνότερες από αυτές που προκύπτουν από το *MAIN* κατά μέσο όρο που ανέρχεται στο 1.60 % στο σύνολο των 188 σχεδιάσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέσο αυτό κόστος επιτυγχάνεται κατά κανόνα χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα των βέλτιστων λύσεων που παρέχει το *TDO*, από πλευράς συμβατότητας με τους περιορισμούς της σχεδίασης (απόκλιση από εγγυημένες τιμές απωλειών και τάσης βραχυκύκλωσης) και λοιπών χαρακτηριστικών απόδοσης.



Σχήμα Α.22 Μέση διαφορά κόστους μεταξύ της βέλτιστης σχεδίασης του *MAIN-TDO* ανά ισχύ.

Α.10 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το πρόγραμμα βέλτιστης σχεδίασης μετασχηματιστών διανομής *TDO* αποτελεί μια συλλογή από εργαλεία βελτιστοποίησης, ανάλυσης, διαχείρισης, επεξεργασίας και απεικόνισης δεδομένων, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα της διεπιδραστικής κατασκευής και ανάλυσης μετασχηματιστών. Η επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης αποτελεί ένα ισχυρό πλεονέκτημα του προγράμματος, προσφέροντας στο χρήστη ευελιξία βελτιστοποίησης και πληθώρα αποτελεσμάτων. Παράλληλα, περίπου 200 βέλτιστες σχεδιάσεις μετασχηματιστών έχουν ενσωματωθεί στο παρόν λογισμικό αποτελώντας τη βάση δεδομένων και παρέχοντας τη δυνατότητα στο χρήστη να τις εισάγει στο πρόγραμμα για περαιτέρω επεξεργασία. Οι σχεδιάσεις αυτές, συγκρίθηκαν με το υφιστάμενο λογισμικό που χρησιμοποιεί η βιομηχανία, οι οποίες αποδείχθηκαν κατά μέσο όρο 1.60 % φθηνότερες από αυτές που είχε σχεδιάσει το υφιστάμενο. Ταυτόχρονα, το λογισμικό *TDO* συνεργάζεται εξωτερικά με την τρισδιάστατη τεχνική των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία, μέσω της δημιουργίας και επίλυσης του αριθμητικού μοντέλου του φυσικού προβλήματος, αναλύει περαιτέρω τη βέλτιστη λύση. Επίσης, ο χρήστης του προγράμματος μπορεί να πραγματοποιήσει οικονομική αξιολόγηση του μετασχηματιστή χρησιμοποιώντας τη δημοφιλή μέθοδο του συνολικού κόστους κατοχής.

Συμπερασματικά, πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο πακέτο εργαλείων, προσφέροντας ένα φιλικό και εύχρηστο γραφικό περιβάλλον. Η μέθοδος του μικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού σε συνδυασμό με τις καινοτομικές τεχνικές εγγυώνται ολικές βέλτιστες σχεδιάσεις σε μικρό χρονικό διάστημα. Τέλος, το *TDO* μπορεί να χρησιμοποιηθεί όχι μόνο στη βιομηχανία από μηχανικούς σχεδίασης μετασχηματιστών αλλά και για εκπαιδευτική ή πειραματική χρήση στην επεξεργασία και άντληση συμπερασμάτων με εφαρμογή στην διδασκαλία ή στην έρευνα.

A.11 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [A.1] CENELEC Harmonization document, HD 428.1 S1:1992.
- [A.2] Μ. Α. Τσίλη, “Ανάπτυξη μεικτών αριθμητικών τεχνικών πεπερασμένων στοιχείων - οριακών στοιχείων για τη σχεδίαση μετασχηματιστών ισχύος,” *Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα*, 2005.
- [A.3] D. C. Meeker, *Finite Element Method Magnetics*, Version 4.0.1 (03Dec2006 Build), <http://femm.foster-miller.net>.
- [A.4] *ANSI/IEEE Standard C57.120*, “Loss evaluation guide for power transformers and reactors,” 1992.
- [A.5] Σ. Αρτεμάκη, “Εγχειρίδιο μελέτης τριφασικού μετασχηματιστή διανομής τύπου τυλιχτού πυρήνα,” *Schneider Electric AE*, 2000.

