

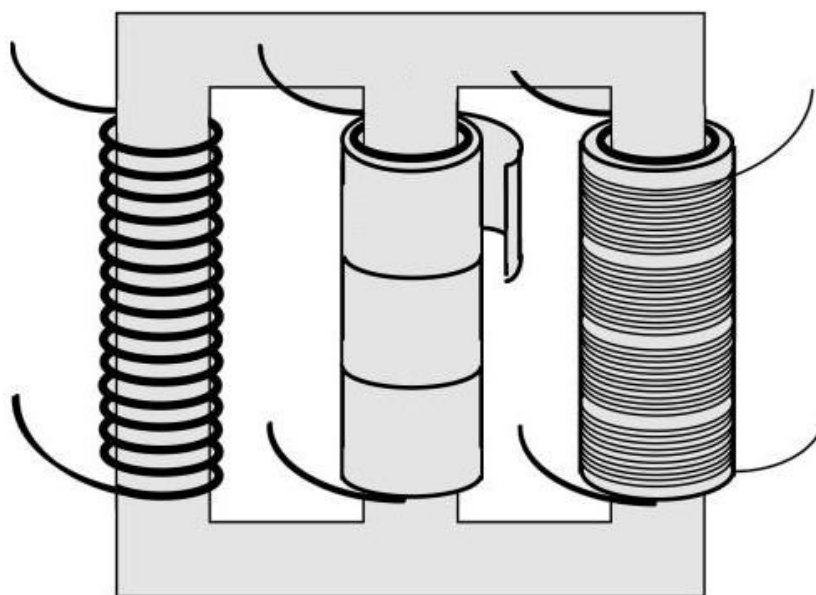


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΟΔΩΡΟΣ Δ. ΑΠΟΣΤΟΛΑΤΟΣ

*Οικονομική αξιολόγηση και βέλτιστη πολιτική προμήθειας
μετασχηματιστών διανομής*



Επιβλέπων Καθηγητής :
ΝΙΚΟΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
ΓΕΩΡΓΙΑΚΗΣ ΠΑΥΛΟΣ

Χανιά, 2010

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον καθηγητή μου κ. Γεωργιάκη Παύλο για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας, καθώς και για την καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια της διεκπεραίωσης της. Ακόμη ευχαριστώ τον κ. Αμοιραλή Ελευθέριο για τις επισημάνσεις του.

Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω τον διευθυντή δικτύου διανομής Νομού Σάμου κ. Κυριαζή Γεώργιο, τον διευθυντή ΑΣΠ Σάμου κ. Ζαφείρη Δημήτριο και τους υπαλλήλους ΑΣΠ Σάμου για την άψογη συνεργασία τους κατά την διάρκεια της πρακτικής μου άσκησης και την αστείρευτη παροχή πληροφοριών.

Τέλος, ευχαριστώ τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής που δέχθηκαν να αξιολογήσουν την προσπάθεια μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η οικονομική αξιολόγηση, καθώς και η βέλτιστη πολιτική προμήθειας μετασχηματιστών διανομής. Στόχος της εργασίας είναι η επιλογή της οικονομικότερης προσφοράς μετασχηματιστών και ο προσδιορισμός των βέλτιστων ποσοτήτων μετασχηματιστών, εφαρμόζοντας τρία αυτόνομα σενάρια προμήθειας. Για την πραγματοποίηση των στόχων, χρησιμοποιείται η μέθοδος ισοδύναμου κόστους επένδυσης και πραγματοποιείται εφαρμογή των αποτελεσμάτων στον Νομό Σάμου.

Αρχικά, στην εργασία παρουσιάζονται οι θεμελιώδεις αρχές λειτουργίας των μετασχηματιστών, τα συστατικά και τα χαρακτηριστικά τους. Επίσης περιλαμβάνονται οι τις απώλειες των μετασχηματιστών (απώλειες φορτίου και απώλειες κενού φορτίου), ο υπολογισμός της αξίας τους και τις δυνατότητες περιορισμού τους. Ακόμη, γίνεται λόγος για τις επιλογές αντικατάστασης των μετασχηματιστών και για τις αιτίες που τις προκαλούν.

Στο κεφάλαιο 6 πραγματοποιείται η εφαρμογή της μεθόδου ισοδύναμου κόστους στον Νομό Σάμου. Για την εφαρμογή της μεθόδου, παρουσιάζονται τα τεχνικά και οικονομικά της ΔΕΗ Σάμου, καθώς επίσης αναπτύσσεται μέθοδος επιλογής των αναγκαίων ποσοτήτων μετασχηματιστών.

Τέλος, στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου, εφαρμόζοντας τρία σενάρια προμήθειας, ανάλογα με τις επιθυμίες του αγοραστή. Επίσης, παρουσιάζονται εικονικά τα αποτελέσματα των τριών σεναρίων, ώστε να πραγματοποιηθεί άμεση σύγκριση τους.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Μετασχηματιστές διανομής, αποδοτικοί μετασχηματιστές, απώλειες κενού φορτίου, απώλειες φορτίου, υπολογισμός απωλειών, κόστος απωλειών, μέθοδος ισοδύναμου κόστους επένδυσης, υπολογισμός ποσοτήτων μετασχηματιστών, αντικατάσταση μετασχηματιστών.

ABSTRACT

The present thesis presents the economic evaluation, as well as the most optimal policy of transformers' market. The purpose of this thesis is the selection of the most economic transformers' offer from the manufacturing companies and the determination of the most optimal quantities of transformers by applying three autonomous market's scripts. The method of equivalent investment's cost is used in order to achieve the objectives, and the results are implemented in the Prefecture of Samos Island.

Initially, this thesis presents the necessary fundamental principals concerning the function of transformers theory, their components and characteristics. Also it includes the losses in transformers (load losses and no load losses), the calculation of their value and the possibilities of their restriction. Furthermore, the choices of replacing transformers and what causes them are discussed.

In chapter 6 the method of equivalent cost for the Prefecture of Samos is implemented. In addition, some technical and economical information of Samo's distribution network are given. Also, there is a presentation of a method which can help a buyer to determinate the necessary quantities of transformers.

Finally, in chapter 7 the results of the method are presented, by applying three market's scripts, depending on the buyer's wishes. Also, the results of these scripts are depicted in order to compare them directly.

KEYWORDS

Distribution's transformers, efficient transformers, no load losses, load losses, calculation of losses, cost of losses, method of equivalent cost of investment, calculation of transformer's quantities, transformer's replacement.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή	1
1.1 Σημασία υπολογισμού απωλειών των μετασχηματιστών	1
1.2 Σημασία προσδιορισμού του κατάλληλου μετασχηματιστή	2
1.3 Σημασία βέλτιστης οικονομικής αξιολόγησης	3
1.4 Περιεχόμενα της εργασίας	4
Κεφάλαιο 2 - Μετασχηματιστές	6
2.1 Γενικά	6
2.1.1 Ανάγκη χρήσης μετασχηματιστών	6
2.1.2 Τύποι μετασχηματιστών	8
2.1.2.1 Μετασχηματιστές διανομής	8
2.1.2.2 Μετασχηματιστές Ισχύος	8
2.1.2.3 Αυτομετασχηματιστές	9
2.2 Αρχή λειτουργίας μετασχηματιστών	9
2.2.1.1 Μονοφασικός μετασχηματιστής	9
2.2.1.2 Τριφασικοί μετασχηματιστές	11
2.2.2 Λειτουργία μετασχηματιστών στο κενό	12
2.2.3 Λειτουργία μετασχηματιστών υπό φορτίο	12
2.3 Χαρακτηριστικά μετασχηματιστών	15
2.3.1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά	15
2.3.1.1 Ονομαστική ισχύς (P_N)	15
2.3.1.2 Συχνότητα (f)	16
2.3.1.3 Ονομαστική τάση τυλίγματος U_n	16
2.3.1.4 Ονομαστική ένταση τυλίγματος (I_n)	16
2.3.1.4 Σύνθετη αντίσταση (Z)	16
2.3.1.6 Τάση βραχυκύκλωσης (U_{bp})	17
2.3.1.7 Απώλειες Κενού φορτίου	17
2.3.1.8 Απώλειες φορτίου	18
2.3.1.9 Ομάδα Ζεύξης	19
2.3.1.10 Βαθμός απόδοσης	19
2.3.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά μετασχηματιστών	21
2.3.2.1 Πυρήνας	21
2.3.2.2 Πηνίο (τύλιγμα)	22
2.3.2.3 Σύστημα ψύξης	22
2.3.2.3.1 Ξηροί μετασχηματιστές	23
2.3.2.3.2 Μετασχηματιστές λαδιού	23
2.3.2.4 Μονωτήρας διέλευσης	24
2.3.2.5 Μονωτικό μέσο	24
2.4 Εξαρτήματα μετασχηματιστή	25
2.5 Συνθήκες λειτουργίας μετασχηματιστών	28
2.5.1 Υπερφόρτιση	28
2.5.2 Παραλληλισμός μετασχηματιστών	28
2.6 Βιβλιογραφία	30

Κεφάλαιο 3 – Απώλειες μετασχηματιστών και κόστος απωλειών.....	31
3.1 Απώλειες μετασχηματιστών	31
3.1.1 Απώλειες κενού φορτίου.....	31
3.1.1.1 Απώλειες υστέρησης.....	32
3.1.1.2 Απώλειες δινορευμάτων	33
3.1.1.3 Προσδιορισμός των απωλειών κενού φορτίου	33
3.1.2 Απώλειες φορτίου	34
3.1.2.1 Απώλειες χαλκού	35
3.1.2.2 Απώλειες δινορευμάτων αγωγού	35
3.1.2.3. Προσδιορισμός των απωλειών φορτίου.....	36
3.1.3 Πρόσθετες απώλειες	37
3.2 Μέθοδοι βελτίωσης απόδοσης μετασχηματιστών	38
3.2.1. Βελτίωση απόδοσης μέσω της σχεδίασης	38
3.2.2. Βελτίωση απόδοσης μέσω της κατασκευής.....	39
3.2.3. Βελτίωση απόδοσης μέσω του βοηθητικού εξοπλισμού	40
3.2.4. Βελτίωση απόδοσης μέσω του μεγέθους του	41
3.2.5. Βελτίωση απόδοσης μέσω της λειτουργίας του.....	41
3.2.6. Βελτίωση απόδοσης μέσω της συντήρησής του.....	41
3.2.7. Βελτίωση απόδοσης με εφαρμογή τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης.....	42
3.3 Αξία των απωλειών.....	42
3.4 Υπολογισμός αξίας των μετασχηματιστών μέσω συντελεστών.....	43
3.4.1 Υπολογισμός συντελεστή Α	43
3.4.2 Υπολογισμός συντελεστή Β.....	45
3.4.3 Επίδραση κόστους των απωλειών στον αγοραστή	47
3.5.1 Παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος αγοράς μετασχηματιστών.....	47
3.6 Βιβλιογραφία	49
Κεφάλαιο 4 – Οικονομική αξιολόγηση μετασχηματιστών.....	50
4.1 Κόστος μετασχηματιστών.....	50
4.2 Κύκλος ζωής	50
4.3 Χρονική αξία του χρήματος.....	51
4.4 Μέθοδοι υπολογισμού κόστους επένδυσης	52
4.4.1 Μέθοδος ισοδύναμου κόστους επένδυσης.....	52
4.4.2 Μέθοδος ισοκατανεμημένου ετησίου κόστους.....	53
4.4.3 Μέθοδος της παρούσας αξίας	53
4.5 Βιβλιογραφία	55
Κεφάλαιο 5 – Αντικατάσταση μετασχηματιστών	56
5.1 Αντικατάσταση μετασχηματιστών.....	56
5.2 Παράγοντες αντικατάστασης μονάδας μετασχηματιστών.....	58
5.2.1 Αντικατάσταση λόγω βλάβης	58
5.2.2 Αντικατάσταση λόγω ηλικίας	59
5.2.3 Αντικατάσταση λόγω φορτίου	60
5.3 Επιλογές αντικατάστασης μετασχηματιστών	62
5.3.1 Νέα περιέλιξη.....	62
5.3.2 Νέα μόνωση	63
5.3.3 Ανακαίνιση εξαρτημάτων	64
5.4 Αντικατάσταση με νέο μετασχηματιστή.....	64

5.4.1	Ίδιας βαθμίδας	65
5.4.2	Μεγαλύτερης βαθμίδας.....	65
5.4.3	Πρόσθεση παράλληλου μετασχηματιστή ίδιας βαθμίδας.....	65
5.5	Συντήρηση μετασχηματιστών.....	66
5.6	Βιβλιογραφία	67
Κεφάλαιο 6 – Εφαρμογή μεθόδου ισοδύναμου κόστους επένδυσης στον Νομό Σάμου .		68
6.1	Εισαγωγή	68
6.2	Μεθοδολογία εφαρμογής ισοδύναμου κόστους	68
6.3	Στοιχεία ΔΕΗ Σάμου	69
6.3.1	Στοιχεία φορτίου	69
6.3.2	Οικονομικά στοιχεία	71
6.3.3	Τεχνικός εξοπλισμός.....	72
6.3.3.1	Εγκαταστημένοι μετασχηματιστές του δικτύου διανομής.....	72
6.3.3.2	Αποθέματα – Αποθήκη	74
6.3.3.2.1	Δημιουργία εικονικής αποθήκης.....	75
6.4	Μέθοδος υπολογισμού ποσοτήτων μετασχηματιστών	77
6.4.1	Παράδειγμα εύρεσης ποσοτήτων μετασχηματιστών 50Kva	79
6.5	Προσφορές εταιριών	82
6.6	Βιβλιογραφία	85
Κεφάλαιο 7 – Αποτελέσματα μεθόδου ισοδύναμου κόστους επένδυσης.....		86
7.1	Γενικά.....	86
7.2	Σενάριο 1 ^ο - Αγορά των απαραίτητων μετασχηματιστών (χωρίς αποθήκη)	87
7.2.1	Εισαγωγή	87
7.2.2	Αποτελέσματα.....	88
7.3	Σενάριο 2 ^ο - Αγορά των απαραίτητων μετασχηματιστών (χρήση αποθήκης). 91	
7.3.1	Εισαγωγή	91
7.3.2	Αποτελέσματα.....	93
7.4	Σενάριο 3 ^ο – Αγορά μέγιστης επιτρεπτής ποσότητας μετασχηματιστών	96
7.4.1	Εισαγωγή	96
7.4.2	Αποτελέσματα.....	97
7.5	Σύγκριση σεναρίων	100
7.6	Βιβλιογραφία	107
Κεφάλαιο 8 – Συμπεράσματα		108

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

Στην διπλωματική εργασία που κρατάτε στα χέρια σας, πραγματοποιείται οικονομική αξιολόγηση των μετασχηματιστών διανομής. Η οικονομική αξιολόγηση παρέχεται μετά από την εξέταση του κόστους απωλειών, σε σχέση με την τιμή αγοράς τους. Στόχος της είναι ο προσδιορισμός της βέλτιστης προμήθειας μετασχηματιστών, ικανής ώστε να καλύψει τις απαιτήσεις του δικτύου.

Επίσης, αναπτύσσεται η βέλτιστη πολιτική προμήθειας των μετασχηματιστών διανομής. Για την επιλογή της πολιτικής, αρχικά υπολογίζονται οι απαραίτητες ποσότητες αγοράς μετασχηματιστών, σύμφωνα με τις απαιτήσεις και την στρατηγική της αγοράστριας εταιρίας. Στην συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση της αγοράς για την επόμενη πενταετία, καθώς και ο υπολογισμός των βέλτιστων ποσοτήτων προμήθειας μετασχηματιστών κάθε βαθμίδας, σύμφωνα με το ετήσιο διαθέσιμο κεφάλαιο.

Τέλος, πραγματοποιείται εφαρμογή της οικονομικής αξιολόγησης, καθώς και της βέλτιστης πολιτικής αγοράς μετασχηματιστών διανομής για τον Νομό Σάμου.

1.1 Σημασία υπολογισμού απωλειών των μετασχηματιστών

Ο στόχος των εταιριών παροχής ενέργειας δεν περιορίζεται στην παραγωγή επαρκούς ηλεκτρικής ενέργειας, ικανής ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες του δικτύου. Η διανομή του ηλεκτρικού ρεύματος οφείλει να πραγματοποιείται αποδοτικά, στοχεύοντας τον περιορισμό των συνολικών απωλειών του δικτύου. Μέσα από την αποδοτική διανομή, επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων.

Οι απώλειες των μετασχηματιστών διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι απώλειες κενού φορτίου, οι οποίες δρουν συνεχώς στον μετασχηματιστή καθώς είναι ανεξάρτητες από τον χρόνο και την φόρτιση του. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι απώλειες φορτίου, οι οποίες μεταβάλλονται ανάλογα με το φορτίο του μετασχηματιστή. Και οι δύο μορφές απωλειών μετατρέπουν μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμότητα, η οποία επιβαρύνει αρνητικά την λειτουργία του μετασχηματιστή. Η κυριότερη επίπτωση της παραγόμενης ενέργειας θεωρείται η μείωση της διάρκειας ζωής των μονάδων, λόγω της φθοράς των εξαρτημάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι στους μετασχηματιστές μεγάλης ηλικίας παρατηρούνται αυξημένες απώλειες, λόγω της εκτεταμένης φθοράς που έχουν υποστεί αλλά και της ξεπερασμένης τεχνολογίας που χρησιμοποιούν.

Η μέθοδοι που παρέχουν εκτιμήσεις απωλειών των μετασχηματιστών συνεχώς βελτιώνονται και παρέχουν πλέον ακριβή αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα ωφελούν τους αγοραστές, καθώς το μέγεθος των απωλειών συμβάλει στην επιλογή αντικατάστασης των μονάδων μετασχηματιστών ή στην ανακαίνιση των εξαρτημάτων τους. Επίσης, ωφελεί τους κατασκευαστές, δίνοντας τους την δυνατότητα να δοκιμάσουν νέα υλικά για την κατασκευή των μετασχηματιστών, στοχεύοντας στην περαιτέρω μείωση των απωλειών, επομένως στην αύξηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας.

1.2 Σημασία προσδιορισμού του κατάλληλου μετασχηματιστή

Η εξέλιξη των εταιριών κατασκευής μετασχηματιστών κρίνεται ικανοποιητική, παρέχοντας πληθώρα προϊόντων με αρκετές διαφοροποιήσεις στις αποδόσεις και επομένως στις τιμές αγοράς. Πριν από την πραγματοποίηση αγοράς μετασχηματιστών, οφείλουν να διεξαχθούν έλεγχοι σχετικά με τις ανάγκες του δικτύου και με τις πιθανές εναλλακτικές κάλυψής τους. Οι ανάγκες των δικτύων διανομής διαμορφώνουν την απόφαση αγοράς ενός αποδοτικού μετασχηματιστή ή ενός μετασχηματιστή παλαιότερης τεχνολογίας.

Η επιλογή και εγκατάσταση αποδοτικών μετασχηματιστών δεν απαιτεί γνώσεις σχεδιασμού και παραγωγής μετασχηματιστών. Οι αποδοτικοί μετασχηματιστές εξασφαλίζουν μικρότερες συνολικές απώλειες, επομένως μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων. Λόγω της εξοικονόμησης ενέργειας, μειώνεται το παραγόμενο ηλεκτρικό φορτίο, συνεπώς μειώνονται οι ρύποι καυσαερίων. Ωστόσο, το κόστος απόκτησης ενός αποδοτικού μετασχηματιστή είναι υψηλό και συχνά η αγορά τους αποφεύγεται από ιδιώτες ή μικρές εταιρίες διανομής.

Οι μετασχηματιστές παλαιότερης τεχνολογίας είναι περισσότερο δημοφιλής χάρη της χαμηλής τιμής αγοράς τους. Στην περίπτωση κτήσης ενός παλαιού μετασχηματιστή εμφανίζονται μεγαλύτερες απώλειες, οι οποίες μεταφράζονται σε χρηματικό κόστος. Η αγορά απλών μετασχηματιστών πιθανώς να αποτελεί βέλτιστη λύση για τους αγοραστές που επιθυμούν την προμήθεια ενός μικρού αριθμού μονάδων. Επίσης, η συντήρηση των μη αποδοτικών μετασχηματιστών είναι οικονομικότερη σε σχέση με την συντήρηση των αποδοτικών.

Το πρόβλημα επιλογής του βέλτιστου μετασχηματιστή είναι σύνθετο και εξαρτάται από τις ανάγκες του αγοραστή. Συνοπτικά, αναφέρονται οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την απόφαση επιλογής: η τιμή αγοράς, η ικανότητα παραγωγής ενέργειας και οι ποσότητες των μετασχηματιστών που θα αγοραστούν. Η βαρύτητα των παραπάνω παραγόντων ορίζεται από την κρίση του υποψήφιου αγοραστή, επομένως δημιουργείται ένα υποκειμενικό πρόβλημα. Στοχεύοντας στην αποφυγή της παραπάνω δυσκολίας, εφαρμόζονται μέθοδοι οικονομικής αξιολόγησης μετασχηματιστών, οι οποίοι αναλαμβάνουν να μεταφράσουν όλους τους παράγοντες σε χρηματική αξία. Δηλαδή, πραγματοποιείται μετατροπή του προβλήματος ώστε να προκύψουν αντικειμενικά αποτελέσματα, τα οποία είναι αποδεκτά και σεβαστά από όλους τους αγοραστές.

Το πρόβλημα προσδιορισμού του κατάλληλου μετασχηματιστή απασχολεί τους ερευνητές περισσότερο από μια δεκαετία. Λόγω του αυξημένου κόστους παραγωγής ενέργειας και των προβλημάτων που προκύπτουν κατά την παραγωγή της, έχουν δημιουργηθεί οργανώσεις που στοχεύουν στην αύξηση αποδοτικότητας των συστημάτων διανομής, μέσω της μείωσης των απωλειών των μετασχηματιστών διανομής. Ενδεικτικά αναφέρονται οι οργανισμοί: NEMA (National Electrical Manufacturers Association) και Energy Star με έδρα τις ΗΠΑ, Leonardo Energy και ερευνητικό πρόγραμμα SEEDT (Strategies for development and diffusion of Energy Efficient Distribution Transformers με έδρα την Ευρώπη.

1.3 Σημασία βέλτιστης οικονομικής αξιολόγησης

Το συνεχώς αυξανόμενο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει δημιουργήσει την ανάγκη κατασκευής αποδοτικότερων μετασχηματιστών. Ωστόσο, οι περισσότεροι ιδιώτες και ιδιοκτήτες μικρών παραγωγικών μονάδων, επιμένουν στην αγορά μετασχηματιστών παλαιότερης τεχνολογίας, λόγω της χαμηλότερης τιμής αγοράς τους. Ωστόσο, αρκετές φορές πραγματοποιείται αγορά παλαιότερων μονάδων λόγω ελλιπής ενημέρωσης των αγοραστών σχετικά με τα πλεονεκτήματα των αποδοτικών μετασχηματιστών.

Η οικονομική αξιολόγηση πραγματοποιείται ώστε να γίνει εφικτή η σύγκριση των τιμών αγοράς με την απόδοση των μετασχηματιστών. Επομένως, οφείλεται να παρέχεται επαρκής ενημέρωση σχετικά με τις οικονομικές παραμέτρους του προβλήματος. Στοχεύοντας στην έγκυρη οικονομική αξιολόγηση, συνδυάζεται η αξία του χρήματος και οι χρηματικές αξίες των απωλειών καθ' όλη την διάρκεια λειτουργίας των μετασχηματιστών. Συχνά, οι παραπάνω παράμετροι δεν είναι γνωστοί στο ευρύ ενδιαφερόμενο κοινό. Τα αίτια που δημιουργούν την ελλιπή ενημέρωση αφορούν τις μικρές ποσότητες αγοράς μετασχηματιστών. Αγοράζοντας μικρές ποσότητες, η εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων παραμένει σε μικρά επίπεδα, ώστε να μην λαμβάνονται τελικά υπόψη. Ένας ακόμη παράγοντας ελλιπής ενημέρωσης προκαλείται από την μεσολάβηση αντιπροσώπων ανάμεσα στον κατασκευαστή και στον αγοραστή.

Οι μέθοδοι οικονομικής αξιολόγησης των μετασχηματιστών λειτουργούν ως εργαλεία στα χέρια των αγοραστών που επιδιώκουν την βέλτιστη αγορά. Οι μέθοδοι εκτιμούν το κόστος απωλειών και την αξιοπιστία των μονάδων, σε συνδυασμό με το κόστος αγοράς των μετασχηματιστών. Επομένως, τα αποτελέσματα κινούνται σε κοινό παρανομαστή, κάνοντας εφικτή και εύκολη την άμεση σύγκριση των διάφορων επιλογών. Ο παραπάνω παρανομαστής καλείται συνολικό κόστος κατοχής (TOC) και αποτελεί ένα αντικειμενικό οικονομικό κριτήριο σύγκρισης των μετασχηματιστών. Στις οικονομικές αξιολογήσεις μπορούν αν συμπεριληφθούν περισσότεροι παράμετροι, όπως οι εκπομπές καυσαερίων, δίνοντας στο πρόβλημα επιλογής πιο σύνθετο χαρακτήρα. Αξίζει να αναφερθεί ο παράγοντας της αβεβαιότητας σχετικά με την εκτίμηση των απωλειών και του μελλοντικού κόστους του χρήματος. Η επιλογή της μεθόδου αφήνεται

στην κρίση του αγοραστή, ο οποίος επιλέγει την μέθοδο που παρουσιάζει κατανοητά και ευδιάκριτα αποτελέσματα.

1.4 Περιεχόμενα της εργασίας

Στο **κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται οι τύποι, τα ηλεκτρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά, καθώς και τα εξαρτήματα των μετασχηματιστών. Επίσης αναφέρεται η αρχή λειτουργίας των μετασχηματιστών σε κενό και υπό φορτίο. Ακόμη πραγματοποιείται μικρή αναφορά σχετικά με τις συνθήκες λειτουργίας τους.

Στο **κεφάλαιο 3** αναλύονται τα είδη των απωλειών των μετασχηματιστών και πραγματοποιείται ο προσδιορισμός τους κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους. Έπειτα, παρουσιάζονται οι μέθοδοι βελτίωσης της απόδοσης. Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στην αξία και το κόστος των απωλειών, προσδιορίζοντας του συντελεστές κόστους Α και Β. Τέλος, αναφέρονται οι επιδράσεις του κόστους στον αγοραστή, όπως επίσης οι παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος αγοράς.

Στο **κεφάλαιο 4** πραγματοποιείται οικονομική αξιολόγηση των μετασχηματιστών. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τρεις μέθοδοι αποτίμησης της αξίας τους: το ισοδύναμο κόστος επένδυσης, το ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος και η παρούσα αξία. Οι παραπάνω μέθοδοι βοηθούν τον αγοραστή να λάβει την βέλτιστη απόφαση αγοράς. Για την κατανόηση των μεθόδων, επεξηγούνται οι όροι του κόστους μετασχηματιστών, κύκλου ζωής τους και χρονική αξία του χρήματος.

Στο **κεφάλαιο 5** περιγράφονται οι επιλογές αντικατάστασης των μετασχηματιστών, είτε ολόκληρης της μονάδας, είτε των επιμέρους εξαρτημάτων. Στην συνέχεια, αναφέρονται οι παράγοντες που επιδρούν στα κριτήρια αντικατάστασης. Τέλος, ο λόγος δίνεται στην συντήρηση των μονάδων καθώς και στον τρόπο που επηρεάζει την απόδοση τους και την απόφαση της αντικατάστασης

Στο **κεφάλαιο 6** παρουσιάζεται η μετατροπή της αντικειμενικής συνάρτησης μεθόδου ισοδύναμου κόστους, ώστε να γίνει εφικτή γίνει εφικτή η εφαρμογή της στον Νομό Σάμου. Για την τροφοδοσία δεδομένων στην μεθόδου, γίνεται αναφορά στα τεχνικά και οικονομικά στοιχεία της ΔΕΗ Σάμου. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η έννοια της εικονικής αποθήκης και εξηγείται ο σκοπός της δημιουργίας της. Επίσης, μοντελοποιείται διαδικασία υπολογισμού των ποσοτήτων μετασχηματιστών. Η διαδικασία αυτή παρέχει τον ακριβή αριθμό μετασχηματιστών που χρειάζονται αντικατάσταση μέσα στα επόμενα πέντε χρόνια, ακολουθώντας τα κριτήρια ηλικίας των μετασχηματιστών και φορτίου του δικτύου. Τέλος, αναφέρονται οι προσφορές των εταιριών και η διαδικασία επιλογής της οικονομικότερης προσφοράς.

Στο **κεφάλαιο 7** περιγράφονται τρία σενάρια αγοράς μετασχηματιστών, τα οποία αντικατοπτρίζουν πραγματικές συνθήκες αγοράς. Επίσης παρουσιάζονται οι κατάλληλοι περιορισμοί κάθε σεναρίου, όπως επίσης και τα αποτελέσματα τους. Τέλος,

πραγματοποιείται μια μικρής σύγκριση των σεναρίων όσο αφορά την οικονομική σκοπιά του προβλήματος.

Στο **κεφάλαιο 8** παρατίθενται τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις και εφαρμογές των προηγούμενων κεφαλαίων.

Κεφάλαιο 2 - Μετασχηματιστές

2.1 Γενικά

Είναι σύνηθες φαινόμενο η ανάγκη χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας με διαφορετική τάση από την τάση που παρέχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο διανομής. Στο συνεχές ρεύμα, το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με την χρήση αντιστάσεων, οι οποίες προκαλούν πτώση τάσης στα άκρα τους και μπορούν να τροφοδοτήσουν ηλεκτρικές συσκευές που απαιτούν μικρότερη τάση. Το βασικό μειονέκτημα της παραπάνω μεθόδου είναι οι μεγάλες απώλειες λόγω της θερμότητας που αναπτύσσεται στην αντίσταση. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα ζεύγος γεννήτριας-κινητήρα, με τον κινητήρα να τροφοδοτείται από το ηλεκτρικό δίκτυο διανομής και την γεννήτρια να δίνει την απαραίτητη τάση με μεταβολή της έντασης διέγερσης της. Η εφαρμογή της τελευταίας μεθόδου δεν ενδείκνυται, καθώς ο συνολικός βαθμός του συστήματος είναι μικρός και το κόστος μετασχηματισμού πολύ υψηλό.

Στο εναλλασσόμενο ρεύμα το παραπάνω πρόβλημα απλοποιείται, καθώς υπάρχουν ηλεκτρικές μηχανές που μπορούν να κάνουν τις απαραίτητες μετατροπές χωρίς κινούμενα τμήματα και συνεπώς με ελάχιστες απώλειες ισχύος. Οι συσκευές αυτές ονομάζονται μετασχηματιστές και επιτρέπουν την διανομή και τον μετασχηματισμό της ενέργειας με τρόπο αποτελεσματικό και οικονομικό, καθώς ο συντελεστής απόδοσης τους είναι μεγαλύτερος από 95%

2.1.1 Ανάγκη χρήσης μετασχηματιστών

Η χρήση των μετασχηματιστών στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας είναι αναγκαία, καθώς στους ακροδέκτες των μονάδων παραγωγής ενέργειας εφαρμόζεται υψηλή τάση, η οποία είναι ακατάλληλη για τις ηλεκτρικές συσκευές των παραληπτών. Οι ενεργειακές ανάγκες των πελατών, εκφράζονται ως ένα μεγάλο συνολικό ποσό ισχύος P (watt), που οφείλεται να μεταφέρεται σταθερά από το δίκτυο διανομής. Επομένως, το γινόμενο ρεύματος και τάσης (σχέση 2.1) πρέπει να διατηρείται σταθερό και με τις λιγότερο δυνατές απώλειες.

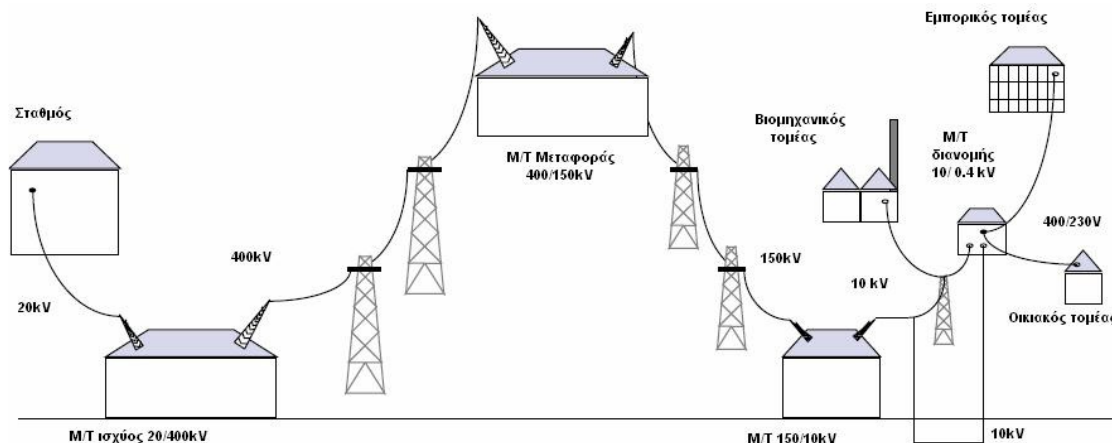
$$P = I \cdot V \quad (2.1)$$

Οι απώλειες των δικτύων διανομής, οφείλονται στην μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε θερμική κατά την διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος από έναν αγωγό. Η θερμική ενέργεια δημιουργείται λόγω των συγκρούσεων μεταξύ των μορίων του αγωγού και οι απώλειες της δίνονται από τον τύπο:

$$\Theta.Απώλειες = I^2 \cdot R \cdot t \quad (2.2)$$

Όπου I η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, R η αντίσταση του αγωγού, t ο χρόνος διέλευσης ηλεκτρικού ρεύματος. Συνεπώς, είναι επιθυμητή η μικρή τιμή του ρεύματος (I), καθώς οι θερμικές απώλειες είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος. Καθώς είναι απαραίτητη η μέγιστη και σταθερή ισχύς με μειωμένες απώλειες, δηλαδή μικρή τιμή ρεύματος (I) και σύμφωνα με τον τύπο της ισχύς (2.1) γίνεται αντιληπτό ότι απαιτείται μεγάλη τιμή της τάσης (V).

Συνοψίζοντας, ο μετασχηματιστής είναι η ηλεκτρική μηχανή που παρεμβάλλεται ανάμεσα από την μονάδα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος και τους τελικούς αποδέκτες του ρεύματος. Σκοπός της λειτουργίας του είναι η μετατροπή της ηλεκτρικής τάσης (V) σε επιθυμητές τιμές. Κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η παραγόμενη τάση (V) λαμβάνει τιμές της τάξεως των 10kV – 30kV. Κατά την μεταφορά της ενέργειας, η τάση διαμορφώνεται στα 220 kV – 400 kV και τελικά υποβαθμίζεται σε τάση οικιακής χρήσης, δηλαδή στα 230 V. Επομένως, έχοντας ως αφετηρία την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας και ως προορισμό την τελική της κατανάλωση, παρατηρούνται τουλάχιστον τρεις μετατροπές της τάσης. Στο σχήμα 2.1 δίνεται η τυπική διάταξη ενός ευρωπαϊκού δικτύου διανομής ενέργειας με τις πιθανές μετατροπές της ηλεκτρικής τάσης [2.1].



Σχήμα 2.1 – Τυπικό ευρωπαϊκό δίκτυο διανομής ενέργειας

Η χαμηλή τιμή αγοράς και εγκατάστασης, οι μικρές απώλειες ισχύος και η αυξημένη αξιοπιστία τους έχουν καθιερώσει τους μετασχηματιστές ως τις οικονομικότερες και αποτελεσματικότερες ηλεκτρικές μηχανές μετατροπής ηλεκτρικού ρεύματος.

2.1.2 Τύποι μετασχηματιστών

Οι μετασχηματιστές μπορούν να ταξινομηθούν σε κατηγορίες, ανάλογα με:

- Την χρήση
- Την ψύξη
- Το μονωτικό μέσο
- Την κατασκευή πυρήνα

Η πιο διαδεδομένη ταξινόμηση των μετασχηματιστών, αφορά την ταξινόμηση ανάλογα με την χρήση τους. Η χρήση τους προσδιορίζεται από το μέγιστο φορτίο, που μπορούν να χειριστούν. Οι τύποι μετασχηματιστών που χρησιμοποιούνται από το Ελληνικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι μετασχηματιστές διανομής, οι μετασχηματιστές ισχύος και οι αυτομετασχηματιστές.

2.1.2.1 Μετασχηματιστές διανομής

Οι μετασχηματιστές διανομής χρησιμοποιούνται από τα δίκτυα διανομής για να μεταφέρουν ενέργεια από το δίκτυο διανομής μέσης τάσης (MT) στο δίκτυο χαμηλής τάσης (XT) των καταναλωτών. Η ισχύς των μετασχηματιστών διανομής κυμαίνεται από 50 kVA έως 1600 kVA [2.2]. Ο τύπος αυτών των μετασχηματιστών συναντάται στο εναέριο δίκτυο της εταιρίας διανομής ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), καθώς τροφοδοτεί με κατάλληλη τάση τις ηλεκτρικές συσκευές.

Οι μετασχηματιστές διανομής κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το σύστημα ψύξης τους. Ως επακόλουθο, υπάρχουν οι μετασχηματιστές ξηρού τύπου και οι μετασχηματιστές λαδιού. Στους μετασχηματιστές ξηρού τύπου, η ψύξη πραγματοποιείται με φυσική ή εξαναγκασμένη κυκλοφορία αέρα στα τυλίγματα του μετασχηματιστή. Αντιθέτως, οι μετασχηματιστές λαδιού χρησιμοποιούν ορυκτό ή συνθετικό λάδι. Στην ενότητα 2.3.2.3 αναφέρονται αναλυτικά οι διαδικασίες ψύξης κάθε κατηγορία μετασχηματιστών.

2.1.2.2 Μετασχηματιστές Ισχύος

Οι μετασχηματιστές ισχύος χρησιμοποιούνται είτε για την ανύψωση, είτε για τον υποβιβασμό της τάσης μέχρι την μέση τάση του δικτύου διανομής (MT). Χρησιμοποιούνται κυρίως στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας, καθώς και στους υποσταθμούς μεταφοράς. Η ισχύς των μετασχηματιστών ισχύος είναι συνήθως πάνω από 2 MVA και η συχνότητα λειτουργίας τους είναι στα 50Hz. [2.2]

2.1.2.3 Αυτομετασχηματιστές

Οι αυτομετασχηματιστές χρησιμοποιούνται για την μετατροπή τάσεων εντός σχετικά μικρών ορίων, για την σύνδεση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας διαφόρων τάσεων, για την εκκίνηση κινητήρων εναλλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος, για την εξουδετέρωση διακυμάνσεων των τάσεων στα δίκτυα κ.α. Στους αυτομετασχηματιστές υπάρχει μόνο ένα τύλιγμα με μια ενδιάμεση λήψη, που μπορεί να είναι κινητή ή σταθερή. [2.2]

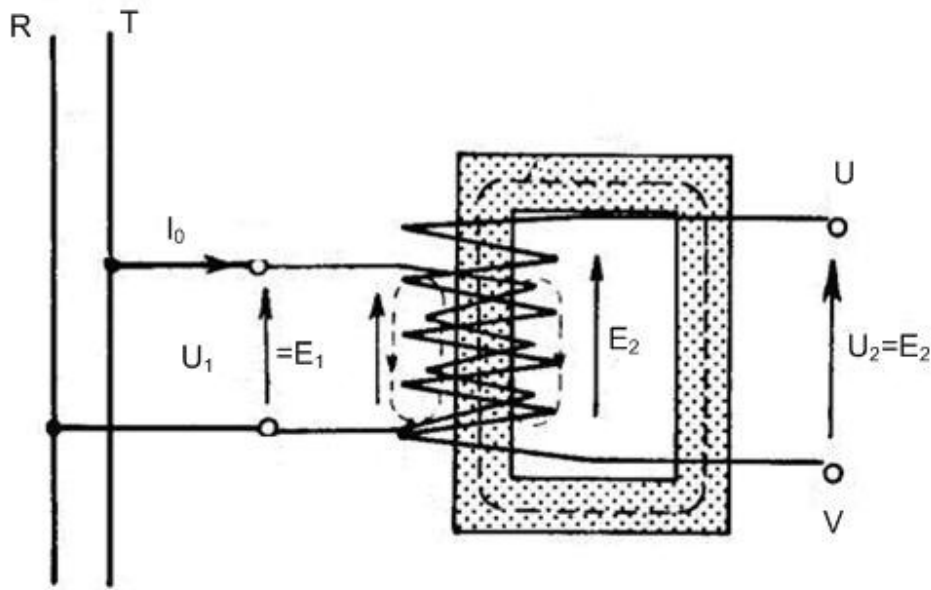
2.2 Αρχή λειτουργίας μετασχηματιστών

2.2.1.1 Μονοφασικός μετασχηματιστής



Σχήμα 2.2 - Μονοφασικός μετασχηματιστής

Στο σχήμα 2.2 δίνεται ένας μονοφασικός μετασχηματιστής, στον οποίο για λόγους απλότητας θεωρείται ότι υπάρχουν τυλίγματα μόνο στον έναν κορμό του πυρήνα. Το πρωτεύον τύλιγμα (χαμηλής τάσης) τροφοδοτείται από δίκτυο εναλλασσόμενου φορτίου με ενεργό τιμή τάσης U_1 . Το δευτερεύον τύλιγμα (υψηλής τάσης) είναι ανοικτό. Λόγω της τάσης τροφοδοσίας, θα κυκλοφορήσει στο πρωτεύον τύλιγμα εναλλασσόμενο ρεύμα I_0 , με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μαγνητικής ροής στον πυρήνα που κλείνει κύκλωμα μέσω του σιδήρου του πυρήνα. Η μαγνητική ροή που δημιουργείται είναι εναλλασσόμενη με συχνότητα ίση της συχνότητας της τάσης τροφοδοσίας. Επομένως, στο δευτερεύον τύλιγμα θα αναπτυχθεί μια ΗΕΔ ενεργού τιμής E με επαγωγή που δίνεται από την σχέση (2.3):



Σχήμα 2.3 - Λειτουργία μονοφασικού μετασχηματιστή σε κενό

$$E = 4.44 \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi_{\mu} \quad (2.3)$$

Όπου

f η συχνότητα σε Hz, w_2 ο αριθμός σπειρών του δευτερεύοντος τυλίγματος και Φ_{μ} το πλάτος της ημιτονοειδούς μεταβαλλόμενης ροής

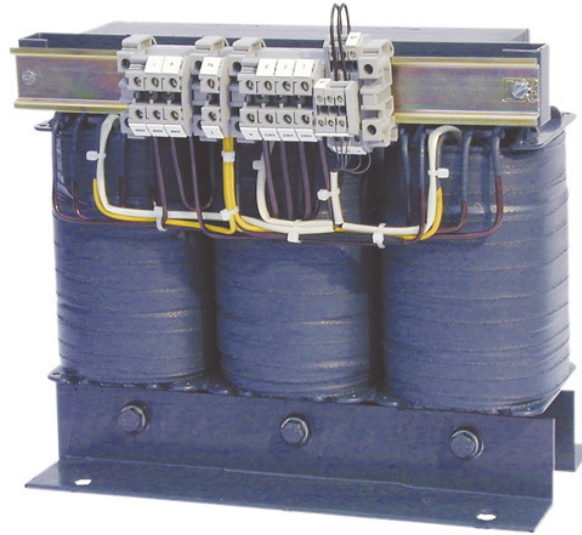
Άρα, το δευτερεύον τύλιγμα λειτουργεί ως μια μονοφασική γεννήτρια με ΗΕΔ ίση με E , από την οποία μπορεί να διοχετευτεί ηλεκτρικό ρεύμα με την σύνδεση των άκρων U και V . Η αναπτυσσόμενη ΗΕΔ είναι ανάλογη του αριθμού σπειρών w_2 του δευτερεύοντος τυλίγματος και επομένως μπορεί να λάβει διαφορετικές τιμές μεταβάλλοντας των αριθμό των σπειρών. [2.3]

Με όμοιο τρόπο δημιουργείται ΗΕΔ με επαγωγή και στο πρωτεύον τύλιγμα που δρα σαν αντιηλεκτρεγερτική δύναμη στην U_1 . Η ενεργός τιμή της δίνεται από την σχέση (2.4) και εξαρτάται από τον αριθμό σπειρών w_1 του πρωτεύοντος τυλίγματος

$$E_1 = 4.44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi_{\mu} \quad (2.4)$$

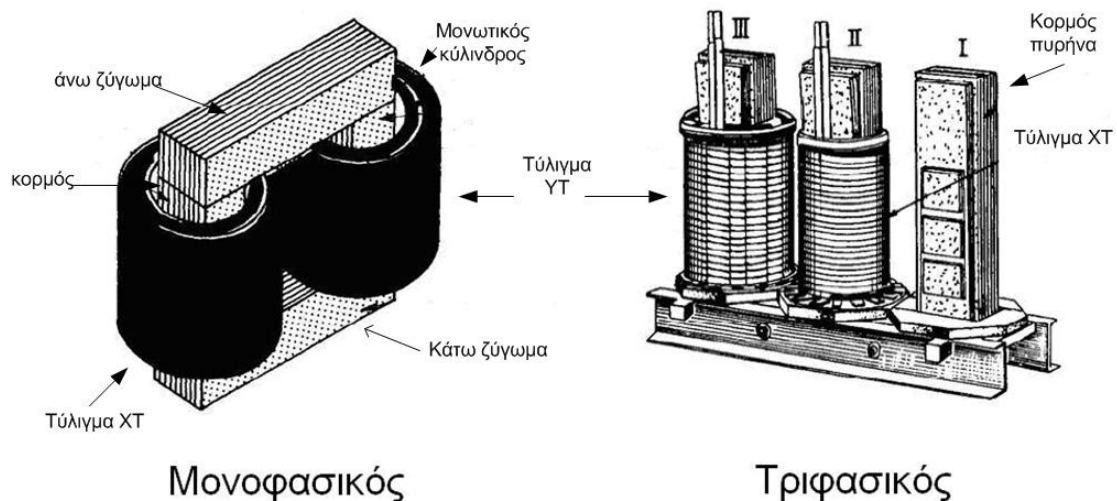
Η μαγνητική ροή Φ_{μ} είναι η χρήσιμη μαγνητική ροή του μετασχηματιστή, διότι συντελεί στην δημιουργία των ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων. Το ρεύμα I_0 , που περνά από το πρωτεύον τύλιγμα, δημιουργεί μια πρωτεύουσα ροή σκέδασης που δεν περνά από τον πυρήνα αλλά κλείνει το κύκλωμα μέσω του αέρα. Παρόλο που η ροή αυτή είναι μικρό ποσοστό της χρήσιμης (μικρότερο του 0,5%), έχει ιδιαίτερη σημασία στην λειτουργία του μετασχηματιστή διότι δημιουργεί αυτεπαγωγική πτώση τάσης. [2.3]

2.2.1.2 Τριφασικοί μετασχηματιστές



Σχήμα 2.4 - Τριφασικός μετασχηματιστής

Το ενεργό μέρος των τριφασικών μετασχηματιστών αποτελείται, όπως στους μονοφασικούς, από τον πυρήνα και τα τυλίγματα. Η μόνη διαφορά εντοπίζεται στον αριθμό των κορμών, καθώς οι μονοφασικοί μετασχηματιστές έχουν δυο κορμούς, ενώ οι τριφασικοί μετασχηματιστές έχουν τρεις κορμούς (σχήμα 2.5). Σε κάθε κορμό του πυρήνα τριφασικού μετασχηματιστή τοποθετείται ένα τύλιγμα χαμηλής τάσης και ένα τύλιγμα υψηλής τάσης. Επομένως, κάθε κορμός συμπεριφέρεται σαν μονοφασικός μετασχηματιστής και ισχύουν όσα αναφέρθηκαν παραπάνω.



Μονοφασικός

Τριφασικός

Σχήμα 2.5 – Πυρήνας και τυλίγματα μονοφασικού και τριφασικού μετασχηματιστή

2.2.2 Λειτουργία μετασχηματιστών στο κενό

Κατά την λειτουργία ενός μετασχηματιστή στο κενό (σχήμα 2.3), το ρεύμα I_0 είναι ένα μικρό ποσοστό της ονομαστικής έντασης (1 ως 5% για τους μέτριους και μεγάλου μεγέθους, ενώ ως 10% για τους μικρούς μετασχηματιστές). Επομένως, η ωμική πτώση τάσης ($I_0 R$) στο πρωτεύον τύλιγμα, λόγω της ωμικής αντίστασης R_1 του αγωγού, είναι πολύ μικρή. Το ίδιο ισχύει και για την επαγωγική πτώση τάσης, λόγω της ροής σκέδασης. [2.3]

Άρα, κατά την λειτουργία στο κενό, η τάση U_1 ισούται κατά προσέγγιση με την αναπτυσσόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη E_1 στο πρωτεύον τύλιγμα.

$$U_1 \cong E_1 \quad (2.5)$$

Ομοίως για το δευτερεύον τύλιγμα κατά την λειτουργία στο κενό:

$$U_2 \cong E_2 \quad (2.6)$$

Επομένως, ισχύει ότι:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{4.44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi}{4.44 \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi} = \frac{w_1}{w_2} = k \quad (2.7)$$

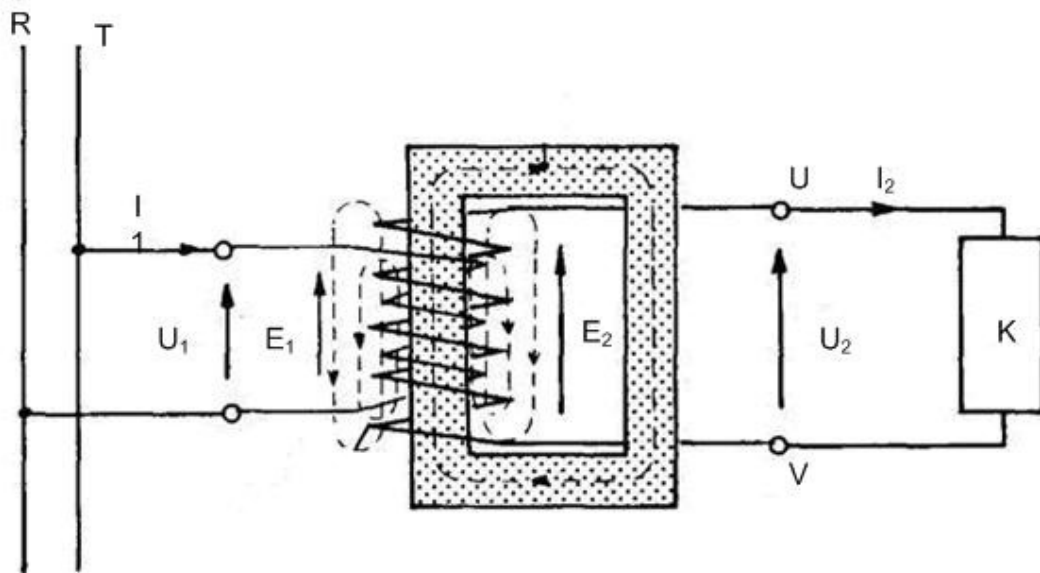
Δηλαδή, κατά την λειτουργία ενός μετασχηματιστή στο κενό, ο λόγος των τάσεων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος τυλίγματος είναι ίσος με τον λόγο των αριθμών σπειρών των αντίστοιχων τυλιγμάτων τους. Ο λόγος των τυλιγμάτων ονομάζεται σχέση μεταφοράς k του μετασχηματιστή.

Οι μαγνητικές απώλειες του μετασχηματιστή είναι πρακτικά οι ίδιες στο κενό και υπό φορτίο. Δεν ξεπερνούν το 4-5% της ονομαστικής ισχύος και μειώνονται μέχρι το 1% στους μετασχηματιστές υψηλής απόδοσης. Λόγω των πολύ μικρών απωλειών στο κενό, οι μετασχηματιστές μπορούν να παραμένουν συνδεδεμένοι στο δίκτυο έστω και χωρίς φορτίο στο δευτερεύον τύλιγμα. [2.3]

2.2.3 Λειτουργία μετασχηματιστών υπό φορτίο

Με την σύνδεση ενός καταναλωτή στο δευτερεύον μέρος του μετασχηματιστή, ενώ το πρωτεύον τροφοδοτείται με σταθερή τάση U_1 , τότε από το δευτερεύον θα περάσει εναλλασσόμενο ρεύμα με ενεργό τιμή I_2 . Ταυτόχρονα, το ρεύμα που απορροφά το πρωτεύον αυξάνεται αυτόματα από I_0 σε I_1 . Τελικά, η ισχύς που απορροφά ο καταναλωτής από το δευτερεύον, μαζί με τις απώλειες του μετασχηματιστή, παρέχεται από το δίκτυο που τροφοδοτεί το πρωτεύον.

Η μαγνητική ροή Φ_μ από τον πυρήνα παραμένει ίδια όπως και στην λειτουργία στο κενό. Αξίζει να σημειωθεί ότι εξαρτάται μόνο από τα κατασκευαστικά στοιχεία του μετασχηματιστή και όχι από τις συνθήκες φόρτισής του.



Σχήμα 2.6 - Λειτουργία μετασχηματιστή υπό φορτίο

Αν μετρηθούν οι εντάσεις I_1 και I_2 , διαπιστώνεται ότι με αρκετή προσέγγιση ισχύει η σχέση:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{w_1}{w_2} = k \quad (2.8)$$

Με προσέγγιση ισχύει επίσης και υπό φορτίο η σχέση

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} \quad (2.9)$$

$$U_2 = \frac{U_1}{k} \quad (2.10)$$

Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν απόλυτα στον ιδανικό μετασχηματιστή, δηλαδή στον μετασχηματιστή που οι απώλειες και οι ροές σκέδασης είναι μηδενικές. Στην περίπτωση των πραγματικών μετασχηματιστών ισχύουν οι παραπάνω προσεγγίσεις και μάλιστα, όσο μικρότερες είναι οι απώλειες τόσο καλύτερη είναι η προσέγγιση.

Από τις παραπάνω σχέσεις διαπιστώνεται ότι αν ένας μετασχηματιστής ανυψώνει την τάση στο δευτερεύον, τότε υποβιβάζει την ένταση που κυκλοφορεί σ' αυτό. Έτσι, το τύλιγμα χαμηλής τάσης και μεγάλης έντασης οφείλει να αποτελείται από μικρό αριθμό

σπειρών και αγωγό μεγάλης διατομής. Αντιθέτως, το τύλιγμα υψηλής τάσης και μικρής έντασης οφείλει να αποτελείται από μεγάλο αριθμό σπειρών και αγωγό μικρής διατομής.

Με αμελητέες απώλειες του μετασχηματιστή, η ισχύς P_1 , που απορροφά το πρωτεύον τύλιγμα από το δίκτυο, είναι περίπου ίση με την ισχύ P_2 που δίνει το δευτερεύον

$$P_1 = P_2 \quad (2.11)$$

ή

$$U_1 I_1 \cos \phi_1 = U_2 I_2 \cos \phi_2 \quad (2.12)$$

Με βάση τις σχέσεις υπολογισμού των μεγεθών του δευτερεύοντος

$$U_2 I_2 = U_1 I_1 \quad (2.13)$$

Οπότε

$$\cos \phi_1 = \cos \phi_2 \quad (2.14)$$

Η φασική απόκλιση μεταξύ έντασης και τάσης στο πρωτεύον είναι ίση με αυτή που προκύπτει από τον συντελεστή ισχύος του φορτίου του μετασχηματιστή. Τα δύο τυλίγματα ενός πραγματικού μετασχηματιστή έχουν συγκεκριμένη ωμική αντίσταση και δημιουργούν συγκεκριμένη ροή σκέδασης. Το αποτέλεσμα της ωμικής αντίστασης είναι η δημιουργία πτώσης τάσης, όταν ο μετασχηματιστής εργάζεται υπό φορτίο. Επομένως, η τάση U_2 υπό φορτίο δεν είναι ποτέ ίση με την τάση του δευτερεύοντος στο κενό. [2.3]

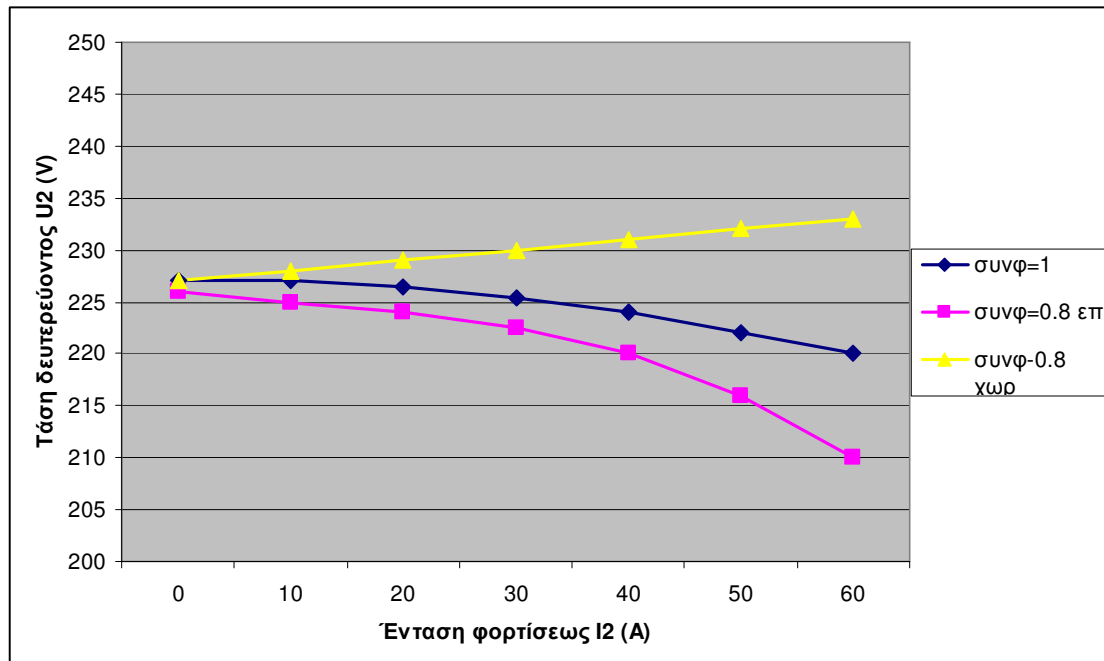
Η μεταβολή της τάσης του δευτερεύοντος, από την λειτουργία στο κενό μέχρι την λειτουργία στο ονομαστικό φορτίο, ονομάζεται διακύμανση τάσης και εκφράζεται ως επί τοις εκατό ποσοστό (%) της τάσης του δευτερεύοντος στο ονομαστικό φορτίο. Επειδή κατά την λειτουργία στο κενό, η τάση του δευτερεύοντος είναι ίση με την ηλεκτρεγερτική δύναμη, η διακύμανση τάσης θα ισούται με:

$$\varepsilon \% = \frac{E - U_{2N}}{U_{2N}} \cdot 100\% \quad (2.15)$$

Το μέγεθος της ε (%) ενός μετασχηματιστή είναι χαρακτηριστικό της ποιότητάς του και συνήθως δεν ξεπερνά το 5% για μετασχηματιστές μέσου και μεγάλου μεγέθους.

Χαρακτηριστική υπό φορτίο ενός μετασχηματιστή ονομάζεται η καμπύλη που δείχνει την μεταβολή της τάσης του δευτερεύοντος κυκλώματος, όταν μεταβάλλεται το φορτίο του και ενώ η τάση του πρωτεύοντος και ο συντελεστής ισχύος του φορτίου παραμένουν σταθεροί. Στο σχήμα 2.7 δίνονται οι χαρακτηριστικές υπό φορτίο ενός

μετασχηματιστή για τρεις διαφορετικούς συντελεστές ισχύος του φορτίου. Γενικά η τάση υπό φορτίο είναι μικρότερη της τάσης λειτουργίας στο κενό εκτός αν το φορτίο είναι πυκνωτή [2.3].



Σχήμα 2.7 - Χαρακτηριστικές μετασχηματιστή υπό φορτίο

2.3 Χαρακτηριστικά μετασχηματιστών

2.3.1 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά

2.3.1.1 Ονομαστική ισχύς (P_N)

Ονομαστική ισχύς ονομάζεται η φαινόμενη ισχύς, η οποία μπορεί να αποδοθεί συνεχώς στο δευτερεύον πηνίο υπό συγκεκριμένη ονομαστική τάση, χωρίς όμως να δημιουργείται κίνδυνος υπερθέρμανσης. Ορίζεται ως το γινόμενο της ονομαστικής τάσης επί την ονομαστική ένταση επί το συντελεστή φάσεων. Επομένως:

$$P_n = U_n \cdot I_n \cdot \sqrt{3} \quad (2.16)$$

Όπου P_n η ονομαστική ισχύς, U_n η ονομαστική τάση και I_n το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή.

2.3.1.2 Συχνότητα (f)

Η συχνότητα λειτουργίας των μετασχηματιστών είναι 50 Hz η 60 Hz, ανάλογα με την συχνότητα του δικτύου στο οποίο χρησιμοποιούνται. Το Ελληνικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικού ρεύματος λειτουργεί με την συχνότητα των 50 Hz.

2.3.1.3 Ονομαστική τάση τυλίγματος U_n

Η ονομαστική τάση εισόδου του πρωτεύοντος τυλίγματος είναι η τάση στην οποία έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί ο μετασχηματιστής και καθορίζει την βασική στάθμη μόνωσης του. Η βασική στάθμη μόνωσης είναι η τάση από την οποία υπολογίζεται η μόνωση του τυλίγματος. Το παραπάνω αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό ενός μετασχηματιστή, καθώς δείχνει την ικανότητα του να αντέχει τις υπερτάσεις που εμφανίζονται στο δίκτυο. Η ονομαστική τάση εξόδου του δευτερεύοντος τυλίγματος, είναι η τάση στους ακροδέκτες χωρίς φορτίο και υπό ονομαστική τάση εισόδου και ονομαστική συχνότητα.

2.3.1.4 Ονομαστική ένταση τυλίγματος (I_n)

Ονομαστική ένταση τυλίγματος ονομάζεται η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος που φθάνει σε έναν ακροδέκτη του τυλίγματος. Υπολογίζεται από την σχέση:

$$I_n = \frac{N}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad (2.17)$$

2.3.1.4 Σύνθετη αντίσταση (Z)

Σύνθετη αντίσταση ονομάζεται η συνολική αντίσταση που εμφανίζεται κατά την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, μέσα από τα τυλίγματα του μετασχηματιστή. Προκαλεί τις ηλεκτρικές απώλειες που εμφανίζονται κατά την λειτουργία του μετασχηματιστή. Συνήθως χρησιμοποιούνται τα επί της εκατό (%) μεγέθη. Εξ ορισμού, σύνθετη αντίσταση 100% αντιστοιχεί σε σύνθετη αντίσταση εκφρασμένη σε (Ω), ίση με:

$$\frac{V}{I_n} = \frac{U_n^2}{N} \quad (2.18)$$

Όπου V η φασική τάση

Επομένως, η επί τις εκατό σύνθετη αντίσταση (Z %) που αντιστοιχεί σε σύνθετη αντίσταση Z (Ω) ισούται με:

$$Z\% = Z \cdot \frac{N}{U_n^2} \cdot 100 \quad (2.19)$$

Σε απλοποιημένη μορφή, η σύνθετη αντίσταση συμβολίζεται με:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2.20)$$

Z = Σύνθετη αντίσταση [Ω (ohms)]

R = Ωμική αντίσταση [Ω (ohms)]

X = Επαγωγική αντίσταση [Ω (ohms)]

2.3.1.6 Τάση βραχυκύκλωσης ($U_{\beta\rho}$)

Η τάση βραχυκύκλωσης ονομάζεται η πολική τάση που όταν εφαρμόζεται στους ακροδέκτες του πρωτεύοντος τυλίγματος, προκαλεί την κυκλοφορία ρεύματος. Η ένταση του ρεύματος είναι ίση με την ονομαστική του τυλίγματος, όταν το δευτερεύον κύκλωμα είναι βραχυκυκλωμένο. Ο τύπος υπολογισμού της είναι:

$$U_{\beta\rho} = \sqrt{3} \cdot Z \cdot I_n \quad (2.21)$$

Αντίστοιχα, η τάση 100% αντιστοιχεί στην ονομαστική τάση του μετασχηματιστή (εκφρασμένη σε V) ισούται με:

$$U\% = \frac{U}{U_n^2} \cdot 100 \quad (2.22)$$

Άρα η τάση βραχυκύκλωσης δίνεται και από τον τύπο:

$$U_{\beta\rho}\% = \frac{\sqrt{3} \cdot Z \cdot I_n}{U_n} \cdot 100 = Z \cdot \frac{N}{U_n^2} \cdot 100 \quad (2.23)$$

Αξίζει να αναφερθεί ότι η τάση βραχυκύκλωσης είναι υπεύθυνη για την κατανομή των φορτίων κατά την παράλληλη σύνδεση μετασχηματιστών.

2.3.1.7 Απώλειες Κενού φορτίου

Οι απώλειες κενού φορτίου ή αλλιώς απώλειες σιδήρου, εμφανίζονται στο υλικό του πυρήνα, λόγω του φαινομένου της υστέρησης και των δινορρευμάτων. Στον πίνακα 2.1 δίνονται οι απώλειες κενού φορτίου των μετασχηματιστών διανομής, σύμφωνα με την προδιαγραφή CENELEC HD 428.1 S1/1992 [2.3]

Ονομαστική ισχύς (kVA)	Κατηγορία Α		Κατηγορία Β		Κατηγορία Γ		Τάση βραχυκύκλωσης (%)
	Απώλειες κενού Po (W)	Θόρυβος Lw (db)	Απώλειες κενού Po (W)	Θόρυβος Lw (db)	Απώλειες κενού Po (W)	Θόρυβος Lw (db)	
50	190	55	145	50	125	47	4
100	320	59	260	54	210	49	4
160	460	62	375	57	300	52	4
250	650	65	530	60	425	55	4
400	930	68	750	63	610	58	4
630	1300	70	1030	65	860	60	6
1000	1700	73	1400	68	1100	63	6
1600	2600	76	2200	71	1700	66	6
2500	3800	81	3200	76	2500	71	6

Πίνακας 2.1 - Κατηγορίες απωλειών κενού φορτίου

2.3.1.8 Απώλειες φορτίου

Οι απώλειες φορτίου ή αλλιώς απώλειες χαλκού, εμφανίζονται στα τυλίγματα, τους αγωγούς σύνδεσης και το δοχείο του μετασχηματιστή. Οι απώλειες αυτές δημιουργούνται λόγω του φαινομένου Joule, των δινορρευμάτων και σκέδασης της ροής. Στον πίνακα 2.2 δίνονται οι απώλειες φορτίου των μετασχηματιστών διανομής, σύμφωνα με την προδιαγραφή CENELEC HD 428.1 S1/1992 [2.3]

Ονομαστική ισχύς (kVA)	Κατηγορία Α	Κατηγορία Β	Κατηγορία Γ	Τάση βραχυκύκλωσης (%)
	Απώλειες κενού Po (W)	Απώλειες κενού Po (W)	Απώλειες κενού Po (W)	
50	1100	1350	875	4
100	1750	2150	1475	4
160	2350	3100	2000	4
250	3250	4200	2750	4
400	4600	6000	2850	4
630	6750	8700	5600	6
1000	10500	13000	9500	6
1600	17000	20000	14000	6
2500	26500	32000	22000	6

Πίνακας 2.2 - Κατηγορίες απωλειών φορτίου

2.3.1.9 Ομάδα Ζεύξης

Η ομάδα ζεύξης αναφέρεται στην μέθοδο με την οποία συνδέονται τα τριφασικά τυλίγματα που βρίσκονται στο πρωτεύον και δευτερεύον μέλος του μετασχηματιστή. Οι ομάδες ζεύξης είναι τυποποιημένες και είναι οι παρακάτω:

- Συνδεσμολογία τριγώνου
- Συνδεσμολογία αστέρα
- Συνδεσμολογία τεθλασμένου αστέρα

2.3.1.10 Βαθμός απόδοσης

Βαθμός απόδοσης ονομάζεται ο λόγος της πραγματικής ισχύς που αποδίδεται στο φορτίο του δευτερεύοντος τυλίγματος προς την πραγματική ισχύ που απορροφά το πρωτεύον τύλιγμα, όταν αυτό τροφοδοτείται από την ονομαστική τάση (U_n).

Η ισχύς στις ηλεκτρικές μηχανές συνήθως μετριέται σε kilowatt (kW). Οι κατασκευαστές των μετασχηματιστών χρησιμοποιούν συχνά ως μονάδα ισχύος το kilovoltampere (kVA). Για την μετατροπή των kilovoltampere σε kilowatt χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$\text{Ισχύς μετασχηματιστή (kW)} = (\text{kVA}) (\cos\phi) \quad (2.24)$$

που ϕ είναι ο συντελεστής ισχύος.

Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται το τρίγωνο ισχύος όπου εμφανίζεται η σχέση μεταξύ kilovoltamperes και kilowatts. Σύμφωνα με αυτή, το $\cos\phi$ ή συντελεστής ισχύος είναι kW / kVA.

Άρα η απόδοση των μετασχηματιστών υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\text{Απόδοση} = \frac{\text{Ισχύς Εισόδου kVA}}{\text{Ισχύς Εξόδου kVA}} = \frac{S \cos\phi}{S \cos\phi + \text{απώλειες}} \quad (2.25)$$

Όπου

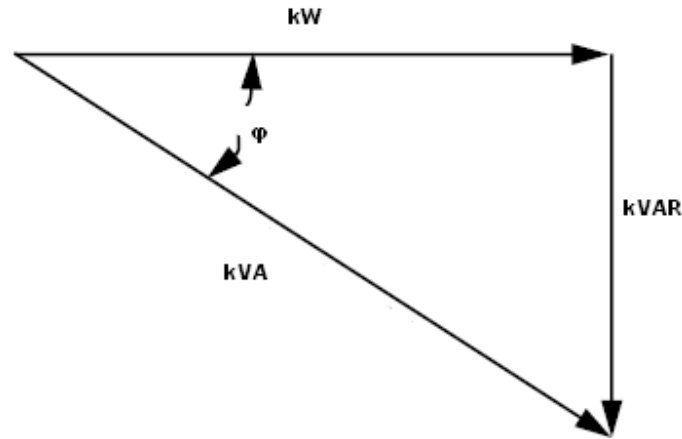
$S = \text{kVA}$ φορτίο μετασχηματιστή

απώλειες = απώλειες κενού φορτίου + απώλειες φορτίου $\times (S / S_B)^2$

$S_B = \text{kVA}$ ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή

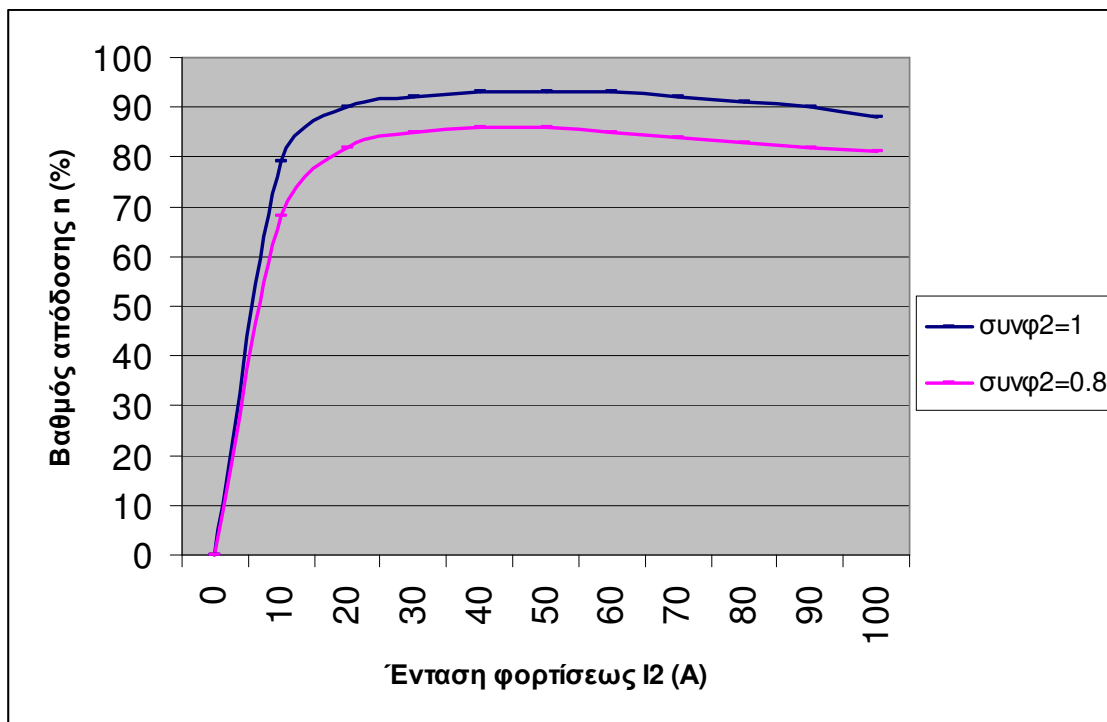
Ο συντελεστής απόδοσης λαμβάνει τιμές πάντα μικρότερες από την μονάδα. Η ισχύς εξόδου είναι μικρότερη από την ισχύ εισόδου, καθώς ένα μέρος την ενέργειας χάνεται λόγω των απωλειών. Ο μετασχηματιστής δεν διαθέτει κινούμενα μέρη, άρα δεν υπάρχουν μηχανικές απώλειες. Οι μοναδικές απώλειες που εμφανίζονται είναι

ηλεκτρικές, δηλαδή οι απώλειες κενού και οι απώλειες μη κενού φορτίου. Οι ηλεκτρικές απώλειες είναι υπεύθυνες για την μετατροπή ενός μέρους της ενέργειας σε θερμότητα.



Σχήμα 2.8 - Τρίγωνο ισχύος

Στο σχήμα 2.9 παρουσιάζεται η μεταβολή του βαθμού απόδοσης ενός μετασχηματιστή, όταν μεταβάλλεται η ένταση φορτίου του δευτερεύοντος τυλίγματος και έχοντας σταθερό τον συντελεστή ισχύος. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο μέγιστος βαθμός απόδοσης βρίσκεται κοντά στο ονομαστικό φορτίο του μετασχηματιστή.[2.2]



Σχήμα 2.9 - Μεταβολή βαθμού απόδοσης

2.3.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά μετασχηματιστών

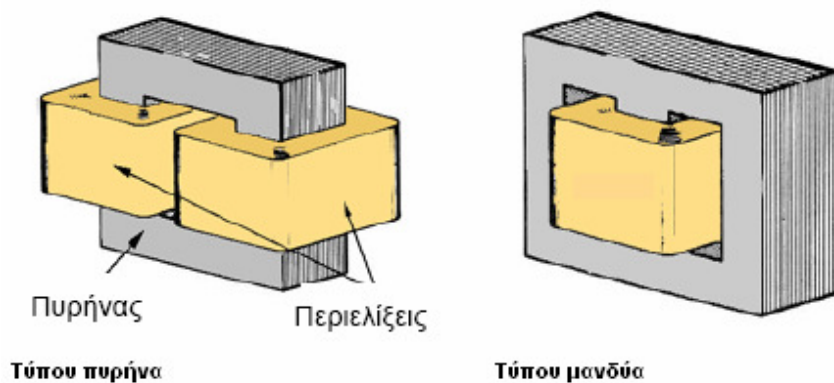
2.3.2.1 Πυρήνας

Ο πυρήνας αποτελεί το κύριο μέρος ενός μετασχηματιστή και μαζί με τα πηνία (τυλίγματα) αποτελούν το ενεργό του μέρος. Πάνω στον πυρήνα βρίσκονται δυο τυλίγματα, χάρη στα οποία πραγματοποιείται η μεταβολή της τάσης.

Ο σίδηρος είναι το περισσότερο διαδεδομένο υλικό για την κατασκευή πυρήνων. Ο πυρήνας από σίδηρο είναι καλός στην μεταφορά ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, λόγω της μοριακής δομής του. Για καλύτερη απόδοση του πυρήνα χρησιμοποιείται μαλακός σίδηρος. Η μοριακή δομή του μαλακού σιδήρου μαγνητίζεται λιγότερο με την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου. Για τον παραπάνω λόγο, απαιτείται λιγότερη ενέργεια για τον μαγνητισμό του. Ο πυρήνας σιδήρου υπόκειται σε δυο τύπους απωλειών: στις απώλειες υστέρησης και στις απώλειες δινορευμάτων. Οι απώλειες υστέρησης οφείλονται στην τριβή που προκαλείται από την μοριακή αντίσταση του υλικού κατά την διαδικασία της μαγνήτισης και της απομαγνήτισης του. Οι απώλειες δινορευμάτων οφείλονται στα επαγωγικά ρεύματα που κυκλοφορούν μέσα στο υλικό του πυρήνα και η εικόνα τους μοιάζει με τις δίνες που δημιουργούνται στο νερό. Οι απώλειες του πυρήνα είναι σταθερές και πολλές φορές αναφέρονται και ως απώλειες κενού φορτίου, διότι συμβαίνουν στον πυρήνα του μετασχηματιστή ανεξάρτητα από το φορτίο στον μετασχηματιστή [2.4].

Επίσης, υπάρχει και πυρήνας αποτελούμενος από αέρα. Ο πυρήνας από αέρα είναι απαλλαγμένος από τις απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων, όμως λόγω της μειωμένης ικανότητας μεταφοράς ηλεκτρομαγνητικής ροής του αέρα, καθιστά τους μετασχηματιστές αυτού του είδους αναποτελεσματικούς.

Ακόμη, μπορούν να διακριθούν οι πυρήνες ανάλογα με την μέθοδο σύνδεσης των πηνίων σε αυτούς. Στον πρώτο τύπο, τα πηνία περιβάλλουν τον πυρήνα, ενώ στον δεύτερο τύπο τα πηνία τοποθετούνται στο μεσαίο στέλεχος και περιβάλλονται από τα δυο εξωτερικά στελέχη. Στο σχήμα 2.9 εμφανίζονται τα δύο είδη πυρήνα.



Σχήμα 2.10 – Τα δύο είδη πυρήνα

2.3.2.2 Πηνίο (τύλιγμα)

Στο εσωτερικού ενός μετασχηματιστή, διακρίνονται δυο ειδών πηνίων ή αλλιώς τυλιγμάτων. Το τύλιγμα υψηλής τάσης αποτελείται από πολλές σπείρες μονωμένου χάλκινου αγωγού κυκλικής διατομής. Το τύλιγμα χαμηλής τάσης κατασκευάζεται συνήθως από αγωγό ορθογωνικής ή τετραγωνικής διατομής μονωμένο με χαρτί ή βαμβάκι, έχει μικρότερο αριθμό σπειρών από το τύλιγμα υψηλής τάσης και μεγαλύτερη διατομή. Και τα δύο τυλίγματα είναι πολύ καλά μονωμένα μεταξύ τους.

Στην περίπτωση των μετασχηματισμών υποβιβασμού τάσης, το τύλιγμα υψηλής τάσης συνδέεται με την πηγή της ηλεκτρικής ενέργειας και από το τύλιγμα χαμηλής τάσης τροφοδοτούνται οι καταναλωτές. Τότε, το τύλιγμα υψηλής τάσης ονομάζεται πρωτεύον τύλιγμα ή απλά πρωτεύον και το τύλιγμα χαμηλής τάσης ονομάζεται δευτερεύον τύλιγμα ή δευτερεύον. Στην περίπτωση των μετασχηματιστών ανύψωσης, συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο. Δηλαδή το τύλιγμα χαμηλής τάσης γίνεται πρωτεύον και το τύλιγμα υψηλής τάσης δευτερεύον.[2.2]

Οι αγωγοί που δημιουργούν το πηνίο πρέπει να είναι καλά μονωμένοι μεταξύ τους, ώστε να αναγκάζεται το ρεύμα να ακολουθεί ολόκληρη την διαδρομή του πηνίου. Οι απώλειες σε ένα πηνίο συχνά αναφέρονται και ως απώλειες I^2R . Επίσης αναφέρονται και ως απώλειες φορτίου, εμφανίζονται στο πρωτεύον και στο δευτερεύον πηνίο. Οι απώλειες αυτές δεν είναι σταθερές και εξαρτώνται από το φορτίο που εφαρμόζεται στον μετασχηματιστή.

2.3.2.3 Σύστημα ψύξης

Το σύστημα ψύξης των μετασχηματιστών, αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που αφορούν την σωστή λειτουργία του. Λόγω της σύνθετης αντίστασης στο εσωτερικό μέρος των μετασχηματιστών, ένα μέρος της προσφερόμενης ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα. Με την χρήση κατάλληλων ψυκτικών μέσων, επιδιώκεται η ομαλή και ικανοποιητική διάχυση της θερμότητας στο περιβάλλον, έχοντας ως στόχο την αποφυγή αστοχιών στα εξαρτήματα του μετασχηματιστή. Επίσης, με την αύξηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό του μετασχηματιστή, παρουσιάζεται μείωση της απόδοσης του. Οι περισσότεροι μετασχηματιστές είναι κατασκευασμένοι ώστε να μπορούν να λειτουργούν χωρίς πρόβλημα σε θερμοκρασίες μέχρι και 55°C πάνω από την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έχοντας υπόψη την ζωτική σημασία των μετασχηματιστών κατά την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, γίνεται αντιληπτό ότι η μείωση της απόδοσης των μετασχηματιστών επηρεάζει αρνητικά σε πολύ μεγάλο βαθμό το υπόλοιπο δίκτυο διανομής [2.4-2.5].

Το σύστημα ψύξης που εγκαθίσταται στους μετασχηματιστές, οφείλει να ψύχει ικανοποιητικό τον πυρήνα και τα πηνία. Τα πιο διαδεδομένα μέσα επαγωγής της θερμότητας είναι η ψύξη με την βοήθεια του αέρα και η ψύξη με την βοήθεια ειδικού

μονωτικού ορυκτέλαιου (λαδιού). Στην πρώτη περίπτωση ονομάζονται ξηροί μετασχηματιστές, ενώ στην δεύτερη περίπτωση μετασχηματιστές λαδιού.

2.3.2.3.1 Ξηροί μετασχηματιστές

Με φυσική ψύξη

Στους ξηρούς μετασχηματιστές φυσικής ψύξης, η εξωτερική επιφάνεια του ενεργού μέρους είναι κατασκευασμένη από ελάσματα μεγάλου εμβαδού. Η επιφάνεια έρχεται σε επαφή με τον αέρα και η θερμότητα αποβάλλεται στο περιβάλλον. Η μέθοδος φυσικής ψύξης κρίνεται ικανοποιητική σε μετασχηματιστές μικρής ισχύος, δηλαδή σε μετασχηματιστές με μέγιστη ισχύς 25 kVA [2.2].

Με εξαναγκασμένη κυκλοφορία

Ο μετασχηματιστής με εξαναγκασμένη κυκλοφορία αέρα βρίσκεται μέσα σε κλειστό περίβλημα. Στο εσωτερικό του έχουν τοποθετηθεί κανάλια και με την χρήση ανεμιστήρων δημιουργείται ροή αέρα. Η ροή διοχετεύει φρέσκο αέρα από το εξωτερικό περιβάλλον, ο οποίος ψύχει τον πυρήνα και απομακρύνει τον θερμό αέρα προς τα έξω. Η ενέργεια που καταναλώνεται από τους ανεμιστήρες συνυπολογίζεται στις απώλειες του μετασχηματιστή.



Σχήμα 2.11 - Μετασχηματιστής ξηρού τύπου

2.3.2.3.2 Μετασχηματιστές λαδιού

Με φυσική κυκλοφορία λαδιού

Σε αυτούς τους μετασχηματιστές, το ψυκτικό μέσο που χρησιμοποιείται είναι το λάδι. Η φυσική κυκλοφορία του λαδιού απομακρύνει μέρος της αναπτυσσόμενης θερμότητας του ενεργού τμήματος προς τα τοιχώματα του λέβητα και από εκεί στον

εξωτερικό αέρα. Η αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης της θερμότητας μπορεί να επιτευχθεί με σωλήνες, περύγια ή σώματα ψύξης μεταξύ των πλευρών του λέβητα. Για μετασχηματιστές ισχύος μεγαλύτερης των 10MVA, μπορεί να βελτιωθεί η ψύξη με την χρήση ανεμιστήρα.[2.2][2.5]

Με εξαναγκασμένη κυκλοφορία λαδιού

Αυτή η μέθοδος ψύξης χρησιμοποιείται σε μετασχηματιστές ισχύος μεγαλύτερης από 50MVA. Με την χρήση αντλιών, μεταφέρεται το λάδι οδηγούμενο μέσα από σωλήνες στο εσωτερικό του μετασχηματιστή, όπου επάγει θερμότητα από τον πυρήνα και τα πηνία. Στην συνέχεια μεταφέρεται προς το ψυγείο όπου ψύχεται. Έπειτα, συνεχίζεται η επανακυκλοφορία του λαδιού προς το εσωτερικό του μετασχηματιστή.[2.2]



Σχήμα 2.12 - Μετασχηματιστής λαδιού

2.3.2.4 Μονωτήρας διέλευσης

Οι μονωτήρες διέλευσης είναι σχεδιασμένοι ώστε να πραγματοποιούν την σύνδεση του δικτύου παροχής ηλεκτρικής ενέργειας με το εσωτερικό του μετασχηματιστή. Για την παραπάνω επίτευξη, χρησιμοποιείται ένας μεταλλικός αγωγός, ο οποίος περιβάλλεται από κεραμικό μονωτικό κάλυμμα. Το κεραμικό κάλυμμα εμποδίζει την δημιουργία ηλεκτρικού τόξου με το δοχείο του μετασχηματιστή. Η τιμή της εφαρμοσμένης τάσης επηρεάζει το μήκος του μονωτήρα, ενώ η τιμή του ρεύματος επηρεάζει τη διάμετρο του εσωτερικού αγωγού του μονωτήρα. Η επιρροή τους στην απόδοση του μετασχηματιστή είναι ασήμαντη.

2.3.2.5 Μονωτικό μέσο

Το μονωτικό μέσο βοηθά στην αποφυγή διαρροής ηλεκτρικού φορτίου και θερμότητας ανάμεσα στα διάφορα εξαρτήματα του μετασχηματιστή. Τα τυλίγματα, αφού τοποθετηθούν στους πυρήνες, διαποτίζονται με βερνίκι και ξηραίνονται σε ειδικούς κλιβάνους. Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται καλύτερη μόνωση και δυσκαμψία που μειώνει τις δονήσεις κατά την λειτουργία του. Η μόνωση μεταξύ των τυλιγμάτων συνδέσεων,

όπως και των ακροδεκτών χαμηλής τάσης, δεν παρουσιάζει δυσκολίες. Οι συνδέσεις των τυλιγμάτων υψηλής τάσης τοποθετούνται μέσα σε μονωτικούς κυλίνδρους από βακελίτη, τα άκρα των τυλιγμάτων στηρίζονται σε μονωτήρες πορσελάνης και αποτελούν τους ακροδέκτες υψηλής τάσης του μετασχηματιστή.

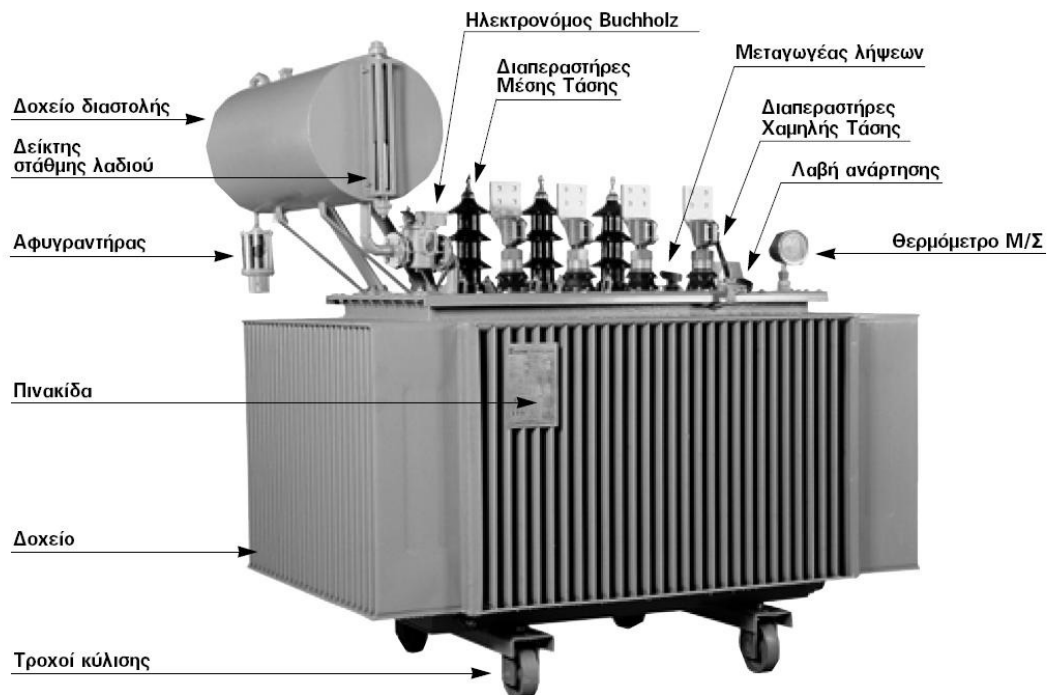
2.4 Εξαρτήματα μετασχηματιστή

- **Δοχείο μετασχηματιστή:** Το δοχείο του μετασχηματιστή αποτελείται από τον πυθμένα, τη στεφάνη και τα πλευρικά τοιχώματα. Τα πλευρικά τοιχώματα του δοχείου κατασκευάζονται από ελάσματα, τα οποία τοποθετούνται έχοντας ως στόχο την αύξηση της επιφάνειας, η οποία συμβάλλει στην αποτελεσματικότερη ψύξη. Το δοχείο των μετασχηματιστών κλειστού τύπου (χωρίς δοχείο διαστολής) γεμίζει με 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 την λειτουργία του μετασχηματιστή. Στο δοχείο τοποθετούνται δύο αφαλοί γείωσης. Στον πυθμένα του δοχείου είναι συγκολλημένο το σύστημα κύλισης με τροχούς ή βάση έδρασης.
- **Κάλυμμα μετασχηματιστή:** Πάνω στο κάλυμμα υπάρχουν δύο λαβές ανάρτησης που χρησιμοποιούνται για την ανύψωση και τη μεταφορά του μετασχηματιστή. Στο κάλυμμα τοποθετείται θήκη θερμομέτρου και το θερμόμετρο δυο ηλεκτρικών επαφών. Επίσης στο κάλυμμα μπαίνει ένας αφαλός γείωσης. Στους μετασχηματιστές κλειστού τύπου τοποθετείται συνήθως ανακουφιστική βαλβίδα.
- **Λαβές ανάρτησης:** Οι λαβές ανάρτησης χρησιμεύουν για την ανύψωση και τη μεταφορά του μετασχηματιστή.
- **Τροχοί κύλισης:** Οι μετασχηματιστές διανομής μέχρι 160 kVA είναι κατασκευασμένοι έτσι ώστε να τοποθετούνται στο εναέριο δίκτυο διανομής και τοποθετούνται πάνω σε έναν ή δυο στύλους. Στους μετασχηματιστές αυτούς δεν υπάρχουν εγκαταστημένοι τροχοί. Στους μετασχηματιστές μεγαλύτερων των 160 kVA τοποθετούνται τροχοί ώστε να πραγματοποιείται με ευκολία η μετακίνηση τους.
- **Βαλβίδα εκκένωσης και δειγματοληψίας λαδιού:** Στο κάτω μέρος ενός πλευρικού τοιχώματος του δοχείου του μετασχηματιστή τοποθετείται η βαλβίδα εξαγωγής λαδιού, η οποία επιτρέπει τη δειγματοληψία για τον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής του λαδιού.
- **Σύνδεσμος γείωσης ουδετέρου:** Ο σύνδεσμος αυτός εξασφαλίζει τη γείωση του ουδετέρου κόμβου του τριφασικού τυλίγματος με το δοχείο του μετασχηματιστή.

- **Διαπεραστήρες:** Διαπεραστήρες ή μονωτήρες διέλευσης κατασκευάζονται συνήθως από πορσελάνη και συνδέουν τον μετασχηματιστή με το σύστημα διανομής ή μεταφοράς.
- **Μεταγωγέας λήψεων:** Η εφαρμοζόμενη τάση στο πρωτεύον του μετασχηματιστή δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από τη θέση του μετασχηματιστή στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιείται ο μεταγωγέας λήψεων, έτσι ώστε με δεδομένη την εφαρμοζόμενη τάση στο πρωτεύον, να διατηρείται όσο το δυνατόν σταθερή η τάση στο δευτερεύον. Ο μεταγωγέας λήψεων τοποθετείται στο δοχείο του μετασχηματιστή με το χειριστήριο του πάνω στο κάλυμμα. Ο χειρισμός του μεταγωγέα γίνεται μόνο όταν ο μετασχηματιστής βρίσκεται εκτός τάσης. Οι θέσεις των λήψεων αναγράφονται στην πινακίδα του μετασχηματιστή.
- **Μεταγωγέας τάσεων:** Ο μεταγωγέας τάσεων χρησιμοποιείται για την αλλαγή της τάσης λειτουργίας του μετασχηματιστή από μια τάση σε μια άλλη (π.χ. από 15kV σε 20 kV και αντίστροφα), ανάλογα με την τάση του δικτύου.
- **Θερμόμετρο μετασχηματιστή:** Το θερμικό στοιχείο του θερμομέτρου είναι τοποθετημένο στο πιο ψηλό στρώμα του λαδιού, έτσι ώστε να μετράει τη μέγιστη θερμοκρασία του λαδιού. Οι ηλεκτρικές επαφές του θερμομέτρου ρυθμίζονται στις επιθυμητές θερμοκρασίες και συνδέονται στο κύκλωμα προστασίας για συναγερμό (alarm) και για διακοπή (trip) του κυκλώματος, όταν γίνει υπέρβαση των αντίστοιχων ορίων των θερμοκρασιών αυτών.
- **Δοχείο διαστολής:** Το δοχείο διαστολής δέχεται την αυξομείωση του όγκου του λαδιού, όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία του λαδιού του μετασχηματιστή.
- **Ηλεκτρονόμος Buchholz:** Η προστασία των μετασχηματιστών λαδιού από εσωτερικά σφάλματα, τα οποία προκαλούν ανάπτυξη αερίων ή έντονη ροή λαδιού, γίνεται με τον ηλεκτρονόμο Buchholz. Ο ηλεκτρονόμος τοποθετείται μεταξύ του δοχείου του μετασχηματιστή και του δοχείου διαστολής. Στην περίπτωση σχηματισμού φυσαλίδων (ως αποτέλεσμα εσωτερικής βλάβης) ή έλλειψης λαδιού, μετακινείται προς τα κάτω ο πρώτος πλωτήρας και ενεργοποιείται η επαφή συναγερμού, ενώ όταν τα αέρια που εκλύονται είναι αρκετά (δηλαδή η εσωτερική βλάβη είναι σημαντική) μετακινείται προς τα κάτω ο δεύτερος πλωτήρας και ενεργοποιείται η επαφή διακοπής. Επίσης, πραγματοποιείται διακοπή εφόσον δημιουργηθεί έντονη ροή λαδιού προς το δοχείο διαστολής μετά από βραχυκύκλωμα ή εσωτερική βλάβη. Επίσης, ο ηλεκτρονόμος Buchholz παρέχει προστασία από διαρροή λαδιού.
- **Αφρυγαντήρας:** Ο αφρυγαντήρας τοποθετείται πάνω στο δοχείο διαστολής. Μέσα από τον αφρυγαντήρα περνά ο αέρας από και προς το δοχείο διαστολής του μετασχηματιστή λόγω της συστολής και διαστολής του όγκου του λαδιού. Περιέχει κρυστάλλους SiO_2 οι οποίοι απορροφούν την υγρασία του αέρα. Η ένδειξη μπλε χρώματος σημαίνει ότι είναι πλήρως ξηρό, γαλάζιο χρώμα σημαίνει ότι είναι

μερικώς υγρό, ενώ το ροζ χρώμα δηλώνει ότι είναι κορεσμένο από υγρασία και πρέπει είτε να ξηραθεί είτε να αντικαταστεί.

- **Πώμα πλήρωσης:** Από το πώμα πλήρωσης γίνεται η συμπλήρωση του μετασχηματιστή με μονωτικό λάδι.
- **Δείκτης στάθμης λαδιού:** Στους μετασχηματιστές κλειστού τύπου (χωρίς δοχείο διαστολής), ο δείκτης στάθμης λαδιού (ελαιοδείκτης) είναι τοποθετημένος στο πλευρικό τοίχωμα ή στο κάλυμμα του μετασχηματιστή. Σε μετασχηματιστές με δοχείο διαστολής τοποθετείται σε αυτό ένας ελαιοδείκτης σωληνωτού τύπου ή μαγνητικού τύπου.
- **Πινακίδα μετασχηματιστή:** Στην πινακίδα του μετασχηματιστή αναγράφονται όλα τα στοιχεία που ορίζουν οι διεθνείς προδιαγραφές: τύπος, ισχύς σε kVA, φάσεις, συχνότητα, τάση βραχυκύκλωσης, ζεύξη, είδος ψύξης, υλικό τυλιγμάτων, αριθμός σειράς, έτος κατασκευής, βάρος πυρήνα και τυλιγμάτων, βάρος λαδιού, ολικό βάρος, μέγιστη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ανύψωση θερμοκρασίας τυλίγματος, ανύψωση θερμοκρασίας λαδιού, ονομαστική τάση πρωτεύοντος, ονομαστική τάση δευτερεύοντος, ονομαστική ένταση πρωτεύοντος, ονομαστική ένταση δευτερεύοντος, απώλειες κενού φορτίου, απώλειες φορτίου, θέσεις του μεταγωγέα λήψεων και θέσεις του μεταγωγέα τάσεων (εφόσον υπάρχει).
- **Αφαλός γείωσης δοχείου:** Στο δοχείο του μετασχηματιστή και πιο συγκεκριμένα κοντά στον πυθμένα, τοποθετούνται δυο αφαλοί γείωσης αντιδιαμετρικά μεταξύ τους, έτσι ώστε να παρέχεται η δυνατότητα γείωσης του δοχείου.



Σχήμα 2.13 - Εξαρτήματα μετασχηματιστών

2.5 Συνθήκες λειτουργίας μετασχηματιστών

2.5.1 Υπερφόρτιση

Η ονομαστική φόρτιση καθορίζει το θεωρητικό μέγιστο φορτίο που μπορεί να διατεθεί στον μετασχηματιστή χωρίς να επηρεάσει αρνητικά την λειτουργία του. Οι μετασχηματιστές είναι κατασκευασμένοι ώστε να μπορούν να διαχειριστούν φορτία μεγαλύτερα από την ονομαστική τους τιμή. Η υπερφόρτωση εξαρτάται από το προηγούμενο φορτίο και την θερμοκρασία λαδιού στην έναρξη της υπερφόρτωσης. Η υπερφόρτωση επιτρέπεται να πραγματοποιηθεί για μια συγκεκριμένη χρονική διάρκεια, ανάλογα με τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ο πίνακας 2.3 δίνει την επιτρεπόμενη διάρκεια και το μέγεθος υπερφόρτισης, σε σχέση με την προηγούμενη φόρτιση και την θερμοκρασία λαδιού. [2.2]

Προηγούμενη διαρκής φόρτιση (% της ονομαστικής ισχύος)	Θερμοκρασία εξόδου λαδιού (°C)	Χρόνος υπερφόρτισης (min) για συγκεκριμένη υπερφόρτιση (% της ονομαστικής ισχύος)				
		10% min	20% min	30% min	40% min	50% min
50	55	180	90	60	30	15
75	68	120	60	30	15	8
90	78	60	30	15	8	4

Πίνακας 2.3 - Επιτρεπόμενη διάρκεια και μέγεθος υπερφόρτισης

2.5.2 Παραλληλισμός μετασχηματιστών

Η παράλληλη σύνδεση δύο ή περισσότερων μετασχηματιστών είναι εφικτή, όταν τηρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις [2.2]:

- Η σχέση ισχύος των μετασχηματιστών πρέπει να είναι μικρότερη από 3 : 1
- Οι ονομαστικοί λόγοι μετασχηματισμού πρέπει να είναι ίσοι. (εντός ορισμένων ανοχών)
- Οι τάσεις βραχυκύκλωσης των μετασχηματιστών οφείλουν να είναι ίσες. (εντός ορισμένων ανοχών)
- Οι μετασχηματιστές πρέπει να χρησιμοποιούν τις ίδιες συνδεσμολογίες και η σύνδεση να πραγματοποιείται με ανάλογους ακροδέκτες.

Εάν οι μετασχηματιστές που παραλληλίζονται έχουν ίδιο λόγο μετασχηματισμού, αλλά διαφορετικές τάσεις βραχυκύκλωσης, η κατανομή του φορτίου γίνεται με τρόπο ώστε για κάθε μετασχηματιστή να προκύψει μερικό φορτίο για το οποίο η τάση βραχυκύκλωσης γίνεται ίση για όλους. Δεν πρέπει να υπάρχει υπερφόρτωση των

παράλληλων μετασχηματιστών, δηλαδή εκείνος με την μικρότερη τάση βραχυκύκλωσης πρέπει να λειτουργεί το πολύ με το ονομαστικό φορτίο.

Η κατανομή φορτίου δίνεται από την σχέση:

$$P_i = P_{ni} \frac{U_{K\min}}{U_{Ki}} \quad (2.26)$$

όπου

P_i το φορτίο που κατανέμεται στον i μετασχηματιστή, P_{ni} η ονομαστική ισχύς του i μετασχηματιστή, U_{Ki} η ονομαστική τάση βραχυκύκλωσης του i μετασχηματιστή, $U_{K\min}$ η μικρότερη ονομαστική τάση βραχυκύκλωσης των n παραλληλισμένων μετασχηματιστών.

Τελικά, η συνολική ισχύς των παραλληλισμένων μετασχηματιστών είναι ίση με:

$$\sum_{i=1}^n (P_i) \frac{U_{K\min}}{U_{Ki}} < \sum_{i=1}^n P_i \quad (2.27)$$

2.6 Βιβλιογραφία

- [2.1] Φ. Π. Τοπαλής, Κ. Μπουρούσης, «Εξοικονόμηση ενέργειας στους μετασχηματιστές διανομής». Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [2.2] Schneider Electric, «Τεχνικό Τετράδιο Νο.2 – Μετασχηματιστές Διανομής Λαδιού ΕΛΒΗΜ – Χρήση και Συντήρηση».
- [2.3] Τμήμα Βιομηχανικής παραγωγής ΤΕΙ Καβάλας, Σημειώσεις μαθήματος «Βιομηχανικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας», Κεφάλαιο 3 σελ 39-55.
- [2.4] Barry W. Kennedy, “Energy Efficient Transformers”, McGraw-Hill, New York, 1998.
- [2.5] NEMA Standars Publication TP 1-2002, «Guide for Determining Energy Efficiency for Distributions Transformers», National Electrical Manufactures Association.

Κεφάλαιο 3 – Απώλειες μετασχηματιστών και κόστος απωλειών

3.1 Απώλειες μετασχηματιστών

Οι μετασχηματιστές, όπως κάθε μηχανή, παρουσιάζουν απώλειες κατά την λειτουργία τους. Η απόδοση των μετασχηματιστών διανομής υπερβαίνει το 95%, ενώ στις περιπτώσεις των μετασχηματιστών υψηλής απόδοσης ξεπερνά το 98%. Οι απώλειες των μετασχηματιστών κατηγοριοποιούνται σε δυο είδη. Το πρώτο είδος απωλειών ονομάζεται «απώλειες κενού φορτίου» και προσδιορίζει τις απώλειες που παρουσιάζονται στον πυρήνα του μετασχηματιστή συνεχώς και ανεξάρτητα από τον χρόνο. Το δεύτερο είδος ονομάζεται «απώλειες φορτίου» και αναφέρεται στις απώλειες που εμφανίζονται στα τυλίγματα του μετασχηματιστή και εξαρτώνται από το φορτίο που εφαρμόζεται στον μετασχηματιστή.

3.1.1 Απώλειες κενού φορτίου

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι απώλειες κενού φορτίου εμφανίζονται στον πυρήνα του μετασχηματιστή και είναι ανεξάρτητες του φορτίου. Παρουσιάζονται από την στιγμή που εφαρμόζεται τάση στο πρωτεύον κύκλωμα του μετασχηματιστή και είναι ανεξάρτητες από την κατάσταση του δευτερεύοντος κυκλώματος (ανοικτό ή κλειστό). Επομένως, οι απώλειες κενού φορτίου υπολογίζονται με την εγκατάσταση ενός μετασχηματιστή στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικού ρεύματος.

Ο πυρήνας των μετασχηματιστών αποτελείται από ελάσματα σιδηρομαγνητικού υλικού, τα οποία βρίσκονται μονωμένα μεταξύ τους. Το κύριο συστατικό των ελασμάτων είναι ο σίδηρος, καθώς έχει μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα. Επίσης, χρησιμοποιείται κράμα πυριτίου.

Οι απώλειες κενού φορτίου διαιρούνται σε πέντε κατηγορίες.

- 1) Απώλειες υστέρησης
- 2) Απώλειες δινορευμάτων
- 3) Ηλεκτρικές απώλειες $I^2 R$
- 4) Σποραδικές απώλειες δινορευμάτων στον πυρήνα
- 5) Διηλεκτρικές απώλειες

Οι απώλειες υστέρησης και οι απώλειες δινορευμάτων αποτελούν το 99% των απωλειών κενού φορτίου, με τις απώλειες υστέρησης να καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος. Οι τιμές των υπόλοιπων απωλειών είναι πολύ μικρές και δεν επηρεάζουν την συνολική απώλεια. [3.1]

3.1.1.1 Απώλειες υστέρησης

Οι απώλειες υστέρησης εμφανίζονται στα ελάσματα του πυρήνα, όταν βρίσκεται μέσα σε εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Προκαλούνται από την αντίσταση της μοριακής δομής του σιδηρομαγνητικού υλικού στον μαγνητισμό και απομαγνητισμό. Η αντίσταση αυτή οφείλεται στην τάση των σιδηρομαγνητικών υλικών να διατηρούν σταθερό κάποιο επίπεδο μαγνήτισης κατά την εφαρμογή ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Δηλαδή, προκαλείται τριβή ανάμεσα στα μόρια του υλικού και αναπτύσσεται θερμότητα.

Με την αύξηση του μαγνητικού πεδίου, τα σιδηρομαγνητικά υλικά φτάνουν στο σημείο ώστε σχεδόν όλες οι μαγνητικές τους ροπές βρίσκονται προσανατολισμένες παράλληλα με αυτό. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται μαγνήτιση κόρου και όσο το σύστημα βρίσκεται σε αυτήν την κατάσταση, κάθε περαιτέρω αύξηση του εξωτερικού πεδίου δεν επιφέρει καμία αύξηση στη μαγνήτιση ή στο πρόσθετο πεδίο που δημιουργείται [3.2]. Καθώς προσεγγίζεται η κατάσταση κόρου, η μαγνήτιση παύει να είναι ανάλογη του εξωτερικού πεδίου (δηλαδή του πεδίου που δημιουργείται από τα εξωτερικά ρεύματα). Εάν το εξωτερικό πεδίο μηδενιστεί, η μαγνήτιση του σιδηρομαγνητικού υλικού δεν μηδενίζεται. Για να απαλλαχθεί το υλικό από τη μαγνήτιση, πρέπει να εφαρμοστεί ένα μαγνητικό πεδίο προς την αντίθετη κατεύθυνση [3.3].

Η παραπάνω συμπεριφορά ονομάζεται υστέρηση. Η διαδικασία μαγνήτισης και απομαγνήτισης υλικού που παρουσιάζουν υστέρηση, καταναλώνουν ενέργεια και προκαλούν αύξηση θερμοκρασίας. Έχοντας ως στόχο την μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας, χρησιμοποιείται μαλακός σίδηρος, δηλαδή υλικό που διαθέτει υψηλή διαπερατότητα χωρίς να αναπτύσσεται ιδιαίτερα το φαινόμενο της υστέρησης [3.4].

Οι απώλειες υστέρησης αποτελούν το 50-80% των συνολικών απωλειών κενού φορτίου. Για να επιτευχθεί μείωση των απωλειών, χρησιμοποιείται μεγαλύτερος πυρήνας ή πυρήνας διαφορετικού σιδηρομαγνητικού υλικού. Αυξάνοντας το μέγεθος του πυρήνα προκαλείται μείωση του μαγνητικού πεδίου, με αποτέλεσμα να μειώνονται και οι απώλειες κενού φορτίου. Η μέθοδος αυτή δεν είναι ωφέλιμη, καθώς η χρήση μεγαλύτερου πυρήνα συνεπάγεται αύξηση του μεγέθους, του όγκου και του βάρους του μετασχηματιστή, προκαλώντας αύξηση του κόστους κατασκευής. Συνήθως χρησιμοποιείται σίδηρος με διαφορετική περιεκτικότητα σε πυρίτιο, καθώς μειώνει την αντίσταση των μορίων κατά την απομαγνητοποίηση τους. Επίσης, χρησιμοποιείται και άμορφος σίδηρος λόγω του τυχαίου προσανατολισμού των μορίων του, γεγονός το οποίο προκαλεί σημαντική μείωση των απωλειών υστέρησης.

3.1.1.2 Απώλειες δινορευμάτων

Πολλές ηλεκτρικές συσκευές περιέχουν μεταλλικά κομμάτια, τα οποία κινούνται μέσα σε μαγνητικά πεδία ή απλώς βρίσκονται μέσα σε μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία. Στις παραπάνω περιπτώσεις επάγονται ρεύματα, τα οποία κυκλοφορούν μέσα στον όγκο του υλικού. Τα ρεύματα αυτά ονομάζονται «δινορεύματα», λόγω της ομοιότητας τους με τις δίνες των υγρών. Στον μετασχηματιστή, το εναλλασσόμενο ρεύμα στο πρωτεύον πηνίο δημιουργεί εναλλασσόμενη ροή στον σιδηροπυρήνα του. Η συνεχώς μεταβαλλόμενη ροή προκαλεί μια επαγομένη ΗΕΔ στο δευτερεύον πηνίο. Ο σιδηροπυρήνας όμως είναι αγωγός, με αποτέλεσμα τα δινορεύματα να κυκλοφορούν σε όλο τον όγκο του. Η διαδρομή που ακολουθούν τα δινορεύματα διαπερνά κάθετα την μαγνητική ροή. Τα δινορεύματα είναι ανεπιθύμητα, καθώς σπαταλούν ενέργεια με τη θέρμανση ($I^2 R$) και επειδή προκαλούν τα ίδια αντιτιθέμενη ροή.

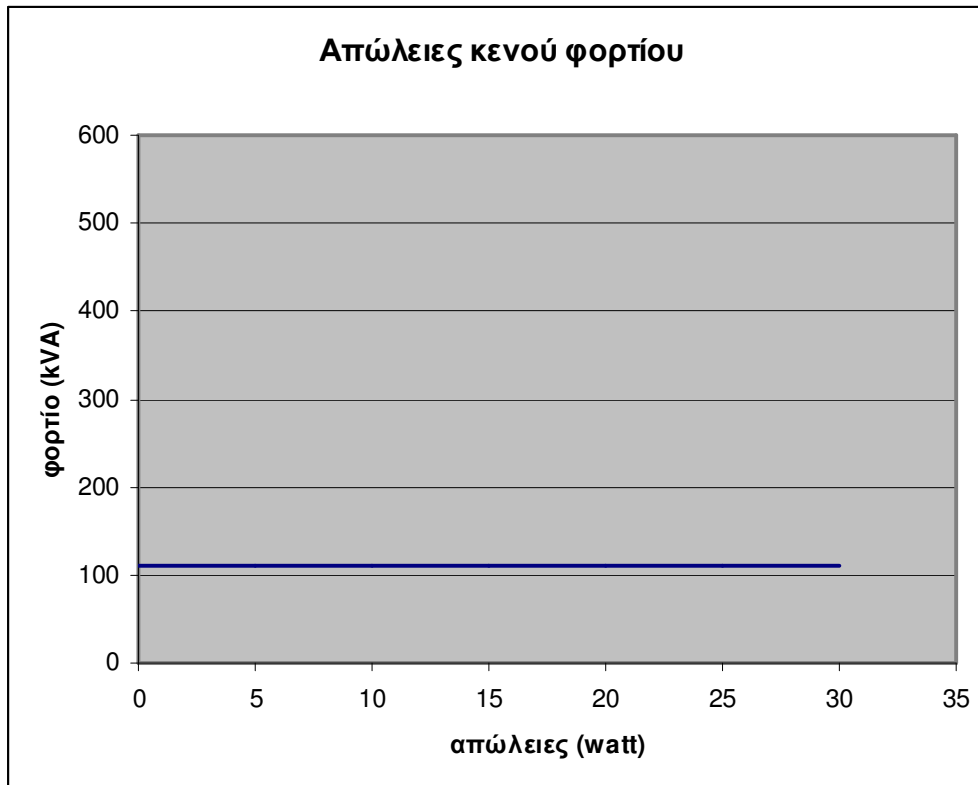
Για τον περιορισμό των δινορευμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί φυλλωτός πυρήνας, δηλαδή σιδηροπυρήνας αποτελούμενος από λεπτά φύλλα. Η μεγάλη ηλεκτρική επιφανειακή αντίσταση του κάθε φύλλου, η οποία οφείλεται είτε σε φυσική επίστρωση οξειδίου είτε σε μονωτικό βερνίκι, περιορίζει τα δινορεύματα σε κάθε φύλλο. Οι διαθέσιμοι δρόμοι των δινορευμάτων είναι στενότεροι, η ΗΕΔ που επάγεται σε κάθε δρόμο είναι μικρότερη και τα δινορεύματα περιορίζονται σημαντικά. Ειδικότερα, στους μικρούς μετασχηματιστές όπου οι απώλειες είναι σημαντικές, χρησιμοποιούνται σιδηροπυρήνες κατασκευασμένοι από φερρίτες. Οι φερρίτες αποτελούνται από σύνθετα οξείδια σιδήρου και άλλων μετάλλων που έχουν μεγαλύτερη ειδική αντίσταση από τον καθαρό σίδηρο [3.2]. Επίσης, χρησιμοποιείται μόνωση ανάμεσα στα ελάσματα, η οποία αυξάνει μεν την απόδοση του μετασχηματιστή (μικρότερες απώλειες) αλλά αυξάνει δε κατά πολύ το κόστος κατασκευής του. Οι απώλειες δινορευμάτων αποτελούν περίπου το 20% - 50% των συνολικών απωλειών κενού φορτίου.

Στον πυρήνα των μετασχηματιστών εμφανίζονται και σποραδικές απώλειες δινορευμάτων. Οι σποραδικές απώλειες είναι σχετικά μικρές και δύσκολα μπορούν να υπολογιστούν. Δημιουργούνται από το ρεύμα που κυκλοφορεί στα διάφορα συστατικά του πυρήνα, όπως οι σφικτήρες και οι πείροι. Ακόμα και όταν δεν υπάρχει φορτίο στον μετασχηματιστή, υπάρχουν ηλεκτρικές απώλειες ($I^2 R$) στο πρωτεύον τύλιγμα που προκαλούνται από το υπάρχον ρεύμα. Το ρεύμα αυτό είναι απαραίτητο για την διέγερση του πυρήνα. Οι σποραδικές απώλειες θεωρούνται αμελητέες, λόγω της ελάχιστης συμμετοχής τους στις συνολικές απώλειες κενού φορτίου.

3.1.1.3 Προσδιορισμός των απωλειών κενού φορτίου

Ο προσδιορισμός των απωλειών κενού φορτίου είναι απλή και ακριβής διαδικασία. Σύμφωνα με το σχήμα 3.1, οι απώλειες κενού φορτίου είναι σταθερές και ανεξάρτητες από το φορτίο λειτουργίας του, καθ' όλη την διάρκεια της λειτουργίας του

μετασχηματιστή. Οι απώλειες υπολογίζονται από τον κατασκευαστή σε κενό φορτίο και αναγράφονται στην πινακίδα του μετασχηματιστή. Εξαρτώνται από την ισχύ του μετασχηματιστή (kVA), την τάση και την σχεδίαση του. Στοιχίζουν περισσότερο από τις απώλειες φορτίου, καθώς υπάρχουν πάντα σε όλη την διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή [3.1].



Σχήμα 3.1 - Απώλειες κενού φορτίου

3.1.2 Απώλειες φορτίου

Οι απώλειες φορτίου στους μετασχηματιστές δεν είναι σταθερές, καθώς μεταβάλλονται ανάλογα με το φορτίο που εφαρμόζεται σε αυτόν. Οφείλονται στις απώλειες θερμότητας των αγωγών που δημιουργούνται κατά την διέλευση του φορτίου και στις απώλειες δινορευμάτων στον αγωγό [3.1]. Με την αύξηση της θερμοκρασίας παρατηρείται και αύξηση των απωλειών, καθώς αυξάνεται η αντίσταση του αγωγού αναλογικά με την θερμοκρασία. Δεν είναι εύκολος ο ακριβής υπολογισμός των απωλειών φορτίου, καθώς απαιτείται ο συντελεστής φορτίου και το μέγιστο φορτίο. Γι' αυτόν τον λόγο, συχνά πραγματοποιείται μόνο ο υπολογισμός των απωλειών χαλκού, καθώς αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών φορτίου.

3.1.2.1 Απώλειες χαλκού

Οι απώλειες χαλκού εμφανίζονται στα τυλίγματα του μετασχηματιστή που είναι συνήθως κατασκευασμένα από χαλκό. Εμφανίζονται στο πρωτεύον και στο δευτερεύον κυκλώματα του μετασχηματιστή και είναι το αποτέλεσμα της αντίστασης του χάλκινου αγωγού κατά την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από τον αγωγό. Η αυξημένη κίνηση των ηλεκτρονίων, λόγω της διέλευσης ηλεκτρικού ρεύματος, επιφέρει αύξηση κίνησης των μορίων του αγωγού, επομένως αύξηση της θερμοκρασίας λόγω των περισσότερων συγκρούσεων μορίων. Η ενέργεια που καταναλώνεται υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση 3.2. Το μέγεθος των απωλειών είναι πολύ σημαντικό και ισοδυναμεί ή υπερτερεί από τις απώλειες κενού φορτίου.

$$I = \frac{V}{R} \Rightarrow V = I \cdot R \quad (3.1)$$

$$V \cdot A = (\text{volts}) \cdot (\text{amperes}) = (R \cdot I) \cdot (I) = I^2 R \quad (3.2)$$

Σύμφωνα με την σχέση 3.2, η μείωση της τιμής του ρεύματος (I) ή της αντίστασης (R) του αγωγού, προκαλεί μείωση των απωλειών. Παρόλο που η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος (I) αποτελεί το σημαντικότερο συστατικό των απωλειών (καθώς είναι υψωμένο στο τετράγωνο), δεν μπορεί να μεταβληθεί από τον σχεδιασμό του μετασχηματιστή. Επομένως, μείωση των απωλειών φορτίου, προκαλείται από την μείωση αντίστασης του αγωγού. Δηλαδή, για την κατασκευή του αγωγού χρησιμοποιούνται υλικά που παρέχουν μικρή αντίσταση ανά μονάδα επιφάνειας, ενώ παράλληλα το κόστος τους δεν αυξάνει πολύ την τελική τιμή του μετασχηματιστή. Έχει διαπιστωθεί ότι ο χαλκός είναι το κατάλληλο υλικό, καθώς είναι οικονομικό και καλύπτει τα παραπάνω κριτήρια.

Μια ακόμη μέθοδος μείωσης της αντίστασης του αγωγού, επιτυγχάνεται με την μεταβολή των γεωμετρικών μεγεθών του. Συγκεκριμένα, η αύξηση της διατομής του αγωγού προκαλεί μείωση των απωλειών, καθώς διευκολύνεται η διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος με αποτέλεσμα τις λιγότερες συγκρούσεις μορίων και μείωση της θερμότητα. Σύμφωνα με την ίδια λογική, χρησιμοποιούνται αγωγοί μικρότερου μήκους.

3.1.2.2 Απώλειες δινορευμάτων αγωγού

Οι απώλειες δινορευμάτων του αγωγού είναι παρόμοιες με τις απώλειες δινορευμάτων του πυρήνα των μετασχηματιστών. Οφείλονται στην μαγνητική ροή που διαπερνά κάθετα τον αγωγό και προκαλεί τη ροή δινορευμάτων στο εσωτερικό του. Η μείωση τους επιτυγχάνεται μετατοπίζοντας εναλλάξ τους αγωγούς κατά το μήκος τους.

3.1.2.3. Προσδιορισμός των απωλειών φορτίου

Ο προσδιορισμός των απωλειών φορτίου είναι πιο σύνθετος από τον αντίστοιχο των απωλειών κενού φορτίου, διότι η τιμή τους μεταβάλλεται. Όπως φαίνεται στο σχέδιο 3.2, η τιμή των απωλειών εξαρτάται από το φορτίο που λαμβάνει ο μετασχηματιστής, οπότε κρίνεται αναγκαίος ο καθορισμός φορτίου του συστήματος. Επομένως, χρειάζεται ο μετασχηματισμός του φορτίου αιχμής σε μέσο φορτίο, το οποίο θεωρείται σταθερό σε όλη την διάρκεια λειτουργίας του μετασχηματιστή. Ο μετασχηματισμός επιτυγχάνεται με την χρήση του συντελεστή φορτίου [3.1].

Ο συντελεστής φορτίου είναι σημαντικός συντελεστής για τον προσδιορισμό των απωλειών φορτίου. Ορίζεται ως ο λόγος του μέσου φορτίου ως προς το φορτίο αιχμής (και τα δύο μεγέθη εκφράζονται σε kilowatts). Δηλαδή ισούται με την σχέση (3.3)

$$\text{Συντελεστής φορτίου} = \text{μέσο φορτίο (kW)} / \text{φορτίο αιχμής (kW)} \quad (3.3)$$

Έπειτα από τον υπολογισμό του συντελεστή φορτίου, ορίζεται ο συντελεστής απωλειών. Ο συντελεστής απωλειών μπορεί να διαφέρει από σύστημα σε σύστημα. Ωστόσο, η τιμή του προσεγγίζεται με την χρήση της εμπειρικής σχέσης 3.4. Επίσης, κρίνεται αναγκαίος ο υπολογισμός και προσδιορισμός του συντελεστή δυναμικότητας, ώστε να προσδιοριστούν οι απώλειες για την αντίστοιχη φόρτιση. Ο υπολογισμός πραγματοποιείται με την βοήθεια της σχέσης (3.5).

$$\text{Συντελεστής απωλειών} = 0,15 * \text{συντ. φορτίου} + 0,85 * (\text{συντ. φορτίου})^2 \quad (3.4)$$

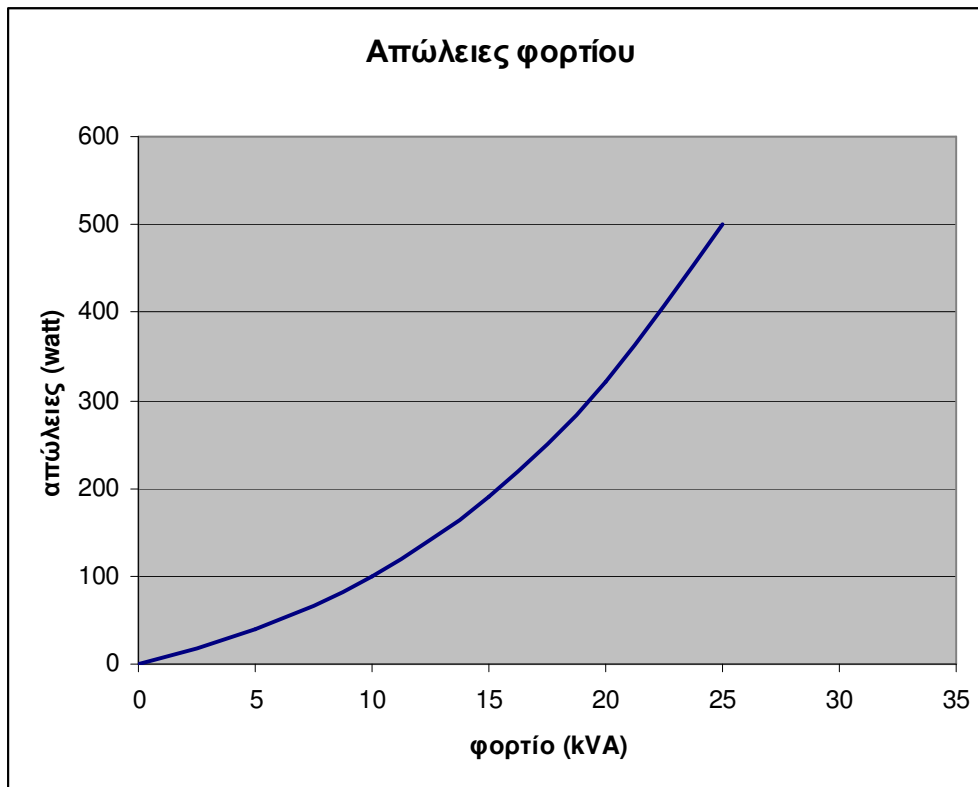
$$\text{Συντελεστής δυναμικότητας (CF)} = \frac{\text{φορτίο αιχμής μετασχηματιστή}}{\text{φορτίο λειτουργίας μετασχηματιστή}} \quad (3.5)$$

Ο προσδιορισμός του φορτίου αιχμής ενός μετασχηματιστή δεν είναι εύκολος. Ωστόσο, ο προσδιορίζεται από την ανάλυση ροής του φορτίου. Συχνά, σε μετασχηματιστές διανομής, η αιχμή του φορτίου του μπορεί να διαφέρει από την αιχμή του φορτίου του τροφοδότη, καθώς ο μετασχηματιστής πιθανώς να βρίσκεται σε παράλληλη διάταξη με άλλους μετασχηματιστές. Επομένως, το μέγιστο φορτίο σε έναν μετασχηματιστή μπορεί να βρεθεί χρησιμοποιώντας τον συντελεστή ευθύνης:

$$\text{Συντελεστής ευθύνης} = \frac{\text{φορτίο αιχμής τροφοδότη}}{\text{φορτίο αιχμής μετασχηματιστή}} \quad (3.6)$$

Ο προσδιορισμός των απωλειών φορτίων πραγματοποιείται με την βοήθεια της σχέσης 3.7. Οι απώλειες φορτίου αναφέρονται σε kWh και όπως με τις απώλειες κενού φορτίου, αναγράφονται στην πινακίδα του μετασχηματιστή.

$$\text{kWh} = \text{συντ. απωλειών} * \text{CF}^2 * \text{απώλειες (kW)} * 8760 \text{ (h/yr)} \quad (3.7)$$



Σχήμα 3.2 – Απώλειες φορτίου

3.1.3 Πρόσθετες απώλειες

Εκτός από τις απώλειες που εμφανίζονται στο κύριο σώμα ενός μετασχηματιστή, υπάρχουν πρόσθετες απώλειες που λαμβάνουν χώρα στον βοηθητικό εξοπλισμό του. Το άμεσα συνδεδεμένο εξάρτημα με τις πρόσθετες απώλειες είναι το σύστημα ψύξης των μετασχηματιστών. Το σύστημα ψύξης εκκινεί ανεμιστήρες και αντλίες, που με την σειρά τους δαπανούν μια ποσότητα ενέργειας για την λειτουργία τους. Είναι κατανοητό ότι η ενέργεια που δαπανιέται από το σύστημα ψύξης εξαρτάται από τις ώρες λειτουργίας του μετασχηματιστή. Για παράδειγμα, υπάρχουν μετασχηματιστές των οποίων το σύστημα ψύξης λειτουργεί συνεχώς, ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις το σύστημα ψύξης ενεργοποιείται όταν το ποσοστό φόρτισης του μετασχηματιστή ξεπεράσει το 133% [3.1].

Οι απώλειες φορτίου και κενού φορτίου εντοπίζονται σε όλους τους μετασχηματιστές. Εν αντιθέσει, οι πρόσθετες απώλειες δεν πρέπει να υπολογίζονται για όλες τις κατηγορίες των μετασχηματιστών. Συστήματα ψύξης κατέχουν μόνο οι μετασχηματιστές ισχύος, σε αντίθεση με του μετασχηματιστές διανομής, οι οποίοι διαχειρίζονται μικρής τάξεως φορτία. Στους μετασχηματιστές διανομής χρησιμοποιείται συνήθως ένα κλειστό κύκλωμα που περιέχει λάδι και με φυσική του κυκλοφορία ψύχει επαρκώς τα εξαρτήματα του μετασχηματιστή. Το σύστημα ψύξης «λαδιού» δεν καταναλώνει ενέργεια για την λειτουργία του.

3.2 Μέθοδοι βελτίωσης απόδοσης μετασχηματιστών

Η απόδοση των μετασχηματιστών βελτιώνεται μέσω της μείωσης των απωλειών στον μετασχηματιστή. Η μείωση των απωλειών πραγματοποιείται μέσω της μεταβολής της σχεδίασης, της κατασκευής, της λειτουργίας και της συντήρησης του μετασχηματιστή καθώς και με εφαρμογή μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης. Η πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδος βελτίωσης της απόδοσης είναι μέσω της μεταβολής της σχεδίασής του μετασχηματιστή.

3.2.1. Βελτίωση απόδοσης μέσω της σχεδίασης

Η ιδεατή σχεδίαση ενός μετασχηματιστή στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των απωλειών κενού φορτίου και των απωλειών φορτίου. Η μείωση των απωλειών κενού φορτίου συνήθως επιτυγχάνεται με την μείωση της μαγνητικής επαγωγής, αυξάνοντας τον αριθμό των σπειρών και προκαλώντας ταυτόχρονη αύξηση των απωλειών φορτίου. Παρόμοια, η μείωση της πυκνότητας του ρεύματος μειώνει τις απώλειες φορτίου, όμως απαιτείται περισσότερο μαγνητικό υλικό που αυξάνει τις απώλειες κενού φορτίου. Η σχεδίαση μετασχηματιστών με μειωμένες απώλειες, αποτελεί έναν συμβιβασμό ανάμεσα στην κατανομή των απωλειών του πυρήνα και των πηνίων και από την άλλη μεριά με το βάρος, το μέγεθος, τον όγκο, την τάση βραχυκύκλωσης, τη μόνωση και το κόστος του μετασχηματιστή [3.5].

Οι απώλειες του πυρήνα και των πηνίων, συνδέονται μεταξύ τους μέσω της παραγόμενης θερμότητας και μέσω του φυσικού χώρου που καταλαμβάνουν τα συστατικά τους. Οι μετασχηματιστές είναι σχεδιασμένοι για σταθερή θερμοκρασία ανύψωσης, ως αποτέλεσμα της θερμότητας που παράγεται από τις απώλειες του μετασχηματιστή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Το όριο ανύψωσης της θερμοκρασίας είναι ένα σχεδιαστικό όριο και καθορίζεται μέσω σταθερών τιμών. Αν η τιμή της θερμοκρασίας υπερβεί αυτό το όριο τότε, λόγω αστοχίας του μονωτικού μέσου, οδηγούμαστε σε μείωση της διάρκειας ζωής του μετασχηματιστή.

Εκτός από τον πυρήνα και το πηνίο, ένας μετασχηματιστής διαθέτει κι άλλα στοιχεία που επιδρούν στη σχεδίασή του, όπως το μονωτικό μέσο ή το δοχείο. Η σχεδίαση του μετασχηματιστή είναι σύνθετη διαδικασία που περιλαμβάνει την επιλογή του κατάλληλου υλικού και την επιλογή της κατάλληλης γεωμετρίας [3.6].

Οι σύγχρονες τεχνικές σχεδίασης με τη βοήθεια H/Y επιτρέπουν πολλές μεταβολές στις μεταβλητές σχεδίασης, στοχεύοντας στην βέλτιστη τεχνικοοικονομική λύση [3.5]. Στον πίνακα 3.1 δίνονται συγκεντρωτικά οι εναλλακτικές λύσεις των σχεδιαστών, έτσι ώστε να παραχθεί ένας μετασχηματιστής με μεγαλύτερη απόδοση. Για τις περισσότερες εναλλακτικές προσεγγίσεις, είναι εμφανής η ισορροπία μεταξύ των απωλειών κενού φορτίου, των απωλειών φορτίου και του κόστους.

		Απώλειες Κενού	Απώλειες Φορτίου	Κόστος
Μείωση απωλειών κενού φορτίου				
A.	Χρήση υλικού πυρήνα χαμηλότερων απωλειών	Χαμηλότερες	Αμετάβλητες	Υψηλότερο
B1.	Μείωση μαγνητικής ροής με αύξησης της εγκάρσιας διατομής του πυρήνα	Χαμηλότερες	Υψηλότερες	Υψηλότερο
B2.	Μείωση μαγνητικής ροής με μείωση της 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.	Χρήση αγωγού χαμηλότερων απωλειών	Αμετάβλητες	Χαμηλότερες	Χαμηλότερο
B.	Μείωση πυκνότητας ρεύματος με αύξηση της εγκάρσιας διατομής του αγωγού	Υψηλότερες	Χαμηλότερες	Υψηλότερο
Γ1.	Μείωση του μήκους διαδρομής του ρεύματος με μείωση της εγκάρσιας διατομής του πυρήνα	Υψηλότερες	Χαμηλότερες	Χαμηλότερο
Γ2.	Μείωση του μήκους διαδρομής του ρεύματος με αύξηση της τάσης ανά σπείρα	Υψηλότερες	Χαμηλότερες	Χαμηλότερο

Πίνακας 3.1 - Τεχνικές μείωσης απωλειών

3.2.2. Βελτίωση απόδοσης μέσω της κατασκευής

Οι τεχνικές κατασκευής των μετασχηματιστών, μέσω εναλλακτικών μαγνητικών υλικών και διαμορφώσεων του πυρήνα, μειώνουν τις απώλειες κενού φορτίου. Οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν πυριτιούχο σίδηρο υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας ψυχρής έλασης, με προσανατολισμένους κόκκους. Για επιπλέον μειώσεις των απωλειών κενού φορτίου χρησιμοποιείται πυριτιούχος σίδηρος χαραγμένος με laser, ώστε οι κόκκοι του να προσανατολιστούν κατά την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής. Η παραπάνω τεχνική μειώνει τις απώλειες υστέρησης, λόγω της μείωσης της αντίστασης του σιδηρού κατά την διαδικασία της μαγνήτισης και της απομαγνήτισης του. Λόγω του αυξημένου κόστους, η μέθοδος αυτή επιλέγεται από χρήστες που δίνουν μεγάλη βαρύτητα στις απώλειες.

Με την χρήση λεπτότερων ελασμάτων σιδήρου, ο κατασκευαστής των μετασχηματιστών μειώνει σημαντικά τις απώλειες δινορευμάτων. Η διαδικασία αυτή είναι αρκετά επίπονη και δαπανηρή, καθώς οι μεγάλοι μετασχηματιστές απαιτούν περισσότερα από 50.000 φύλλα σιδήρου για την συναρμολόγηση του πυρήνα τους.

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. Τα μόρια στον άμορφο σίδηρο έχουν τυχαίο προσανατολισμό ενώ τα μόρια του πυριτιούχου σιδήρου είναι προσανατολισμένα. Η εφαρμογή ενός εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου σε έναν πυρήνα κατασκευασμένο από άμορφο σίδηρο, απορροφά λιγότερη ενέργεια στη μαγνητισμό και απομαγνητισμό του, σε σχέση με ένα πυρήνα από πυριτιούχο σίδηρο. Επομένως, παρατηρείται σημαντική μείωση των απωλειών υστέρησης. Τα λεπτότερα ελάσματα στους πυρήνες από άμορφο σίδηρο μειώνουν τις απώλειες δινορευμάτων, διότι μειώνεται η αντίσταση μεταξύ των ελασμάτων. Επίσης, ο πυρήνας από άμορφο σίδηρο είναι μεγαλύτερος και βαρύτερος από ένα πυρήνα που είναι κατασκευασμένος από πυριτιούχο σίδηρο. Ο χαραγμένος με laser πυριτιούχος σίδηρος είναι ακριβότερος από τον συμβατικό, ενώ ο άμορφος σίδηρος είναι πολύ πιο ακριβός. Για το λόγο αυτό, οι παραπάνω επιλογές μαγνητικού υλικού ακολουθούνται όταν δίνεται μεγάλη βαρύτητα στο κόστος των απωλειών.

Το αλουμίνιο και ο χαλκός είναι υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα στα τυλίγματα των μετασχηματιστών διανομής. Εφαρμόζοντας τα δύο υλικά με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, παρατηρείται ότι ο χαλκός εμφανίζει καλύτερη αγωγιμότητα και 40% μειωμένες ωμικές απώλειες από ότι το αλουμίνιο [3.6]. Σε σύγκριση με το χαλκό, το αλουμίνιο μπορεί να μορφοποιηθεί ευκολότερα και είναι πιο φθινό. Ο αγωγός από αλουμίνιο εμφανίζεται τις ίδιες απώλειες φορτίου με εκείνες που έχει ο αγωγός από χαλκό. Ωστόσο το μειονέκτημα του αλουμινίου είναι η παρουσία αυξημένων απωλειών πυρήνα σε σχέση με το χαλκό. Σε σχεδιάσεις μετασχηματιστών διανομής, ακολουθείται τακτικά η χρήση χαλκού για το πηνίο χαμηλής τάσης. Η χρήση αλουμινίου στο τύλιγμα χαμηλής τάσης μειώνει τις απώλειες από δινορεύματα. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ισορροπία ανάμεσα στο κόστος του υλικού και στις απώλειες.

3.2.3. Βελτίωση απόδοσης μέσω του βοηθητικού εξοπλισμού

Οι απώλειες από τον βοηθητικό εξοπλισμό μπορούν να μειωθούν μέσω της μείωσης του χρόνου λειτουργίας του βοηθητικού εξοπλισμού. Ο έλεγχος του χρόνου λειτουργίας γίνεται με την χρήση θερμοστοιχείων. Τα θερμοστοιχεία τοποθετούνται κοντά στα τυλίγματα του μετασχηματιστή, ώστε να ανιχνεύουν τη θερμοκρασία τους. Όταν η τιμή της θερμοκρασίας υπερβαίνει τα προκαθορισμένα όρια, τα θερμοστοιχεία στέλνουν σήμα δια μέσου ενός πομπού και ενός δεκτή στους ανεμιστήρες και τις αντλίες για να λειτουργήσουν και να απέλθει η θερμοκρασία ξανά σε ανεκτές τιμές. Η εσωτερική θερμοκρασία συνήθως δεν ξεπερνά τους 65 °C πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος [3.1].

3.2.4. Βελτίωση απόδοσης μέσω του μεγέθους του

Το μέγεθος του μετασχηματιστή, δηλαδή η ονομαστική ικανότητά του, επηρεάζει την απόδοση του [3.7]. Μετασχηματιστές με κατάλληλο μέγεθος, διατηρούν τις απώλειες φορτίου στο ελάχιστο. Μετασχηματιστής με μεγαλύτερη ονομαστική ικανότητα από την απαιτούμενη, σχηματίζουν υψηλότερες απώλειες κενού φορτίου, ενώ μετασχηματιστές μικρότερης ονομαστικής ικανότητας παρουσιάζουν υψηλότερες απώλειες φορτίου. Το κατάλληλο μέγεθος ενός μετασχηματιστή εξαρτάται από την οικονομική αξία και το μέγεθος τόσο των απωλειών φορτίου όσο και των απωλειών κενού φορτίου.

Οι συνολικές απώλειες δεν είναι σταθερές κατά την διάρκεια της λειτουργίας των μετασχηματιστών, καθώς εξαρτώνται από το φορτίο στο μετασχηματιστή. Η ονομαστική ικανότητα του μετασχηματιστή, οφείλει να λαμβάνει υπόψη τωρινά και μελλοντικά κριτήρια. Επομένως, κρίνεται απαραίτητη η εκτίμηση του μελλοντικού φορτίου λειτουργίας του μετασχηματιστή στη διάρκεια του χρόνου ζωής του και επομένως τις μελλοντικές του απώλειες. Ο κύριος στόχος είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών μέσω της κατάλληλης επιλογής αποδοτικού μετασχηματιστή.

3.2.5. Βελτίωση απόδοσης μέσω της λειτουργίας του

Η λειτουργία ενός μετασχηματιστή επηρεάζεται από την απόδοσή του. Οι μετασχηματιστές ισχύος με μεταγωγέα τάσεων ελαχιστοποιούν τις απώλειες στο σύστημα διανομής και μεταφοράς. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση του μεταγωγέα τάσεως στην μέγιστη τάση λειτουργίας, καθώς αναγκάζει το σύστημα διανομής και μεταφοράς να λειτουργεί με τη μέγιστη τάση. Οι μετασχηματιστές ισχύος με μεταγωγέα τάσεων έχουν ελαφρώς υψηλότερες απώλειες φορτίου και κενού φορτίου σε σχέση με τους απλούς μετασχηματιστές. Ωστόσο, οι συνολικές απώλειες του ολικού δικτύου είναι χαμηλότερες, λόγω της υψηλότερης τάσης [3.1].

Η βέλτιστη λειτουργία των μετασχηματιστών επηρεάζεται από την συνδεσμολογία των μονάδων τους. Η σωστή συνδεσμολογία επιτρέπει τον διαμοιρασμό του φορτίου, σύμφωνα με την ονομαστική ικανότητα κάθε μετασχηματιστή. Επομένως, παρατηρείται ισορροπία στην φόρτιση της κάθε μονάδας, γεγονός που επιφέρει τις ελάχιστες απώλειες.

3.2.6. Βελτίωση απόδοσης μέσω της συντήρησής του

Η συντήρηση των μετασχηματιστών περιλαμβάνει επιθεώρηση, έλεγχο, ανακαίνιση και απόσυρση. Πολλοί λίγοι χρηστές συντηρούν τους μετασχηματιστές, προκειμένου να εξοικονομήσουν ενέργεια. Η συντήρηση συνήθως συνδέεται με την αξιοπιστία και την ασφάλεια. Η αντικατάσταση των ελαττωματικών ή ενεργειακά δαπανηρών εξαρτημάτων προκαλεί εξοικονόμηση ενός σημαντικού ποσού ενέργειας. Η

συντήρηση των μετασχηματιστών βοηθά στον γρήγορο εντοπισμό των ελαττωματικών εξαρτημάτων, καθώς και στην μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής τους [3.5].

3.2.7. Βελτίωση απόδοσης με εφαρμογή τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης

Οι τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης εφαρμόζονται πρόσφατα για τη βελτίωση της απόδοσης των μετασχηματιστών, μέσω της μείωσης των απωλειών κενού φορτίου. Η χρήση δένδρων απόφασης προσδιορίζει τις σημαντικότερες παραμέτρους, που επιδρούν στις απώλειες κενού φορτίου [3.7]. Τα νευρωνικά δίκτυα εφαρμόζονται για την πρόβλεψη των απωλειών κενού φορτίου, χρησιμοποιώντας ως είσοδο τις τιμές των παραμέτρων που έχουν επιλεγεί από τα δέντρα απόφασης [3.8].

Ένας τριφασικός μετασχηματιστής τύπου τυλιχτού πυρήνα αποτελείται από τέσσερις διαφορετικούς ατομικούς πυρήνες. Όταν πρόκειται να κατασκευαστεί μια παρτίδα, έστω 50 μετασχηματιστών (ίδια μελέτη και ίδιος τύπος μετασχηματιστή), τότε πρέπει να επιλυθεί το πρόβλημα της ομαδοποίησης των πυρήνων, δηλαδή να συνδυάζοντας οι 200 ατομικοί πυρήνες με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, ώστε να προκύψουν 50 μετασχηματιστές με τις χαμηλότερες δυνατές απώλειες. Επειδή ο αριθμός των συνδυασμών αυτών είναι αρκετά μεγάλος για έναν τυπικό αριθμό πυρήνων, χρησιμοποιούνται οι γενετικοί αλγόριθμοι ώστε να υπολογιστεί μέσα σε μερικές ανακυκλώσεις η βέλτιστη διάταξη των ατομικών πυρήνων. Η μέθοδος αυτή μπορεί να προκαλέσει μείωση των απωλειών κενού φορτίου της τάξεως του 3% ή και πολλές φορές ακόμα μεγαλύτερη για μια τυπική παρτίδα 50 μετασχηματιστών [3.5].

3.3 Αξία των απωλειών

Η αξία των απωλειών είναι σημαντικός παράγοντας, στον οποίο δίνεται ιδιαίτερη προσοχή κατά την λήψη απόφασης αγοράς μετασχηματιστών. Η αξία των απωλειών μπορεί να μετατραπεί σε χρηματικό κόστος, το οποίο συσχετίζεται με το κόστος αγοράς ενός μετασχηματιστή. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη μόνο το κόστος απωλειών, προωθείται η αγορά ενός μετασχηματιστή υψηλής απόδοσης με υψηλή τιμή αγοράς. Αντίθετα, όταν το ενδιαφέρον κινείται στο κόστος αγοράς, επιλέγεται η αγορά ενός λιγότερου αποδοτικού μετασχηματιστή με χαμηλότερο κόστος αγοράς.

Στόχος όλων των επιχειρήσεων είναι η αγορά του κατάλληλου εξοπλισμού με όσο το δυνατόν λιγότερο οικονομικό κόστος. Η επιλογή της βέλτιστης αγοράς γίνεται δυσκολότερη, όταν ο εξοπλισμός έχει μεγάλο κόστος αγοράς και μεγάλη διάρκεια ζωής. Το ίδιο πρόβλημα αντιμετωπίζεται κατά την αγορά μετασχηματιστών, καθώς η τιμή αγοράς τους κυμαίνεται από 2500€ (75kVA) έως και περισσότερα από 10.000€ (1600kVA), ενώ η διάρκεια ζωής κυμαίνεται στα 30 χρόνια λειτουργίας. Το πρόβλημα

αγοράς μετασχηματιστή γίνεται ακόμη πιο σύνθετο, καθώς το κόστος των απωλειών επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό το συνολικό κόστος κατοχής του μετασχηματιστή.

Η αξία των απωλειών είναι καθαρά υποκειμενικό κριτήριο και εξαρτάται αποκλειστικά από την απόφαση του αγοραστή. Για παράδειγμα, ένας αγοραστής που κατέχει του μια μικρή μονάδα παραγωγής, ενδεχομένως να ενδιαφέρεται για αγορά μετασχηματιστών υψηλής απόδοσης, ώστε να περιοριστούν οι απώλειες του δικτύου διανομής του. Ενδεχομένως να ενδιαφέρεται για το περιβάλλον και να επιλέξει αποδοτικό μετασχηματιστή, ώστε να μειωθεί η ανάγκη παραγωγής περισσότερης ενέργειας, το οποίο συνεπάγεται με την μικρότερη παραγωγή ρύπων στην ατμόσφαιρα. Σε περίπτωση αγοράς μετασχηματιστών από μεγάλες εταιρίες (πχ ΔΕΗ), πραγματοποιείται αγορά μεγάλων ποσοτήτων μετασχηματιστών και επομένως εξετάζεται η χαμηλότερη τιμή αγοράς. Όπως αναλύεται στην ενότητα 4, η ενέργεια που σπαταλείται από τις απώλειες είναι αρκετά μεγάλη. Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι συγκρίσιμη με την παραγωγή ενέργειας, καθώς οι απώλειες εμφανίζονται σε όλη την διάρκεια ζωής των μετασχηματιστών. Στον αντίποδα, σε περίπτωση που το κεφάλαιο του αγοραστή δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο, προτιμάται η αγορά φθηνών μετασχηματιστών χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες τους.

Για την αντιμετώπιση του παραπάνω υποκειμενικού προβλήματος, εισάγεται η έννοια του κόστους απωλειών. Δηλαδή πραγματοποιείται μετατροπή των απωλειών σε χρηματικό κόστος. Το χρηματικό κόστος θεωρείται αντικειμενικό κριτήριο και είναι αποδεκτό από όλους τους αγοραστές, ανεξαρτήτως από τις ανησυχίες τους. Το κόστος των απωλειών δημιουργεί ένα αντικειμενικό πρόβλημα, στο οποίο μπορεί να δοθεί εφικτή λύση. Η μετατροπή των απωλειών σε κόστος πραγματοποιείται με τον υπολογισμό των συντελεστών A και B, οι οποίοι αναλύονται στην συνέχεια.

3.4 Υπολογισμός αξίας των μετασχηματιστών μέσω συντελεστών.

3.4.1 Υπολογισμός συντελεστή A

Σύμφωνα με την ενότητα 3.1.1, οι απώλειες κενού φορτίου είναι σταθερές για όλο τον κύκλο ζωής ενός μετασχηματιστή. Επομένως, ο οικονομικός συντελεστής που σχετίζεται με τις απώλειες κενού φορτίου οφείλει να είναι σταθερός κατά την λειτουργία του μετασχηματιστή. Η τιμή του συντελεστή εξαρτάται από τους σταθμούς παραγωγής και το δίκτυο διανομής, καθώς εκφράζεται από την ενέργεια που απαιτείται για παραγωγή, μεταφορά και διανομή του ηλεκτρικού φορτίου προς τους μετασχηματιστές [3.5]. Επομένως, δεν συσχετίζεται με την φόρτιση του μετασχηματιστή, η οποία μεταβάλλεται καθημερινά. Καθώς ο συντελεστής A παραμένει σταθερός, η τιμή του οφείλει να συμβαδίζει με τα τωρινά δεδομένα αλλά και με τις τυχόν μεταβολές τους για τα επόμενα 30 χρόνια. Σε αυτό το σημείο εμφανίζεται η δυσκολία υπολογισμού του συντελεστή, καθώς ο αγοραστής πρέπει να προσπαθήσει να υπολογίσει την μελλοντική

μεταβολή του κόστους παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο συντελεστής A υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση 3.8

$$A = \frac{SC + (EC \cdot 8760)}{FC} \cdot \frac{1}{1000} \text{ σε } \text{€} / \text{Watt} \quad (3.8)$$

Όπου SC το ετήσιο κόστος της παραγωγής του συστήματος (€/kW-yr), EC το ετήσιο κόστος ενέργειας (€/kWh), FC ο συντελεστής ετησίου κόστους του μετασχηματιστή και 8760 οι ώρες λειτουργίας του μετασχηματιστή ανά έτος. Ο συντελεστής A εκφράζεται σε €/kW, οπότε διαιρείται με 1000 ώστε για να μετατραπούν τα kilowatts σε watts.

Το ετήσιο κόστος παραγωγής του συστήματος (SC) αντιπροσωπεύει το ετήσιο κόστος της επιπρόσθετης παραγωγής, μεταφοράς και διανομής, που είναι αναγκαίο για την παροχή 1 kW φορτίου στον μετασχηματιστή. Οι τιμές του ποικίλουν ανάλογα με τον τύπο καυσίμου που χρησιμοποιείται για την παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας. Ο αριθμητικός υπολογισμός του ετησίου κόστους παραγωγής χρειάζεται αρχικά το κόστος αντικατάστασης για κάθε τμήμα του συστήματος (παραγωγή, μεταφορά, διανομή), το οποίο διαιρείται με το φορτίου αιχμής του κάθε τμήματος αντίστοιχα. Στην συνέχεια, πολλαπλασιάζεται με τον ετήσιο συντελεστή κόστους, υπολογίζεται η παραγωγική ικανότητα του κάθε τμήματος, και αθροίζοντας την παραγωγική ικανότητα τους, υπολογίζεται η παραγωγική ικανότητα του συστήματος.

Το ετήσιο κόστος της ενέργειας (EC) περιλαμβάνει κάθε κόστος που είναι ανάλογο με την ενέργεια εξόδου των γεννητριών των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, περιλαμβάνει το κόστος προμήθειας, μεταφοράς και αποθήκευσης του καυσίμου, το κόστος μετατροπής του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια καθώς και το κόστος συντήρησης του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για την λειτουργία του σταθμού παραγωγής [3.5].

Το κόστος ενέργειας μεταβάλλεται κατά την διάρκεια λειτουργίας του μετασχηματιστή. Επομένως, κρίνεται αναγκαίος ο υπολογισμός του ισοκατανεμημένου ετησίου κόστους ενέργειας. Αρχικά υπολογίζεται, μέσα από την κλιμακωτή αύξηση του ετησίου κόστους ενέργειας, ο συντελεστής της παρούσας αξίας (PWIS) του κόστους της ενέργειας σε όλα τα χρόνια λειτουργίας του μετασχηματιστή με καθορισμένες τιμές πληθωρισμού και επιτοκίων. Έπειτα, πραγματοποιείται πολλαπλασιασμός του συντελεστή απόσβεσης κεφαλαίου (CRF) με τον συντελεστή της παρούσας αξίας του κόστους ενέργειας και λαμβάνεται ο κλιμακωτός συντελεστής (EF). Τέλος, πραγματοποιείται πολλαπλασιασμός του κλιμακωτού συντελεστή με το κόστος της ενέργειας του πρώτου έτους λειτουργίας του μετασχηματιστή και προκύπτει το ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος της ενέργειας. Ο όρος κλιμακωτός συντελεστής δεν είναι απόλυτα σωστός, διότι είναι ένας σταθερός συντελεστής για n χρόνια λειτουργίας του μετασχηματιστή, απλά χρησιμοποιείται για την περιγραφή της κλιμακωτής μεταβολής του κόστους ενέργειας και να προκύψει το ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος της ενέργειας. Ο κλιμακωτός συντελεστής υπολογίζεται από την σχέση 3.9.

$$EF = \left[\frac{n}{1+i} \right] \cdot CRF \quad \text{αν } a = i$$

Και (3.9)

$$EF = \left[\frac{1 - \left(\frac{1+a}{1+i} \right)^n}{i-a} \right] \cdot CRF \quad \text{αν } a \neq i$$

Όπου a ο πληθωρισμός, i το επιτόκιο προεξοφλήσεως, n ο κύκλος ζωής του μετασχηματιστή (χρόνια) και CRF ο συντελεστής απόσβεσης που υπολογίζεται από την σχέση 3.10.

$$CRF = \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3.10)$$

Το ζητούμενο, δηλαδή το ετήσιο κόστος της ενέργειας ισούται με το κόστος ενέργειας του πρώτου χρόνου πολλαπλασιασμένο με τον κλιμακωτό συντελεστή ενέργειας (EF).

$$\text{Ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος} = EF \cdot \text{κόστος ενέργειας του πρώτου χρόνου} \quad (3.11)$$

Ο συντελεστής ετησίου κόστους αναφέρεται στα πάγια έξοδα της επιχείρησης και εκφράζεται ως ποσοστό (%) επί της επένδυσης [3.1]. Επομένως, αν πολλαπλασιαστεί ο συντελεστής ετησίου κόστους με την τιμή της επένδυσης του μετασχηματιστή, υπολογίζεται το ετήσιο κόστος του. Αναφέρονται τα προ τους φόρους πάγια έξοδα, τις αποσβέσεις του κεφαλαίου, τα ασφάλιστρα και υπολογίζονται με σταθερό επιτόκιο προεξόφλησης [3.9].

3.4.2 Υπολογισμός συντελεστή B

Ο συντελεστής B εκφράζει το κόστος απωλειών φορτίου. Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιείται σχέση 3.12.

$$B = \frac{SC \cdot RF + 8760 \cdot EC \cdot LF}{FC} \cdot \frac{(PL)^2}{1000} \text{ σε €/Watt} \quad (3.12)$$

Όπου RF ο συντελεστής ευθύνης (μέτρο της ανομοιομορφίας του φορτίου του μετασχηματιστή), LF ο ετήσιος συντελεστής απωλειών και PL η ετήσια ομοιόμορφη αιχμή φορτίου του μετασχηματιστή.

Ο συντελεστής ευθύνης (RF) μειώνει την απαιτούμενη παραγωγική ικανότητα του συστήματος για τις απώλειες φορτίου, καθώς οι μέγιστες απώλειες του μετασχηματιστή δεν συμβαίνουν απαραίτητα τη στιγμή της αιχμής φορτίου [3.5]. Ο συντελεστής ευθύνης περιγράφεται στην σχέση 3.13.

$$RF = \sqrt{\frac{TL_{SPL}}{TL_{TPL}}} \quad (3.13)$$

όπου TL_{SPL} το φορτίο του μετασχηματιστή τη στιγμή της αιχμής φορτίου του συστήματος και TL_{TPL} η αιχμή φορτίου του μετασχηματιστή.

Ο ετήσιος συντελεστής απωλειών (LF) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των ετήσιων απωλειών των μετασχηματιστών διανομής. Ο συντελεστής απωλειών προκύπτει από την σχέση:

$$LF = 0.15 \cdot I_f + 0.85 \cdot (I_f^2) \quad (3.14)$$

Όπου I_f ο ετήσιος συντελεστής φορτίου και ισούται με τον λόγο της ενέργειας που καταναλώνεται λόγω της φόρτισης των μετασχηματιστών, προς την ενέργεια που θα καταναλωνόταν, υπό την υπόθεση ότι οι μετασχηματιστές ήταν συνεχώς υπό φόρτιση με το μέγιστο φορτίο.

Η ανοιγμένη αιχμή φορτίου που τροφοδοτεί ο μετασχηματιστής, αποτελεί την ετήσια ομοιόμορφη αιχμή του φορτίου μετασχηματιστή (PL). Για τον υπολογισμό της, χρειάζεται αρχικά προσδιορισμός της αιχμής φορτίου για τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του μετασχηματιστή, εκτίμηση του ετησίου ρυθμού αύξησης του φορτίου αιχμής και ορισμός της μέγιστης τιμής φορτίου στην οποία μπορεί να λειτουργήσει ο μετασχηματιστής [3.10]. Ο μαθηματικός υπολογισμός της ετήσιας ομοιόμορφης αιχμής, υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση (3.15).

$$PL = \left(\left\{ \sum_{j=1}^n [b(1+g)^{(j-1)}]^2 SPPWF \right\} CRF \right)^{1/2} \quad (3.15)$$

Όπου n τα χρόνια λειτουργίας του μετασχηματιστή μέχρι την αντικατάστασή του, I το επιτόκιο, b η αρχική αιχμή φορτίου τον πρώτο χρόνο, g ο ρυθμός αύξησης της αιχμής φορτίου, $SPPWF$ ο συντελεστής παρούσας αξίας και CRF ο συντελεστής απόσβεσης.

3.4.3 Επίδραση κόστους των απωλειών στον αγοραστή

Το κόστος των απωλειών αποτελεί κριτήριο μεγάλης σημασίας στην επιλογή των μετασχηματιστών, καθώς μπορεί να επηρεάσει την απόφαση του αγοραστή. Συνήθως οι αποδοτικοί μετασχηματιστές (δηλαδή ο μετασχηματιστές με μικρές απώλειες), έχουν μεγάλο κόστος αγοράς. Όμως, η αγορά τους δεν αποτελεί πάντα την πιο συμφέρουσα οικονομική επιλογή. Τα χρήματα που εξοικονομούνται από τις μειωμένες απώλειες πιθανώς αντισταθμίζονται από το υψηλό κόστος αγοράς του μετασχηματιστή, καθιστώντας την αγορά τους ασύμφορη. Η επίλυση του προβλήματος πραγματοποιείται με την χρήση του κριτηρίου τελικού κόστους κατοχής, που υπολογίζεται με την βοήθεια των συντελεστών A και B [3.5]. Το τελικό κόστος κατοχής δίνεται από την σχέση 3.16 και εκφράζει το συνολικό κόστος του μετασχηματιστή για όλη την διάρκεια της λειτουργίας του.

$$TOC=C+D+A*NLL+B*LL \quad (3.16)$$

Όπου C(€) το κόστος αγοράς του μετασχηματιστή, NLL(watt) οι απώλειες κενού φορτίου, LL(watt) οι απώλειες φορτίου και D(€) το κόστος των απωλειών του βοηθητικού εξοπλισμού.

Οι συντελεστές A και B εξαρτώνται από την μέθοδο κατασκευής, την ποιότητα, και τις προδιαγραφές του μετασχηματιστή. Οι προδιαγραφές των μετασχηματιστών αναφέρονται στην δυνατότητα υπερφόρτωσης, την ικανότητα μόνωσης, την αντοχή στο βραχυκύκλωμα, τη συνδεσμολογία και τις συνθήκες λειτουργίας. Επομένως, οι συντελεστές διαμορφώνονται από τον κατασκευαστή με τρόπο ώστε να συμπεριλαμβάνουν τα κόστη κατασκευής και υλικών του μετασχηματιστή [3.1].

3.5.1 Παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος αγοράς μετασχηματιστών

Ο κυριότερος παράγοντας που επηρεάζει το κόστος αγοράς ενός μετασχηματιστή είναι το φορτίο ενέργειας που πρόκειται να δεχθεί κατά την λειτουργίας του. Αυτό το βασικό κριτήριο καθορίζει το είδος του μετασχηματιστή που χρειάζεται να τοποθετηθεί σε κάθε θέση εγκατάστασης. Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μια συνεχή αύξηση του φορτίου ενέργειας, η οποία εξαρτάται από κοινωνικές, οικονομικές και επιστημονικές συνθήκες. Μερικοί από τους παράγοντες που επηρεάζουν το ποσοστό αύξησης του φορτίου είναι:

- Τα αποθέματα ενέργειας και ζήτησης
- Η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος και η διαθεσιμότητα του
- Η επάρκεια πηγών παραγωγής και η επάρκεια καυσίμου
- Η κυβερνητική πολιτική
- Ο ανταγωνισμός των εταιριών παραγωγής

- Η αυξημένη χρήση του ηλεκτρισμού

Εκτός από την αύξηση του φορτίου, ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας επιρροής του κόστους αγοράς ενός μετασχηματιστή είναι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Το κόστος απωλειών ενός μετασχηματιστή επηρεάζει το συνολικό κόστος κατοχής, καθώς εμπλέκεται με το κόστος αγοράς του. Οι απώλειες των μετασχηματιστών οφείλονται στην ηλεκτρική ενέργεια που χάνεται κατά την λειτουργία τους, επομένως όσο μεγαλύτερο είναι το κόστος της ενέργειας, τόσο μεγαλύτερο είναι και το κόστος των απωλειών, άρα και το κόστος αγοράς των μετασχηματιστών. Η εκτίμηση του μελλοντικού κόστους ενέργειας είναι σπουδαίο και κρίσιμο έργο, ιδίως στην εποχή μας. Ακόμη δυσκολότερο έργο είναι η εκτίμηση της ενέργειας για τις επόμενες τρεις δεκαετίες, όσο δηλαδή είναι η διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή. Με την ίδια λογική λειτουργεί και ο κατασκευαστής μετασχηματιστών, καθώς γνωρίζει με την πώληση ενός αποδοτικού μετασχηματιστή θα παρουσιαστεί χρηματικό όφελος στον αγοραστή από την εξοικονόμηση ενέργειας. Με το παραπάνω κριτήριο, διαμορφώνονται οι τιμές πώλησης των μετασχηματιστών.

3.6 Βιβλιογραφία

- [3.1] Barry W. Kennedy, “Energy Efficient Transformers”, McGraw-Hill, New York, 1998.
- [3.2] Hugh D. Young, “Ηλεκτρομαγνητισμός Οπτική Σύγχρονη Φυσική”, Τόμος Β, Εκδόσεις Παπαζήση, Αθήνα, 1994.
- [3.3] Chalmers University of Technology, EM4: Magnetic Hysteresis, April 2003.
- [3.4] Α. Τσιβγούλη, “Μελέτη απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών ισχύος με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων”, Διπλωματική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2006.
- [3.5] Π.Σ Γεωργιλάκης, Ν. Δ. Χατζηαργυρίου, “Οικονομική Αξιολόγηση Μετασχηματιστών Διανομής”, Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, ΙΙΙ, τεύχος 1-2, 2000, σελ. 51-62.
- [3.6] Energy Efficiency and Renewable Energy, Chapter 4: Screening Analysis, July 2004.
- [3.7] N. D. Hatziaargyriou, P. S. Georgilakis, D. S. Spiliopoulos and J. A. Bakopoulos, “Quality Improvement of Individual Cores of Distribution Transformers Using Decision Trees ”, Int. Journal of Engineering Intelligent Systems, vol23, no 1-3, December 1998, pp. 15-29.
- [3.8] Π. Σ. Γεωργιλάκης, “Συμβολή μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης στη μείωση των απωλειών κενού φορτίου μετασχηματιστών διανομής”, διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000.
- [3.9] 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. PAS-100, No2, February 1981.
- [3.10] A. M. Bozarth, D. A. Duckett and W. J. Ros, “Guide for Evaluation of Distribution Transformers”, Schenectady, N.Y.:CE, 1994

Κεφάλαιο 4 – Οικονομική αξιολόγηση μετασχηματιστών

4.1 Κόστος μετασχηματιστών.

Σύμφωνα με την ενότητα 3 το συνολικό κόστος των μετασχηματιστών ή αλλιώς το συνολικό κόστος κατοχής μετασχηματιστών (TOC), δεν απαρτίζεται μόνο από το κόστος αγοράς του μετασχηματιστή, αλλά συμπεριλαμβάνει και το κόστος των απωλειών. Επομένως κρίνεται αναγκαίο να αναπτυχθούν μέθοδοι, οι οποίοι οφείλουν να εξετάζουν το κόστος αγοράς και τα οφέλη που παρουσιάζονται από την απόδοση του [4.1]. Δηλαδή, πραγματοποιείται σύγκριση του βαθμού απόδοσης των μετασχηματιστών σε σχέση με την τιμή αγοράς τους. Επίσης, οφείλει να λαμβάνεται υπόψη η αξία του χρήματος για τις τρεις επόμενες δεκαετίες, δηλαδή για όλη την διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή [4.2]. Υπάρχουν τρεις βασικοί μέθοδοι υπολογισμού του κόστους κατοχής μετασχηματιστών (TOC):

- Ισοδύναμο κόστος επένδυσης
- Ισοκατανεμημένο ετήσιο κόστος
- Μέθοδος της παρούσας αξίας

Οι παραπάνω μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την επιλογή του αποδοτικότερου μετασχηματιστή από οικονομική άποψη. Η μέθοδος που θα επιλεγεί να χρησιμοποιηθεί από τον αγοραστή οφείλει να είναι εύκολη στην χρήση και να παρέχει κατανοητά και επαρκεί δεδομένα για την πραγματοποίηση της οικονομικότερης αγοράς. Η εφαρμογή της μεθόδου διευκολύνει και τον κατασκευαστή να φτιάξει μετασχηματιστές που ικανοποιούν τις απαιτήσεις των πελατών. Οι τρεις παραπάνω μέθοδοι είναι εξίσου αποτελεσματικοί και η επιλογής χρήσης μιας μεθόδου έγκειται στην προσωπική επιλογή του αγοραστή.

4.2 Κύκλος ζωής

Με την χρήση του όρου κύκλου ζωής, αναφέρεται η διάρκεια λειτουργίας των μετασχηματιστών. Η παράμετρος αυτή θεωρείται κρίσιμη, καθώς κατά τον υπολογισμό του κόστους κατοχής των μετασχηματιστών υπολογίζονται οι χρηματικές δαπάνες που αντιστοιχούν λόγω των απωλειών του μετασχηματιστή. Οι δαπάνες υπολογίζονται για την χρονική διάρκεια στην οποία βρίσκεται σε λειτουργία ο μετασχηματιστής.

Τις περισσότερες φορές ο κύκλος ζωής των μετασχηματιστών ταυτίζεται με την διάρκεια ζωής τους. Την παραπάνω υπόθεση χρησιμοποιούν οι εταιρίες που προβαίνουν στην αγορά των μετασχηματιστών. Ο πραγματικός κύκλος ζωής ορίζεται ως το πραγματικό χρονικό διάστημα λειτουργίας του μετασχηματιστή, δηλαδή αρχίζει από την σύνδεση του με το δίκτυο διανομής μέχρι την στιγμή της αντικατάστασης του. Η αντικατάσταση πιθανώς οφείλεται λόγω βλάβης, υπερφόρτωσης ή υψηλών απωλειών. Ο πραγματικός χρόνος αντικατάστασης πρέπει να ενσωματωθεί στον υπολογισμό της οικονομικής αξιολόγησης του. Σύμφωνα με Ευρωπαϊκές μελέτες των εταιριών διανομής ενέργειας, ο κύκλος ζωής των μετασχηματιστών ανέρχεται σε 32 χρόνια λειτουργίας. Επομένως, τα 30 χρόνια λειτουργίας είναι μια καλή προσέγγιση του κύκλου ζωής ενός μετασχηματιστή.

Υπάρχουν παράγοντες που επηρεάζουν τον κύκλο ζωής των μετασχηματιστών. Η βασική αιτία μείωσης του προκαλείται λόγω της φθοράς του μονωτικού υλικού των μετασχηματιστών. Η φθορά του μονωτικού υλικού προκαλείται συνήθως από την υψηλή θερμοκρασία και την υπερβολική φόρτιση. Η αύξηση της θερμοκρασίας και γενικά η προβληματική ψύξη των μετασχηματιστών αποτελεί τον μεγαλύτερο εχθρό του κύκλου ζωής, καθώς προκαλεί την μεγαλύτερη φθορά των υλικών και επομένως περισσότερη φθορά στην μόνωση. Η υπερβολική φόρτιση των μετασχηματιστών επιφέρει μεταβολή της διάρκειας λειτουργικής ζωής τους. Κάθε μετασχηματιστής είναι σχεδιασμένος ώστε να μεταχειρίζεται ένα συγκεκριμένο μέγιστο φορτίο. Σε περίπτωση τροφοδοσίας με μεγαλύτερο φορτίο, επακολουθεί μείωση της διάρκειας ζωής, ενώ στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή στην τροφοδοσία με μικρότερο φορτίο, παρατηρείται αύξηση της. Οι προαναφερόμενοι παράγοντες είναι ικανοί να επιφέρουν μείωση της διάρκειας ζωής σε 20 χρόνια, καθώς επίσης μπορούν να επιφέρουν μόνιμη βλάβη σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα.

Η αντικατάσταση των μετασχηματιστών, πριν από την λήξη της διάρκειας ζωής του, προκαλείται λόγω ελαττωμάτων ή παύσης της λειτουργίας τους. Υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες πραγματοποιείται αλλαγή ενός μετασχηματιστή, χωρίς όμως να έχει υποστεί κάποια βλάβη. Η αντικατάσταση αυτή οφείλεται συνήθως λόγω της αύξησης φορτίου που δέχεται. Σε αυτήν την περίπτωση, συνήθως τοποθετείται ένας μετασχηματιστής μεγαλύτερης ισχύς (kVA) ώστε να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις του δικτύου. Εναλλακτικά, υπάρχει η επιλογή της προσθήκης ενός δεύτερου μετασχηματιστή σε παράλληλη σύνδεση. Μια ακόμη περίπτωση είναι η αντικατάσταση ενός μετασχηματιστή με έναν αποδοτικότερο. Η αλλαγή συνήθως πραγματοποιείται μετά από την παρατήρηση μεγάλων απωλειών στο δίκτυο διανομής και ιδιαίτερα όταν η παραγωγή ενέργειας στοιχίζει ακριβά. Με την περιορισμό των απωλειών παρέχεται εξοικονόμηση ενέργειας και επομένως εξοικονόμηση χρημάτων.

4.3 Χρονική αξία του χρήματος

Η έννοια της χρονικής αξίας το χρήματος αναφέρεται στην αύξηση της αξίας των χρημάτων και αποτελεί ένα σημαντικό μέρος της αξίας αποτίμησης των

μετασχηματιστών. Η αξία των χρημάτων εξαρτάται κυρίως από το επιτόκιο της επένδυσης (πχ. Τραπεζικό επιτόκιο της τάξεως του 5%). Η συμμετοχή της χρονικής αξίας των χρημάτων στα κριτήρια αποτίμησης θεωρείται σημαντική, καθώς η αξία των χρημάτων μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου. Επομένως, μεταβάλλεται η αξία των ίδιων των μετασχηματιστών και του κόστους των απωλειών τους.

4.4 Μέθοδοι υπολογισμού κόστους επένδυσης

4.4.1 Μέθοδος ισοδύναμου κόστους επένδυσης

Η μέθοδος ισοδύναμου κόστους επένδυσης είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος οικονομικής αξιολόγησης μετασχηματιστών. Για την εφαρμογή της χρησιμοποιείται η σχέση συνολικού κόστους κτήσης των μετασχηματιστών, προσθέτοντας έναν ακόμα παράγοντα: τον πολλαπλασιαστή απωλειών (LM), ο οποίος εκφράζει την επίδραση των απωλειών μεταφοράς και διανομής στον εξοπλισμό της παραγωγής [4.3]. Η σχέση 4.1 περιγράφει το ισοδύναμο κόστος επένδυσης.

$$TOC = BP + NLL_cost + LL_cost \quad (4.1)$$

Όπου BP η τιμή αγοράς των μετασχηματιστών, NLL_cost το κόστος απωλειών κενού φορτίου, LL_cost το κόστος απωλειών φορτίου. Για τον υπολογισμό των παραπάνω, χρησιμοποιούνται οι σχέσεις:

$$NLL_cost = A \cdot (1 + LM) \cdot NLL \quad (4.2)$$

$$LL_cost = B \cdot (1 + LM) \cdot LL \quad (4.3)$$

Οι τιμές των συντελεστών A και B υπολογίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις (3.8) και (3.12). Έπειτα, υπολογίζεται το συνολικό κόστος κατοχής (TOC) για κάθε μετασχηματιστή και ως οικονομικότερος μετασχηματιστής επιλέγεται εκείνος με την μικρότερη τιμή.

Για την καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων, πραγματοποιείται ο υπολογισμός εξοικονόμησης ενέργειας (Watt/έτος). Επιλέγεται ως βασικός μετασχηματιστής εκείνος που παρουσιάζει το μεγαλύτερο TOC. Στην συνέχεια υπολογίζονται οι απώλειες ισχύος (Watt), οι ετήσιες απώλειες ενέργειας (kWh/έτος) και το ετήσιο κόστος απωλειών (€/έτος) σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$Watt_losses = NLL + (If)^2 \cdot LL \quad (4.4)$$

$$Energy_losses = \frac{(Watt_losses)}{1000} \cdot HPY \quad (4.5)$$

$$Energy_cost = Energy_losses \cdot EC \quad (4.6)$$

Θεωρώντας ότι συγκρίνεται ένας μετασχηματιστής X με έναν μετασχηματιστή Y, πραγματοποιείται η σύγκριση των δυο μετασχηματιστών σύμφωνα με την σχέση:

$$Energy_saving = (Energy_cost_x - Energy_cost_y) \quad (4.7)$$

4.4.2 Μέθοδος ισοκατανεμημένου ετησίου κόστους

Η μέθοδος ισοκατανεμημένου ετησίου κόστους περιλαμβάνει την μετατροπή κάθε συστατικού της εξίσωσης του συνολικού κόστους κατοχής (TOC) σε ισοκατανεμημένα κόστη για όλη την διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή. Για την πραγματοποίηση της παραπάνω μετατροπής, χρησιμοποιείται ο συντελεστή ετησίου κόστους (FCR) [4.4], ο οποίος πολλαπλασιάζεται με όλα τα μέλη της εξίσωσης συνολικού κόστους κατοχής (TOC).

$$TOC = FCR * (BP + cost_NLL + cost_LL) \quad (4.8)$$

Όπου BP (€) το κόστος αγοράς του μετασχηματιστή, cost_NLL (€) το κόστος των απωλειών κενού φορτίου και cost_LL (€) το κόστος απωλειών φορτίου.

Η οικονομική αξιολόγηση οφείλει να χρησιμοποιεί τον ίδιο συντελεστή ετησίου κόστους για κάθε προμηθευτή. Συγκρίνοντας τις τιμές του συνολικού κόστους κατοχής των μετασχηματιστών, επιλέγεται εκείνος με την μικρότερη τιμή και γίνεται δεκτός ως τον πιο οικονομικό μετασχηματιστή.

4.4.3 Μέθοδος της παρούσας αξίας

Με την μέθοδο της παρούσας αξίας, κάθε παράγοντα του συνολικού κόστους κατοχής (TOC) εκφράζεται σε ετήσια κόστη εξίσου κατανεμημένα και επιπλέον μετατρέπονται τα κόστη σε παρούσα αξία. Δηλαδή υπολογίζεται η σημερινή αξία του ετησίου κατανεμημένου κόστους κάθε παραμέτρου της σχέσης 4.1. Η μέθοδος της παρούσας αξίας περιγράφεται από την σχέση 4.9.

$$TOC = USPW * FCR * (BP + cost_NLL + cost_LL) \quad (4.9)$$

Η μετατροπή των παραπάνω παραγόντων σε τωρινή αξία πραγματοποιείται με την χρήση του συντελεστή της παρούσας αξίας (USPW), ο οποίος δίνεται από την σχέση 4.10.

$$USPW = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (4.10)$$

Όπου i το επιτόκιο και n η διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή. Ο κύκλος ζωής του μετασχηματιστή παραμένει σταθερός, όπως επίσης και ο συντελεστής ετησίου κόστους επένδυσης.

Ομοίως, σε αυτήν την μέθοδο συγκρίνονται οι τιμές του συνολικού κόστους κατοχής και επιλέγεται ο μετασχηματιστής με το μικρότερο κόστος. Καθώς όλοι οι όροι της εξίσωσης πολλαπλασιάζονται με τον συντελεστή της παρούσας αξίας, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την οικονομική αξιολόγηση οφείλουν να συμπίπτουν με τα αποτελέσματα της μεθόδου ισοκατανεμημένου ετησίου κόστους.

4.5 Βιβλιογραφία

- [4.1] Barry W. Kennedy, Energy Efficient Transformers, McGraw-Hill, New York, 1998.
- [4.2] Φ. Π. Τοπαλής, Κ. Μπουρούσης, «Εξοικονόμηση ενέργειας στους μετασχηματιστές διανομής». Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [4.3] P. S. Georgilakis, “Decision Support System for Evaluating Transformer Investments in the Industrial Sector”, Journal of Materials Processing Technology 181 (2007)307-312.
- [4.4] D. L. Nickel and H. R. Braunstein, “Distribution Transformer Loss Evaluation: I – Proposed Techniques”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, No2, February 1981.

Κεφάλαιο 5 – Αντικατάσταση μετασχηματιστών

5.1 Αντικατάσταση μετασχηματιστών

Η αντικατάσταση ενός μετασχηματιστή είναι σύνθετη διαδικασία, καθώς εξαρτάται από την κατάσταση του υποψήφιου προς αντικατάσταση μετασχηματιστή και από τις ανάγκες του δικτύου [5.1.] Επίσης, είναι εφικτή η αντικατάσταση μετασχηματιστών διανομής παλαιάς τεχνολογίας με μετασχηματιστές υψηλής ενεργειακής απόδοσης. Η αντικατάσταση αυτή πραγματοποιείται μόλις τα τελευταία χρόνια από τις τεχνολογικά αναπτυγμένες χώρες, με στόχο την μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση της περιβαλλοντολογικής μόλυνσης. Στην Ελλάδα, η παραπάνω αντικατάσταση δεν είναι ιδιαίτερα εφαρμόσιμη, λόγω του υψηλού κόστους αγοράς μεγάλων ποσοτήτων αποδοτικών μετασχηματιστών.

Με τον όρο αντικατάσταση ενός μετασχηματιστή, αναφέρεται είτε η αντικατάσταση συγκεκριμένων εξαρτημάτων με άλλα αποδοτικότερα, είτε η αντικατάσταση ολόκληρης της μονάδας του μετασχηματιστή. Αρχικά εξετάζονται τα ελαττωματικά εξαρτήματα των μετασχηματιστών και έπειτα αντικαθίστώνται όταν είναι εφικτό. Σε περίπτωση που η επιδιόρθωση δεν είναι εφικτή, είτε το κόστος επιδιόρθωσης είναι υπερβολικά μεγάλο, τότε πραγματοποιείται αντικατάσταση ολόκληρης της μονάδας. Είναι λογικό ότι η αντικατάσταση της μονάδας ενός μετασχηματιστή είναι περισσότερο δαπανηρή από την αντικατάσταση μεμονωμένων εξαρτημάτων του. Οι επιλογές που αφορούν την αντικατάσταση των μετασχηματιστών είναι :

- Η νέα μόνωση,
- η νέα περιτύλιξη,
- η ανακαίνιση εξαρτημάτων
- ο νέος μετασχηματιστής.

Η επικρατούσα επιλογή διαμορφώνεται σύμφωνα με οικονομική μελέτη. Η οικονομική μελέτη στηρίζεται στην εξίσωση του συνολικού κόστους κατοχής των μετασχηματιστών, υπολογίζει το κόστος αντικατάστασης κάθε επιλογής και επιλέγει εκείνη με το μικρότερο συνολικό κόστος [5.2]. Η προσθήκη της εξίσωσης συνολικού κόστους θεωρείται αναγκαία, καθώς τα αποτελέσματα της μελέτης οφείλουν να αναφέρονται σε κόστη παρούσας αξίας, ώστε να πραγματοποιείται άμεσα η σύγκριση τους. Η σωστή επιλογή της αντικατάστασης ενός μετασχηματιστή περιλαμβάνει δύο παραμέτρους. Η πρώτη παράμετρος εξετάζει το κόστος της επένδυση έναντι της εξοικονόμησης ενέργειας που πετυχαίνεται, ενώ η δεύτερη παράμετρος σχετίζεται με την αύξηση της διάρκειας ζωής του μετασχηματιστή. Επομένως οι δυο κύριοι συντελεστές είναι το κόστος επισκευής ή αντικατάστασης του μετασχηματιστή από έναν

νέο και ο υπολειπόμενος χρόνος ζωής του μετασχηματιστή, ο οποίος υπολογίζεται προσεγγιστικά.

Οι περισσότερες εταιρίες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν αναπτύξει προγράμματα που υπολογίζουν την αντικατάσταση των μετασχηματιστών. Τα κύρια κριτήρια που απασχολούν τις εταιρίες είναι η διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή, η ικανότητα διαχείρισης του φορτίου και το κόστος των απωλειών. Σε δεύτερη μοίρα λαμβάνονται υπόψη κριτήρια όπως η εξοικονόμηση ενέργειας και η περιβαλλοντολογική μόλυνση. Η παραπάνω αντίληψη ενδέχεται να χαρακτηριστεί εσφαλμένη, καθώς τα ποσά ενέργειας που μπορούν να εξοικονομηθούν από την χρήση αποδοτικών μετασχηματιστών στην θέση των τωρινών, είναι σημαντικά και συγκρίσιμα με το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η επιλογή της αντικατάστασης ή της επισκευής των μετασχηματιστών λαμβάνεται από την εκάστοτε εταιρία που έχει στην κατοχή της τον ελαττωματικό μετασχηματιστή και εξαρτάται από την στρατηγική που ακολουθείται. Συνήθως υπάρχουν τυποποιημένες οδηγίες που καθορίζουν σε ποιες περιπτώσεις πρέπει να γίνει η αντικατάσταση ολόκληρης της μονάδας. Οι οδηγίες σχετίζονται με την γενική επιθεώρηση του μετασχηματιστή και ειδικότερα την εξέταση του μονωτικού υλικού, την εξέταση του λαδιού, την μέτρηση του λόγου μετασχηματισμού, την μέτρηση της τάσης βραχυκύκλωσης, την μέτρηση ρεύματος μαγνήτισης και την μέτρηση των απωλειών κενού φορτίου και φορτίου. Για την αντιμετώπιση του παραπάνω διλήμματος, κρίνεται αναγκαία η εκτίμηση της κατάστασης του παλαιού μετασχηματιστή, ο υπολογισμός του κόστους πιθανής πώλησης του ή το όφελος από την ανακύκλωση των υλικών του. Η χρηματική αξία μεταπώλησης οφείλει να αφαιρεθεί από το συνολικό κόστος κατοχής του νέου μετασχηματιστή. Η παραπάνω αφαίρεση επιτυγχάνεται με την χρήση του συντελεστή SV [5.2].

$$SV = BP_{\text{new}} - BP_{\text{old}} \quad (5.1)$$

Όπου BP_{new} το κόστος αγοράς του νέου μετασχηματιστή και BP_{old} το κέρδος από την αξιοποίηση του παλαιού. Επομένως, η εξίσωση συνολικού κόστους κατοχής αλλάζει, καθώς πρέπει να συμπεριληφθεί ο συντελεστή SV. Η νέα μορφή της δίνεται από την σχέση 5.2.

$$TOC_{\text{rep}} = SV + \text{cost_NLL}_{\text{rep}} + \text{cost_LL}_{\text{rep}} \quad (5.2)$$

Όπου TOC_{rep} το συνολικό κόστος κατοχής μετά την αντικατάσταση, SV το κόστος αγοράς της νέας μονάδας μετά από την αξιοποίηση της παλαιάς, $\text{cost_NLL}_{\text{rep}}$ και $\text{cost_LL}_{\text{rep}}$ είναι το κόστος απωλειών κενού φορτίου και φορτίου αντίστοιχα του νέου μετασχηματιστή.

Το επόμενο βήμα αφορά την σύγκριση του κόστους συνολικής κατοχής μετά από την αντικατάσταση του μετασχηματιστή (TOC_{rep}) με το κόστος συνολικής κατοχής στην περίπτωση που δεν πραγματοποιηθεί αντικατάσταση (TOC). Συγκρίνοντας τα δύο κόστη προκύπτει σαφής και αντικειμενική εικόνα του προβλήματος και ως βέλτιστη επιλογή

θεωρείται η εναλλακτική που παρουσιάζει το μικρότερο κόστος. Η εμπειρία έχει δείξει ότι εφόσον ένας ελαττωματικός μετασχηματιστής είναι μικρός σε ηλικία (πχ. 10 έτη λειτουργίας), τότε επιλέγεται η επισκευή του. Εν αντιθέσει, εάν ο μετασχηματιστής είναι μεγαλύτερης ηλικίας (πχ. περισσότερο από 20 έτη λειτουργίας) τότε η βέλτιστη λύση είναι η αντικατάσταση του με έναν νέο [5.3-5.4].

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι οι εταιρίες διανομής ηλεκτρικού ρεύματος (στην προκειμένη περίπτωση η ΔΕΗ), δεν αναλαμβάνουν την επισκευή των ελαττωματικών μετασχηματιστών. Οι ελαττωματικοί μετασχηματιστές αποθηκεύονται ξεχωριστά και όταν συμπληρωθεί επαρκής ποσότητα ελαττωματικών μετασχηματιστών, τότε μόνο αποστέλλονται στην κατασκευάστρια εταιρία για επισκευή. Επομένως, η χρονική διάρκεια επισκευής των μετασχηματιστών ποικίλει και μπορεί να παραταθεί για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Στην περίπτωση που εξετάζεται το πρόβλημα της αντικατάστασης ενός ελαττωματικού μετασχηματιστή, από την σκοπιά μιας εταιρίας διανομής, η επιλογή της αντικατάστασης είναι πλέον μονόδρομος. Η αποκοπή ενός μετασχηματιστή από το δίκτυο διανομής, δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς την άμεση αντικατάσταση του. Σε αντίθετη περίπτωση προκαλείται δυσλειτουργία στο δίκτυο, καθώς διακόπτεται η τροφοδοσία του υπο-δικτύου που βρίσκεται συνδεδεμένο με την έξοδο του μετασχηματιστή.

5.2 Παράγοντες αντικατάστασης μονάδας μετασχηματιστών

Η στρατηγική αντικατάστασης των μετασχηματιστών κάθε εταιρίας ποικίλει ανάλογα με τις ανάγκες της και την πολιτική που ακολουθεί. Ωστόσο, οι βασικοί παράγοντες που διαμορφώνουν την ανάγκη για αντικατάσταση ενός μετασχηματιστή είναι κοινοί: οι βλάβες του μετασχηματιστή, η ηλικία του, το φορτίο του, και η μελλοντική αύξηση του φορτίου.

5.2.1 Αντικατάσταση λόγω βλάβης

Ένας μετασχηματιστής θεωρείται ότι έχει υποστεί βλάβη, όταν παρατηρείται σημαντική μείωση της απόδοσης του, είτε όταν διακοπεί εντελώς τη λειτουργία του. Τα αίτια που προκαλούν τις βλάβες ποικίλουν, καθώς μπορεί να προκληθούν είτε από λανθασμένους ανθρώπινους χειρισμούς (δυσλειτουργία του δικτύου, κακή συντήρηση μετασχηματιστών), είτε από αίτια της φύσης (καταιγίδες, κεραυνούς).

Σε περίπτωση βλάβης ενός ή περισσοτέρων εξαρτημάτων μετασχηματιστών, πραγματοποιείται διάγνωση της βλάβης από τεχνολογικά εκπαιδευμένους μηχανικούς. Από την διάγνωση προκύπτει αν κρίνεται απαραίτητη η αντικατάσταση ενός εξαρτήματος, είτε ολόκληρης της μονάδας του μετασχηματιστή. Σε περίπτωση που είναι εφικτή η αντικατάσταση μόνο των εξαρτημάτων, το κόστος αντικατάστασης μειώνεται σημαντικά.

Το έργο της επισκευής των μετασχηματιστών αναλαμβάνεται εξολοκλήρου από τις κατασκευάστριες εταιρίες. Οι εταιρίες διανομής ηλεκτρικού ρεύματος δεν έχουν στην υπηρεσία τους καταρτισμένους μηχανικούς ώστε να πραγματοποιήσουν τις επιδιορθώσεις. Επομένως, όταν παρουσιαστεί βλάβη στην λειτουργία ενός μετασχηματιστή, γίνεται άμεσα η αντικατάσταση του με την χρήση ενός εφεδρικού. Δηλαδή όταν παρουσιαστεί βλάβη σε μετασχηματιστή, αυτόματα μεταφράζεται σε αντικατάσταση του μετασχηματιστή.

5.2.2 Αντικατάσταση λόγω ηλικίας

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ηλικία των μετασχηματιστών αποτελεί καθοριστικό παράγοντα στην αντικατάσταση των μετασχηματιστών. Επ' αυτού, οι εταιρίες διανομής ηλεκτρικού ρεύματος εισάγουν την παράμετρο της ηλικίας των μετασχηματιστών στο πρόγραμμα αντικατάστασης τους. Ο μέσος χρόνος ηλικίας των μετασχηματιστών υπολογίζεται στα 30 χρόνια, καθώς η διάρκεια ζωής ενός μετασχηματιστή κυμαίνεται από 20 έως 35 έτη.

Η ηλεκτρική φόρτιση των μετασχηματιστών αποτελεί κύριο παράγοντα και είναι υπεύθυνος για την μεταβολή του χρόνου ζωής των μετασχηματιστών. Εφόσον η φόρτιση είναι μικρότερη από το επιτρεπτό όριο που αναγράφεται στον μετασχηματιστή, τότε ο χρόνος ζωής αυξάνεται. Στην αντίθετη περίπτωση, ο χρόνος ζωής μειώνεται. Η μέγιστη επιτρεπτή χρονική διάρκεια φόρτισης των μετασχηματιστών είναι ανάλογη με το πρόσθετο φορτίο που λαμβάνεται και με την θερμοκρασία λαδιού. Η τιμή της χρονικής διάρκειας δίνεται στον πίνακα 2.3 και υπολογίζεται από τον κατασκευαστή.

Τα εναπομείναντα χρόνια μέχρι την αντικατάσταση των μετασχηματιστών λόγω ηλικίας, μπορούν να υπολογιστούν εμπειρικά με την βοήθεια της σχέσης 5.3.

$$REP_{age} = D_{set} + MT - D_{now} \quad (5.3)$$

Όπου REP_{age} τα απομείναντα χρόνια μέχρι την αντικατάσταση, D_{set} η χρονολογία εγκατάστασης του μετασχηματιστή, MT η μέση διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή και D_{now} η τωρινή χρονολογία. Υπενθυμίζεται ότι η μέση διάρκεια ζωής ενός μετασχηματιστή υπολογίζεται στα 30 έτη.

Η αντικατάσταση των μετασχηματιστών λόγω ηλικίας, είναι έμμεσα εξαρτημένη και με τις απώλειες τους. Οι μετασχηματιστές με μεγάλη ηλικία παρουσιάζουν μεγαλύτερες απώλειες λόγω της παλαιότερης τεχνολογία με την οποία είναι κατασκευασμένοι και της φθοράς των εξαρτημάτων τους. Αντικαθιστώντας του παλαιούς μετασχηματιστές με νεότερους, εξοικονομούνται σημαντικά ποσά ενέργειας και χρημάτων.

5.2.3 Αντικατάσταση λόγω φορτίου

Ο τελευταίος κύριος παράγοντας αντικατάστασης μετασχηματιστών είναι το φορτίου που δέχεται ο μετασχηματιστής. Όπως αναλύεται στην ενότητα 6.3.1, το φορτίο των μετασχηματιστών αυξάνεται κάθε χρόνο. Σύμφωνα με έρευνες, το ποσοστό αύξησης του φορτίου στην νησιωτική Ελλάδα κυμαίνεται στο 3%. Επομένως, δημιουργείται η ανάγκη προσδιορισμού των ετών που απομένουν μέχρι την εξίσωση του φορτίου που παρέχεται από το δίκτυο με το μέγιστο επιτρεπτό φορτίο που διαχειρίζεται ο μετασχηματιστής. Για τον υπολογισμό της χρονικής διάρκειας που απομένει μέχρι την αντικατάσταση του μετασχηματιστή λόγω φορτίου, κρίνεται απαραίτητος ο υπολογισμός της προβλεπόμενης ισχύος των επόμενων ετών. Ο υπολογισμός της προβλεπόμενης ισχύος γίνεται με την εφαρμογή της σχέσης 5.4.

$$P_{prob} = P_{max} \cdot (1 + Pr)^T \quad (5.4)$$

Όπου P_{prob} η προβλεπόμενη ισχύς, P_{max} η μέγιστη ισχύς του προηγούμενου έτους, Pr το ποσοστό αύξησης του φορτίου και T η χρονική διάρκεια (έτη). Μια καλή προσέγγιση της χρονικής διάρκειας της μελέτης είναι τα 5 έτη [6.3-6.4]. Επομένως, μπορεί να πραγματοποιηθεί ο προσδιορισμός της αγοράς μετασχηματιστών για την επόμενη πενταετία.

Η εισαγωγή της παραμέτρου μέγιστης ισχύος του προηγούμενου έτους (P_{max}) κρίνεται αναγκαία, καθώς βοηθά στην αποφυγή πιθανών σφαλμάτων κατά τον υπολογισμό της προβλεπόμενης ισχύος. Τα πιθανά σφάλματα αφορούν το ποσοστό αύξησης του φορτίου. Όπως αναφέρθηκε ήδη, η μέση αύξηση του φορτίου στις νησιωτικές περιοχές υπολογίζεται γύρω στο 3%. Δηλαδή, πραγματοποιείται προσεγγιστική αύξηση του φορτίου κατά 3%. Τα σφάλματα εντοπίζονται σε περιοχές όπου δεν παρουσιάστηκε αύξηση φορτίου ή σε περιοχές όπου η αύξηση ξεπερνά κατά πολύ την προσέγγιση του 3%. Η παράμετρος μέγιστης ισχύος του προηγούμενου έτους (P_{max}) διορθώνει τα παραπάνω σφάλματα, καθώς χρησιμοποιείται η περσινή τιμή της μέγιστης ισχύος και πραγματοποιείται αύξηση του ποσοστού αύξησης. Επομένως, στην περίπτωση που δεν παρουσιάστηκε αύξηση για μια χρονιά και το πλάνο της μελέτης ξεπερνά τα δύο χρόνια, το ποσοστό αύξησης του φορτίου θα παραμείνει 3% και δεν θα διπλασιαστεί. Στην αντίθετη περίπτωση, υπάρχει πιθανότητα ο μετασχηματιστής να βρίσκεται σε περιοχή με μεγάλη ανάπτυξη και η αύξηση του φορτίου να ξεπερνά κατά πολύ την προσέγγιση του 3%. Παρακάτω δίνονται δυο αριθμητικά παραδείγματα που επεξηγούν την σημασία της παραμέτρου μέγιστης ισχύος του προηγούμενου έτους:

Παράδειγμα 1

Θεωρείται ότι υπάρχει εγκαταστημένος μετασχηματιστής των 100 kVA σε μια περιοχή όπου δεν παρουσιάστηκε αύξηση φορτίου. Επίσης γίνεται η υπόθεση ότι η μέγιστη ισχύς του προηγούμενου έτους καταγράφηκε ως 65 kVA. Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προβλεπόμενης φόρτισης, χρησιμοποιώντας ποσοστό αύξησης φορτίου 3%.

Έτος	Προβλεπόμενη φόρτιση (Kva)
2004	66,95
2005	68,96
2006	71,03
2007	73,16
2008	75,35

Πίνακας 5.1 Φορτίσεις σταθερού φορτίου (χωρίς την διόρθωση)

Παρατηρείται ότι κάθε χρόνο η προβλεπόμενη φόρτιση αυξάνεται κατά 3%. Τα αποτελέσματα είναι εσφαλμένα, καθώς ο μετασχηματιστής είναι εγκαταστημένος σε περιοχή με μηδενική αύξηση του φορτίου. Με την προσθήκη του συντελεστή μέγιστης ισχύος του προηγούμενου έτους παρατηρείται διόρθωση των αποτελεσμάτων ως εξής (πίνακας 5.2):

Έτος	Μέγιστη φόρτιση (προηγούμενου έτους)	Προβλεπόμενη φόρτιση (Kva)
2004	65	66,95
2005	65	66,95
2006	65	66,95
2007	65	66,95
2008	66	66,95

Πίνακας 5.2 Φορτίσεις περιοχής σταθερού φορτίου (με την χρήση διόρθωσης)

Παράδειγμα 2

Θεωρείται ο ίδιος μετασχηματιστής (100 kVA) με την ίδια μέγιστη ισχύς του προηγούμενου έτους, (65 Kva). Σε αυτήν την περίπτωση ο μετασχηματιστής είναι εγκαταστημένος σε μια αναπτυσσόμενη περιοχή. Δηλαδή η ποσοστιαία αύξηση φορτίου δεν συμβαδίζει με την ποσοστιαία αύξηση του 3%. Στον πίνακα 5.3 δίνονται τα αποτελέσματα χωρίς την διόρθωση.

Έτος	Μέγιστη φόρτιση (προηγούμενου έτους)	Προβλεπόμενη φόρτιση (Kva)
2004	65	66,95
2005	66,95	68,96
2006	68,96	71,03
2007	71,03	73,16
2008	73,16	75,35

Πίνακας 5.3 - Φορτίσεις περιοχής με αύξηση φορτίου (χωρίς την χρήση διόρθωσης)

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα ταυτίζονται με του παραδείγματος 1. Το γεγονός αυτό είναι απολύτως λογικό, καθώς το φορτίο δεν έχει υποστεί διόρθωση και

θεωρείται ο ρυθμός ανάπτυξης φορτίου ίσος με 3%. Δηλαδή, δεν λαμβάνεται υπόψη το μέγιστο φορτίο του προηγούμενου έτους. Χρησιμοποιώντας την διόρθωση του φορτίου, υπολογίζονται τα αληθή δεδομένα και παρουσιάζονται στον πίνακα 5.4.

Έτος	Μέγιστη φόρτιση (προηγούμενου έτους)	Προβλεπόμενη φόρτιση (Kva)
2004	65	66,95
2005	69	71,07
2006	74	76,22
2007	77	79,31
2008	81	83,43

Πίνακας 5.4 - Φορτίσεις περιοχής με αύξηση φορτίου (με την χρήση διόρθωσης)

Τέλος, προσδιορίζεται η χρονική διάρκεια (έτη) που απομένει μέχρι την αντικατάσταση του μετασχηματιστή λόγω φορτίου. Η χρονική διάρκεια υπολογίζεται με την επίλυση της σχέσης 5.4 ως προς την χρονική διάρκεια (T). Η επίλυση της εξίσωσης δίνεται στην σχέση 5.5.

$$T = \log_{1+Pr} \left(\frac{P_{prob}}{P_{max}} \right) \quad (5.5)$$

Όπου P_{prob} η προβλεπόμενη ισχύς, P_{max} η μέγιστη ισχύς του προηγούμενου έτους, P_r το ποσοστό αύξησης του φορτίου και T η χρονική διάρκεια.

5.3 Επιλογές αντικατάστασης μετασχηματιστών

5.3.1 Νέα περιέλιξη

Η αντικατάσταση της περιέλιξης του πηνίου με νέα περιέλιξη έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διάρκειας ζωής του μετασχηματιστή και τη μείωση των απωλειών του. Η επιλογή αυτή της επισκευής ενός μετασχηματιστή αποτελεί περίπου το 2% του συνόλου των μετασχηματιστών που έχουν ανακαινιστεί. Αν ο πυρήνας σε έναν μετασχηματιστή δεν αντικατασταθεί, τότε οι απώλειες κενού φορτίου συνήθως αυξάνονται, λόγω της φθοράς που έχει υποστεί από τη χρήση του. Αν όμως αντικατασταθεί με χάλυβα λιγότερων απωλειών τότε οι απώλειες κενού φορτίου μειώνονται, ενώ παράλληλα με την αντικατάσταση της περιτύλιξης από μεγαλύτερους ή χάλκινους αγωγούς, παρατηρείται μείωση των απωλειών [6.2].

Το κριτήριο της επιλογής ανάμεσα στην επισκευή και στην πλήρη αντικατάσταση ενός μετασχηματιστή είναι το κόστος. Το κόστος από την εγκατάσταση της νέας

περιέλιξης οφείλει να είναι μικρότερο από το κόστος της αγοράς ενός νέου μετασχηματιστή. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι μια μελέτη που έγινε για μετασχηματιστές με ισχύ 25 kVA έδειξε ότι το κόστος της επισκευής, λόγω νέας περιέλιξης, ανερχόταν στο 76% περίπου του μέσου κόστους της αγοράς ενός καινούριου μετασχηματιστή. Επομένως, η επιλογή της επισκευής ενός μετασχηματιστή με αυτή τη μέθοδο δεν ενδείκνυται σε περιπτώσεις που ο μετασχηματιστής είναι σχετικά παλιός. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται και από το γεγονός ότι πολλά μέρη του μετασχηματιστή, όπως η μόνωση και ο πυρήνας, έχουν υποστεί κάποια φθορά λόγω της ηλικίας του. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι η εξοικονόμηση σε ενέργεια από την εγκατάσταση νέας περιέλιξης σε έναν μετασχηματιστή δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι συνήθως δεν παρατηρείται μείωση των απωλειών κενού φορτίου. Επομένως, οι εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας δεν εφαρμόζουν συχνά την παραπάνω μέθοδο για την παράταση της διάρκειας ζωής ενός μετασχηματιστή.

5.3.2 Νέα μόνωση

Η επιλογή της εγκατάστασης νέου μονωτικού υλικού σε ένα μετασχηματιστή, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διάρκειας ζωής του και ισχύς του. Αρκετές εταιρίες ηλεκτρισμού χρησιμοποιούν νέο υλικό για τη μόνωση του μετασχηματιστή, όταν αυτός έχει υποστεί βλάβη. Το νέο υλικό είναι το αραμίδιο.

Το αραμίδιο κατασκευάζεται από θερμοπλαστικό αρωματικό πολυαμίδιο και έχει την ικανότητα να αντέχει σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες από το συμβατικό υλικό της μόνωσης ενός μετασχηματιστή. Οι δυνατότητες μόνωσης από συμβατικό υλικό είναι περιορισμένες σε μια μέση θερμοκρασία τυλίγματος 65°C πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ η μόνωση από αραμίδιο έχει τη δυνατότητα να αντέχει σε θερμοκρασία της τάξεως των 200°C συνεχόμενα. Αυτή η ικανότητά επιτρέπει στους αγωγούς να λειτουργούν σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Η αύξηση της θερμοκρασίας συμβαίνει όταν ο αγωγός δέχεται μεγαλύτερο φορτίο. Επομένως η χρήση του αραμιδίου αυξάνει την ισχύ του μετασχηματιστή. Στον πίνακα 5.5, παρουσιάζονται οι διαφορές ενός τυπικού μετασχηματιστή ισχύος 12/20 MVA πριν και μετά την αναβάθμιση της μόνωσης του με αραμίδιο [5.4].

	Συμβατική Μόνωση		Μόνωση από Αραμίδιο	
	ONAN	ONAF	ONAN	ONAF
Σύστημα ψύξης				
Ισχύς (MVA)	12	20	18	30
Μέσος όρος θερμοκρασίας λαδιού (K)	38	28	55.7	45.4
Μέσος όρος θερμοκρασίας τυλίγματος (K)	50	55	71.5	81.1
Μέγιστη θερμοκρασία λαδιού (K)	44	37	64.5	60

Πίνακας 5.5 Σύγκριση ανάμεσα σε έναν μετασχηματιστή ισχύος 12/20 MVA πριν και μετά την αναβάθμιση της μόνωσής του

5.3.3 Ανακαίνιση εξαρτημάτων

Αυτή η επιλογή περιλαμβάνει την αντικατάσταση ενός περιορισμένου αριθμού εξαρτημάτων του μετασχηματιστή, όπως οι σύνδεσμοι, τα παξιμάδια, οι φλάντζες και οι μονωτήρες. Ακόμη μπορεί να περιλαμβάνει την αλλαγή του λαδιού.

Οι φλάντζες χρησιμεύουν για τη στεγανοποίηση των διάφορων μερών του μετασχηματιστή και πρέπει να έχουν αρκετή αντοχή και μεγάλη διάρκεια ζωής. Είναι κατασκευασμένες από ελαστικό υλικό ώστε να μπορούν να προσαρμόζονται στις ατέλειες της επιφάνειας που σφραγίζουν. Τα υλικά από τα οποία συνήθως κατασκευάζονται είναι: Cork/Corkprene, Nitrile/Buna N Rubber και Viton Rubber. Επίσης πρέπει να είναι ανθεκτικές στην πίεση, στις υψηλές θερμοκρασίες, στις διαστολές, στις συστολές και στις δονήσεις. Αν δεν ικανοποιούν τα παραπάνω κριτήρια, τότε θα υπάρξει διαρροή. Επομένως ο έλεγχός και η αντικατάστασή τους είναι αναγκαία για τη σωστή λειτουργία ενός μετασχηματιστή.

Το εξωτερικό περίβλημα στους μονωτήρες συνήθως κατασκευάζεται από πορσελάνη. Η πορσελάνη έχει πολύ καλές μονωτικές ιδιότητες. Επειδή δεν υπάρχει τέλεια μόνωση, πάντα υπάρχει μια πολύ μικρή διαρροή ρεύματος. Κατά τη διαδικασία της συντήρησης του μετασχηματιστή, πρέπει να ελέγχεται αν υπάρχουν ρωγμές στον μονωτήρα ή άλλες φθορές. Στην περίπτωση που εντοπιστεί κάποια ζημιά στον μονωτήρα, τότε το ρεύμα διαρροής είναι υπερβολικό και είναι δυνατόν να εντοπιστούν ίχνη άνθρακα στην επιφάνεια του [5.5].

Τέλος, οι σύνδεσμοι των μετασχηματιστών οφείλουν να έχουν σωστή ροπή και να βρίσκονται σε πολύ καλή κατάσταση, ώστε να παρέχουν την αναγκαία μόνωση σε ένα μετασχηματιστή. Είναι σημαντικό να μην εισέρχεται στο εσωτερικό ενός μετασχηματιστή η υγρασία ή ο αέρας. Το οξυγόνο σε συνδυασμό με την υγρασία έχουν αρνητικές συνέπειες στο λάδι που περιέρχεται εσωτερικά σε έναν μετασχηματιστή και κατά συνέπεια μειώνουν τη διάρκεια ζωής του.

Το λάδι πρέπει να είναι άριστης ποιότητας και πρέπει πάντα να πληροί τις διεθνείς προδιαγραφές. Παρόλα τα πλεονεκτήματα του ως ψυκτικό μέσο, έχει το μειονέκτημα να προσβάλλεται εύκολα από τον αέρα και την υγρασία. Προκαλείται η μείωση της διηλεκτρικής αντοχής κατά την επαφή του με τον αέρα, καθώς οξειδώνεται με την πρόσληψη οξυγόνου. Η αντικατάσταση του λαδιού σε ένα μετασχηματιστή είναι επιβεβλημένη, όταν έχει χάσει την μονωτική του αντοχή.

5.4 Αντικατάσταση με νέο μετασχηματιστή

Σύμφωνα με τα παραπάνω λεγόμενα, η αντικατάσταση των μετασχηματιστών εξαρτάται από τους παράγοντες: βλάβη, ηλικία και φορτίο. Εφόσον η ηλικία του μετασχηματιστή ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο χρονικό όριο, τότε η ανακαίνιση των εξαρτημάτων του δεν ενδείκνυται ως συμφέρουσα λύση και προτείνεται η αντικατάσταση του με έναν νέο. Στην περίπτωση που το μελλοντικό φορτίο ξεπερνά την

μέγιστη επιτρεπτή φόρτιση του μετασχηματιστή, τότε προτείνεται η αντικατάσταση του με νέο μεγαλύτερης βαθμίδας. Ο συνδυασμός των παραγόντων φορτίου και ηλικίας μπορούν να συνεχιστούν, δίνοντας νέα δεδομένα για το πρόβλημα της αντικατάστασης. Επομένως κάθε επιλογή που αφορά την αντικατάσταση ενός μετασχηματιστή πρέπει να εξετάζεται διαφορετικά. Παρακάτω δίνονται εμπειρικές εναλλακτικές αποφάσεις που αφορούν την αντικατάσταση ενός ελαττωματικού μετασχηματιστή με έναν νέο.

5.4.1 Ίδιας βαθμίδας

Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι γηραιοί μετασχηματιστές, των οποίων το μέγιστο επιτρεπτό φορτίο επαρκεί σε σχέση με το παρεχόμενο φορτίο από το δίκτυο. Εμπειρικά, επιλέγονται οι μετασχηματιστές που μπορούν να ανταπεξέλθουν στις ενεργειακές ανάγκες του δικτύου για περισσότερο από δέκα χρόνια, όμως η διάρκεια ζωής τους είναι περιορισμένη και λιγότερη από πέντε έτη. Συνοπτικά, δίνονται οι προϋποθέσεις στον πίνακα 5.6

Χρόνια μέχρι την αντικατάσταση λόγω ηλικίας	<	5
Χρόνια μέχρι την αντικατάσταση λόγω φορτίου	>	10

Πίνακας 5.6 - Προϋποθέσεις αντικατάστασης μετασχηματιστή με όμοιο

5.4.2 Μεγαλύτερης βαθμίδας

Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν οι γηραιοί μετασχηματιστές, των οποίων το μέγιστο επιτρεπτό φορτίο δεν επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών του δικτύου. Επομένως μέσα στα επόμενα πέντε χρόνια θα παρουσιαστεί αδυναμία κάλυψης του αυξανόμενου φορτίου. Ταυτόχρονα, η διάρκεια ζωής τους είναι περιορισμένη σε τιμές μικρότερες των πέντε ετών. Συνοπτικά, δίνονται οι προϋποθέσεις στον πίνακα 5.7.

Χρόνια μέχρι την αντικατάσταση λόγω ηλικίας	<	5
Χρόνια μέχρι την αντικατάσταση λόγω φορτίου	<	10

Πίνακας 5.7 - Προϋποθέσεις αντικατάστασης μετασχηματιστή με μεγαλύτερης βαθμίδας

5.4.3 Πρόσθεση παράλληλου μετασχηματιστή ίδιας βαθμίδας

Ως τελευταία εναλλακτική εμφανίζεται η πρόσθεση ενός ακόμη μετασχηματιστή ίδιας βαθμίδας σε παράλληλη σύνδεση. Για να χαρακτηριστεί συμφέρουσα η παράλληλη πρόσθεση, οφείλει ο ήδη υπάρχων μετασχηματιστής να έχει λειτουργήσει για λιγότερο από δέκα χρόνια, αλλά όμως η αύξηση φορτίου του δικτύου να ξεπερνά την ικανότητα του. Σε αυτήν την περίπτωση επιλέγεται η προσθήκη ενός ακόμα μετασχηματιστή σε παράλληλη λειτουργία, καθώς το κόστος αγοράς ενός μετασχηματιστή μεγαλύτερης βαθμίδας είναι αρκετά υψηλότερο και ασύμφορο. Συνοπτικά, δίνονται οι προϋποθέσεις στον πίνακα 5.8.

Χρόνια μέχρι την αντικατάσταση λόγω ηλικίας	>	5
Χρόνια μέχρι την αντικατάσταση λόγω φορτίου	<	10

Πίνακας 5.8 - Προϋποθέσεις προσθήκης παράλληλου μετασχηματιστή

5.5 Συντήρηση μετασχηματιστών

Όλες οι μηχανές χρειάζονται σωστή και τακτική συντήρηση των εξαρτημάτων τους ώστε να επιτευχθεί η ομαλή λειτουργία τους. Το ίδιο ισχύει και για τους μετασχηματιστές, καθώς η σωστή συντήρηση τους βοηθά στον περιορισμό των απωλειών και στην αύξηση του κύκλου ζωής τους.

Η σωστή συντήρηση μπορεί να εξασφαλίσει την απόδοση και αξιοπιστία του υπάρχοντος μετασχηματιστή. Επίσης, πραγματοποιείται καταγραφή των συντηρήσεων και παρατηρήσεων σε βάση δεδομένων. Σύμφωνα με τα δεδομένα, προσδιορίζεται η χρονική στιγμή που πρέπει να αντικατασταθεί ένας παλιός μετασχηματιστής από έναν καινούριο. Η συντήρηση περιλαμβάνει την επιθεώρηση και τον έλεγχο των διαφόρων μερών ενός μετασχηματιστή, όπως το λάδι, τη μόνωση της περιέλιξης κ.α. Επίσης με την πραγματοποίηση της συντήρησης και με διάφορους ελέγχους, δίνεται η δυνατότητα να εντοπιστούν ενδεχόμενες βλάβες σε ένα μετασχηματιστή και να επισκευαστούν. Τέλος η συντήρηση συνήθως πραγματοποιείται σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, τα οποία είναι καθορισμένα. Τα χρονικά διαστήματα, καθώς και οι βασικές οδηγίες που αφορούν την συντήρηση, δίνονται από τον κατασκευαστή. Στον πίνακα (5.9) δίνονται οι βασικές οδηγίες συντήρησης μετασχηματιστών διανομής τύπου λαδιού [5.6].

Χρονικό διάστημα	Είδος συντήρησης
Σε 3 μήνες	1. Έλεγχος στάθμης λαδιού 2. Έλεγχος θερμοκρασίας 3. Έλεγχος υγρασίας από αφυγραντήρα 4. Καθαρισμός μονωτήρων 5. Καθαριότητα δαπέδου χώρου 6. Έλεγχος για τυχόν εξωτερικές σκουριές
Κάθε χρόνο	1. Έλεγχος διηλεκτρικής αντοχής λαδιού 2. Έλεγχος προστασίας του μετασχηματιστή 3. Έλεγχος και σύσφιξη λυομένων συνδέσμων 4. Λόπανση κινητήρων αερισμού (αν υπάρχουν) 5. Έλεγχος πυροσβεστήρων (αν υπάρχουν)
Κάθε δύο χρόνια	1. Αλλαγή ρουλεμάν κινητήρων αερισμού (αν υπάρχουν)
Κάθε πέντε χρόνια	1. Πλήρης έλεγχος λαδιού και αλλαγή αν είναι αναγκαίο

Πίνακας 5.9 – Οδηγίες συντήρησης μετασχηματιστών λαδιού

5.6 Βιβλιογραφία

- [5.1] Barry W. Kennedy, Energy Efficient Transformers, McGraw-Hill, New York, 1998.
- [5.2] Π. Σ. Γεωργιλάκης, Ν. Δ. Χατζηαργυρίου, “Οικονομική Αξιολόγηση Μετασχηματιστών Διανομής”, Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, ΙΙΙ, τεύχος 1-2, 2000, σελ. 51-62
- [5.3] Oak Ridge National Laboratory, “The Feasibility of Replacing or Upgrading Utility Distribution Transformers During Routine Maintenance”, April 1995
- [5.3] Συνέντευξη με τον κ. Διευθυντή διανομής ΔΕΗ Σάμου, κ. Κυριαζή Γεώργιο
- [5.4] Συνέντευξη με τον κ. Διευθυντή Σταθμού Παραγωγής (ΑΣΠ) Σάμου, κ. Ζαφείρη Δημήτριο
- [5.5] W. I. Nutt, “Increased MVA Transformer Rebuilds with Thermally Upgraded insulation”, Doble Conference, 1989, 6D-1-11
- [5.6] United States Department of the Interior Bureau of Reclamation Denver, Colorado, “Transformer Maintenance – Facilities Instructions, Standards and Techniques”, October 2000.
- [5.7] Δ. Δημητριάδου, “Στατιστική Ανάλυση των Μερικών Εκκενώσεων σε Βιομηχανικά Ηλεκτρομονωτικά Υλικά υπό Κρουστικές Τάσεις Χειρισμών και υπό Κεραυνικές Τάσεις”, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Μάρτιος 2004.

Κεφάλαιο 6 – Εφαρμογή μεθόδου ισοδύναμου κόστους επένδυσης στον Νομό Σάμου

6.1 Εισαγωγή

Το κόστος κατοχής ενός μετασχηματιστή δεν είναι δυνατόν να αντιπροσωπευθεί μόνο από το κόστος αγοράς του. Το συνολικό κόστος κατοχής επηρεάζεται άμεσα από την απόδοση του μετασχηματιστή και από την διάρκεια της ενεργής ζωής του. Είναι πλέον γνωστό ότι οι ενεργειακές απώλειες των μετασχηματιστών μεταφράζονται σε χρηματικό κόστος και αποτελούν βασικό κριτήριο αξιολόγησης αγοράς οικονομικού μετασχηματιστή.

Κάθε μέθοδος αποτίμησης ενός μετασχηματιστή οφείλει να διευκολύνει τον αγοραστή αποδίδοντας όσο το δυνατόν περισσότερα αξιόπιστα αποτελέσματα. Επίσης διευκολύνει τον κατασκευαστή, καθώς βοηθά στην σχεδίαση νέων μοντέλων μετασχηματιστών που καλύπτουν πλήρως τις εκάστοτε ανάγκες της αγοράς. Επομένως, τα δεδομένα που εισάγονται σε κάθε μέθοδο καθώς και ο τρόπος επεξεργασίας τους οφείλουν να είναι γνωστά και αποδεκτά από κάθε πλευρά (αγοραστή και πωλητή). Η περισσότερη διαδεδομένη και εύχρηστη μέθοδος αποτίμησης ενός μετασχηματιστή είναι η μέθοδος του ισοδύναμου κόστους επένδυσης.

6.2 Μεθοδολογία εφαρμογής ισοδύναμου κόστους

Η μέθοδος ισοδύναμου κόστους επένδυσης καλείται ώστε να δοθεί λύση στο πρόβλημα ελαχιστοποίησης του συνολικού κόστους κατοχής των μετασχηματιστών. Το πρόβλημα μπορεί να μοντελοποιηθεί με την χρήση μιας μη γραμμικής συνάρτησης ως αντικειμενικής εξίσωσης, ελεγχόμενης από τους κατάλληλους περιορισμούς. Η αντικειμενική συνάρτηση οφείλει να υπολογίζει το συνολικό κόστος αγοράς και λειτουργίας των μετασχηματιστών διανομής. Επομένως, πρέπει να περιέχει και να ελαχιστοποιεί την συνάρτηση TOC (4.1), δηλαδή την συνάρτηση που υπολογίζει το συνολικό κόστος κατοχής ενός μετασχηματιστή. Κρίνονται απαραίτητες ορισμένες τροποποιήσεις, ώστε να είναι πραγματοποιήσιμος ο υπολογισμός του συνολικού κόστους όλων των τεμαχίων για όλες τις κατηγορίες μετασχηματιστών. Η μη γραμμική αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος περιγράφεται από την παρακάτω σχέση [6.1-6.2].

$$T_{tot} = \min \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^{10} N_{ij} * (C_j + A * NLL_j + B * LL_j) \quad (6.1)$$

Η παράμετρος i αναφέρεται στον χρόνο (έτη), η παράμετρος j στην βαθμίδα των μετασχηματιστών, T_{tot} το συνολικό κόστος κατοχής των Μ/Σ, N_{ij} η ποσότητα των μετασχηματιστών j βαθμίδας κατά τον i χρόνο, C_j το κόστος αγοράς του βέλτιστου μετασχηματιστή j βαθμίδας, NLL_j και LL_j οι απώλειες κενού και μη κενού φορτίου αντίστοιχα.

Με τον όρο βέλτιστο μετασχηματιστή μιας βαθμίδας j , θεωρείται ο μετασχηματιστής με το μικρότερο κόστος κατοχής (TOC) σε σύγκριση με τους υπόλοιπους ανταγωνιστικούς μετασχηματιστές. Ο βέλτιστος μετασχηματιστής περιγράφεται στην ενότητα 6.5.

Οι περιορισμοί της αντικειμενικής συνάρτησης αφορούν τις ποσότητες των μετασχηματιστών και τα συνολικά κόστη αγοράς. Συγκεκριμένα, οι ποσότητες των μετασχηματιστών οφείλουν να είναι ακέραιοι αριθμοί και να μην υπερβαίνουν τον αριθμό των διαθέσιμων αποθηκευτικών χώρων. Όσο αφορά το κόστος αγοράς, οφείλει να μην ξεπερνά το κεφάλαιο που διατίθεται για την επένδυση. Επίσης, μπορούν να προστεθούν και άλλοι περιορισμοί, ανάλογα με τις ανάγκες του σεναρίου που εκτελείται. Όλοι οι περιορισμοί διατίθενται αναλυτικά στην ενότητα 7.

6.3 Στοιχεία ΔΕΗ Σάμου

6.3.1 Στοιχεία φορτίου

Η κύρια κατηγοριοποίηση των μετασχηματιστών πραγματοποιείται ανάλογα με το φορτίο ηλεκτρικού ρεύματος που είναι ικανοί να διαχειριστούν. Επομένως, οι μετασχηματιστές διανομής ταξινομούνται σε μετασχηματιστές των 50 kVA, 100 kVA, 160 kVA, 250 kVA, 400 kVA, 630 kVA, 800 kVA, 1000 kVA, 1250 kVA και 1600 kVA. Οι παραπάνω τιμές εκφράζουν το μέγιστο φορτίο ηλεκτρικού φορτίου (σε kVA), το οποίο μπορεί να τροφοδοτηθεί σε έναν μετασχηματιστή, εξασφαλίζοντας την κανονική λειτουργία του. Σύμφωνα με τον πίνακα 2.3 της ενότητας 2.5.1, η φόρτιση ενός μετασχηματιστή είναι δυνατόν να ξεπεράσει την ονομαστική τιμή του για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, σε διαφορετική περίπτωση προκαλεί φθορά στα εξαρτήματα του και μειώνοντας δραματικά την διάρκεια ζωής του.

Στην Ελλάδα, έχουν εγκατασταθεί από την ΔΕΗ αναλογικοί μετρητές κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος. Η χρήση των αναλογικών μετρητών δεν επιτρέπει την επακριβή καταγραφή των ενεργειακών φορτίσεων κάθε μετασχηματιστή. Έχοντας στόχο την αποφυγή του παραπάνω προβλήματος, πραγματοποιείται ομαδοποίηση των μετασχηματιστών σε μια ενιαία θεωρητική μονάδα, όπου η αύξηση του φορτίου της είναι σταθερή. Επομένως, γίνεται δεκτή ότι η αύξηση του φορτίου είναι ενιαία και σταθερή σε όλους τους μετασχηματιστές του Νομού. Σύμφωνα με στοιχεία της ΔΕΗ, η αύξηση φορτίου στις νησιωτικές περιοχές της Ελλάδας υπολογίζεται γύρω στο 3%. [6.6]

Το ετήσιο ποσοστό αύξησης φορτίου είναι υπολογίσιμο και προσεγγίζεται με την εφαρμογή της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων. Εφόσον τροφοδοτηθεί η μέθοδος ελαχίστου τετραγώνου με τιμές ετήσιας παραγωγής, υπολογίζεται το ετήσιο ποσοστό μεταβολής της παραγόμενης ενέργειας. Σύμφωνα με το καταστατικό της ΔΕΗ, μια επιτυχημένη προσέγγιση οφείλει να περιλαμβάνει τουλάχιστον τις μετρήσεις των τελευταίων έξι ετών [6.6]. Για την πραγματοποίηση της έρευνας λήφθηκαν υπόψη οι μετρήσεις των τελευταίων δέκα ετών, γεγονός το οποίο επικυρώνει τα αποτελέσματα. Με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, δημιουργείται μια ευθεία γραμμή που αντιπροσωπεύει τα σημεία του διαγράμματος Φόρτιση/Έτος. Η γραμμή περιγράφεται από την εξίσωση $y = a \cdot x + b$, όπου a ο ρυθμός αύξησης της φόρτισης. Το a υπολογίζεται από την σχέση 6.2.

$$a = \frac{\sum (x - \bar{x}) \cdot (y - \bar{y})}{\sum (x - \bar{x})^2} \quad (6.2)$$

Όπου x τα έτη και y η ετήσια παραγωγή.

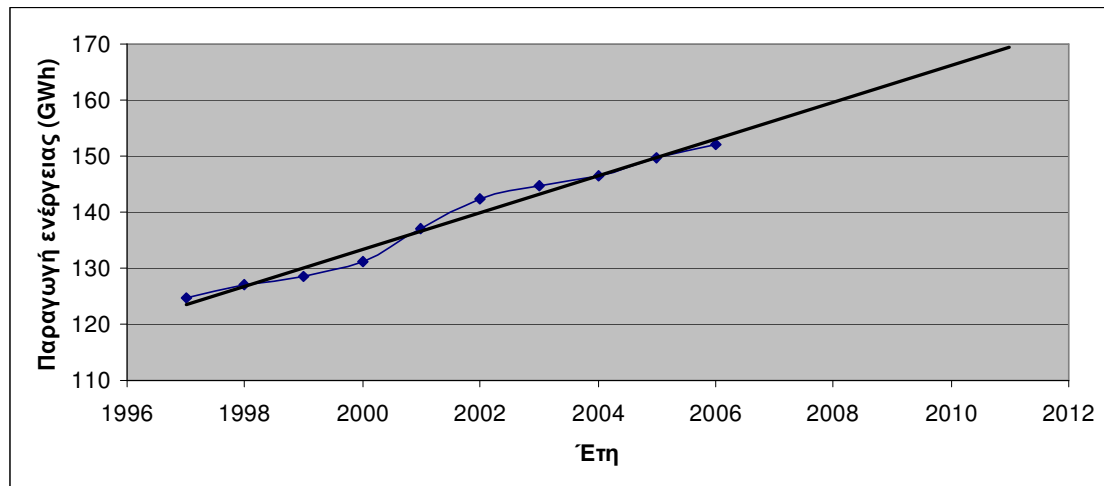
Στα αυτόνομα συστήματα παραγωγής και διανομής ενέργειας δεν υπάρχει αποθήκευση ενέργειας. Δηλαδή, οι μονάδες παραγωγής παράγουν ακριβώς όση ενέργεια απαιτεί το δίκτυο. Επομένως, η συνολική παραγωγή ταυτίζεται με την συνολική κατανάλωση ενέργειας. Για την εφαρμογή της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων, χρησιμοποιούνται οι ετήσιες τιμές παραγωγής ενέργειας, οι οποίες συμπίπτουν με τις μέσες καταναλώσεις του νομού. Οι ετήσιες τιμές παραγωγής δόθηκαν από τον ΑΣΠ Σάμου (Ανεξάρτητο Σταθμό Παραγωγής) [6.4] και αφορούν τις χρονιές 1997-2007. Τα δεδομένα δίνονται αναλυτικά στον πίνακα 6.1.

Έτος	Φορτίο (GWh)
1997	124,564
1998	126,984
1999	128,674
2000	131,25
2001	136,978
2002	142,32
2003	144,65
2004	146,564
2005	149,56
2006	152,056
2007	155,127

Πίνακας 6.1 – Μέσες τιμές ετήσιας παραγωγή ΑΣΠ Σάμου

Το γραφικό αποτελέσματα της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων δίνεται στο σχήμα 6.1. Χάρη στην χρήση του διαγράμματος, είναι εφικτή η πρόβλεψη των μελλοντικών ενεργειακών αναγκών των επόμενων χρόνων. Η παραπάνω εκτίμηση βοηθά

το τμήμα διανομής ενέργειας στον προσδιορισμό του απαραίτητου εξοπλισμού για την κάλυψη δικτύου, καθώς και το τμήμα παραγωγής ενέργειας ώστε να εξασφαλίσει την αγορά μηχανών παραγωγής που καλύπτουν την ενεργειακή ζήτηση.



Σχήμα 6.1 – Υπολογισμός φορτίου με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων

Οι μελλοντικές επενδύσεις της ΔΕΗ προβλέπουν την εγκατάσταση και λειτουργία ψηφιακών μετρητών στους καταναλωτές. Το βασικό πλεονέκτημα των ψηφιακών μετρητών είναι η συνεχή σύνδεση τους με τερματικό σύστημα της εταιρίας. Επομένως, το τερματικό σύστημα ενημερώνεται άμεσα για τις ενεργειακές ανάγκες και μεταβολές του δικτύου διανομής. Οι ενημερώσεις μπορούν να υπολογίσουν τις ενεργειακές καταναλώσεις κάθε καταναλωτή, κάθε περιοχής, κάθε γραμμής μεταφοράς ενέργειας και τέλος όλου του Νομού. [6.2]

Χρησιμοποιώντας ομαδοποιημένους μετασχηματιστές, δεν είναι δυνατή η ακριβής ενεργειακή ανάγκη των επιμέρους μετασχηματιστών. Δημιουργείται κίνδυνος απόδοσης μεγάλου ποσοστού αύξησης φορτίου σε απομονωμένους μετασχηματιστές, καθώς επίσης και ο κίνδυνος απόδοσης μικρού ποσοστού αύξησης σε κεντρικούς μετασχηματιστές. Η αποφυγή του παραπάνω προβλήματος αντιμετωπίζεται με την μέθοδο που περιγράφηκε στην ενότητα 5.2.3.

6.3.2 Οικονομικά στοιχεία

Οι οικονομικοί παράμετροι του προβλήματος αποτελούνται από το χρηματικό κεφάλαιο που δέχεται να διαθέσει η αγοράστρια εταιρία για την απόκτηση των μετασχηματιστών. Ο ρόλος του κεφαλαίου είναι σημαντικός, καθώς το διαθέσιμο κεφάλαιο καθορίζει τις ικανές ποσότητες παραγγελιών μετασχηματιστών. Στην περίπτωση όπου ο υποψήφιος αγοραστής είναι ιδιώτης ή μια μικρή εταιρία, το διαθέσιμο

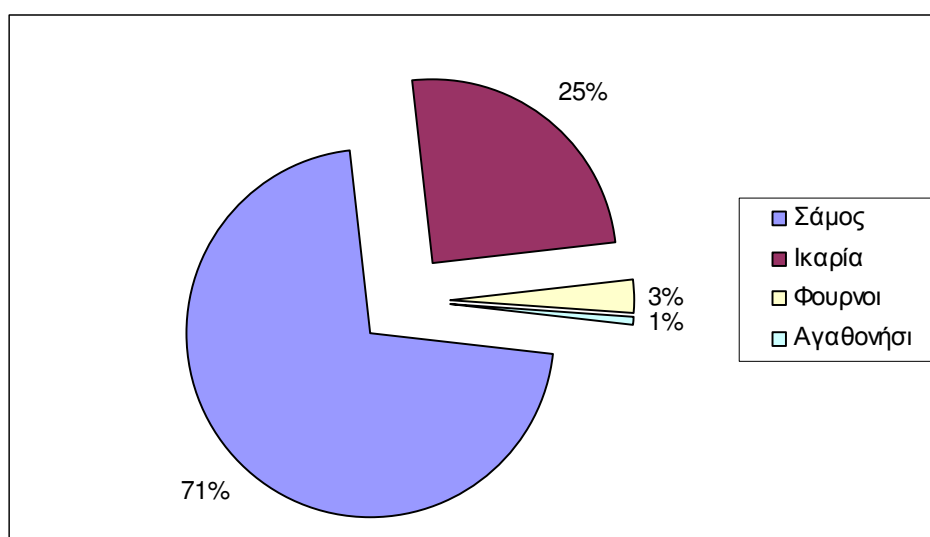
κεφάλαιο είναι γνωστό και εύκολα υπολογίσιμο. Στις περιπτώσεις μεγάλων εταιριών, πραγματοποιούνται μεγάλες παραγγελίες μετασχηματιστών, οι οποίοι αποθηκεύονται σε κεντρικές αποθήκες. Στην συνέχεια αποστέλλονται οι απαραίτητες ποσότητες στις περιοχές που έχουν ανάγκη.

Εφόσον η έρευνα πραγματοποιείται αποκλειστικά στον Νομό Σάμου, λαμβάνεται η υπόθεση ότι η ΔΕΗ Σάμου λειτουργεί ως αυτόνομη εταιρία και πραγματοποιεί μεμονωμένα τις αγορές της. Η παραπάνω παραδοχή δεν αποκλίνει πολύ από την πραγματικότητα, καθώς η παραγωγή και διανομή του ηλεκτρικού ρεύματος πραγματοποιείται από αυτόνομες εγκαταστάσεις του Νομού. Επομένως, δεν χρειάζεται η παραλαβή μετασχηματιστών από τις κεντρικές αποθήκες της εταιρίας, αλλά η επιχορήγηση του απαραίτητου χρηματικού ποσού για την αγορά. Με την χρήση του χρηματικού ποσού και την εφαρμογή του ισοδύναμου κόστους επένδυσης, εγγυάται το ελάχιστο δυνατό κόστος παραγγελία μετασχηματιστών [6.2-6.3].

6.3.3 Τεχνικός εξοπλισμός

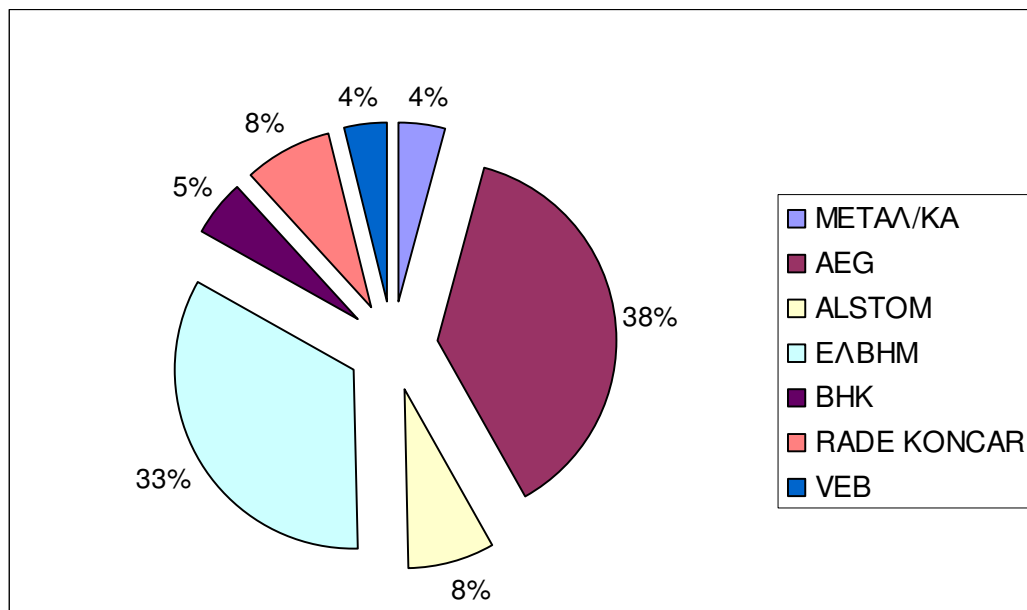
6.3.3.1 Εγκαταστημένοι μετασχηματιστές του δικτύου διανομής

Στον Νομό Σάμου βρίσκονται εγκαταστημένοι 801 μετασχηματιστές διανομής και οι αποθήκες του Νομού φιλοξενούν άλλους 59 μετασχηματιστές. Σύμφωνα με το σχήμα 6.2, η πλειονοπία των μετασχηματιστών βρίσκονται εγκαταστημένοι στο νησί της Σάμου. Η παραπάνω τοποθέτηση είναι δικαιολογημένη, καθώς συμβαδίζει με την κατανομή του πληθυσμού στα επιμέρους νησιά του Νομού. [6.4-6.5]



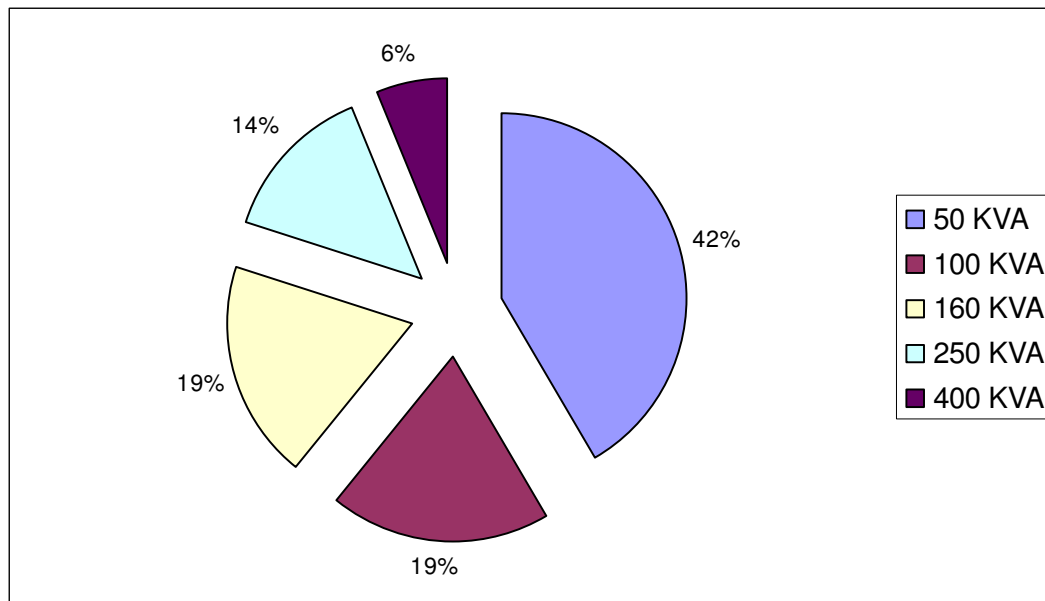
Σχήμα 6.2 – Κατανομή μετασχηματιστών νομού Σάμου

Η αξιοπιστία του προμηθευτή αποτελεί σημαντική παράμετρο που επηρεάζει την αγορά μετασχηματιστών. Συνήθως προτιμάται η αγορά μηχανημάτων από γνωστούς προμηθευτές που έχουν αποδείξει την αξιοπιστία τους σε παλαιότερες αγορές. Επίσης από τις παλαιότερες αγορές, παρέχεται η γνώση για την ποιότητα των προϊόντων που παρέχει κάθε προμηθευτής. Στο σχήμα 6.3 δίνονται οι αγορές των μετασχηματιστών στο δίκτυο διανομής του Νομού Σάμου. Παρατηρείται ότι η πλειοψηφία των αγορών πραγματοποιήθηκε από τις εταιρίες AEG και ΕΛΒΗΜ.



Σχήμα 6.3 – Ποσοστό εταιριών στο νομό Σάμου

Κάθε επιχείρηση διανομής ηλεκτρικού ρεύματος έχει ως άμεσο στόχο την κάλυψη όλων των απαραίτητων αναγκών, ώστε να λειτουργεί το δίκτυο διανομής χωρίς προβλήματα. Δηλαδή, οφείλει να αντικαθιστά άμεσα ελαττωματικές τεχνικές μονάδες στο δίκτυο διανομής, είτε λόγω μη επάρκειας κάλυψης ενεργειακών αναγκών, είτε λόγω αστοχίας υλικού. Επομένως, κρίνεται απαραίτητη η καταγραφή όλων των μονάδων μετασχηματιστών, όσο αφορά την ισχύς τους και την ομαδοποίηση τους, όπως περιγράφεται με το σχήμα 6.4. Με την χρήση της παραπάνω μεθόδου, εντοπίζεται ποια βαθμίδα μετασχηματιστών χρησιμοποιείται περισσότερο και καθορίζει τις ποσότητες που πρέπει να παραγγελθούν για την τροφοδοσία του δικτύου και για τον εφοδιασμό της αποθήκης. Οι ποσότητες των μετασχηματιστών με ισχύς μεγαλύτερη των 630 kVA είναι μικρές και δεν συμμετέχουν στο διάγραμμα.



Σχήμα 6.4 – Κατανομή ισχύος μετασχηματιστών

6.3.3.2 Αποθέματα – Αποθήκη

Οι αποθήκες ηλεκτρικών υλικών αποτελούν μια από τις σημαντικότερες κτηριακές υποδομές κάθε επιχείρησης διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Η αγορά του ηλεκτρικού εξοπλισμού πραγματοποιείται συνήθως με τριετή ή πενταετή πλάνο αγοράς. Επομένως, κρίνεται αναγκαία η πρόβλεψη κατάλληλων αποθηκευτικών χώρων, ικανών να καλύψουν τις επιμέρους ανάγκες. Επίσης, οφείλονται να αποθηκεύονται ορισμένες ποσότητες μετασχηματιστών, ώστε αντικαθίστανται άμεσα οι ελαττωματικοί μετασχηματιστές του δικτύου διανομής. Οι αποθήκες διακρίνονται σε υπαίθριες και σε αποθήκες κλειστού χώρου. Οι υπαίθριες αποθήκες αποτελούν την οικονομικότερη λύση, καθώς το κόστος κατοχής περιορίζεται στην ενοικίαση του οικοπέδου που χρησιμοποιείται. Ο ηλεκτρικός εξοπλισμός που αποθηκεύεται στις υπαίθριες αποθήκες εκτίθεται στις καιρικές συνθήκες και υπάρχει ο κίνδυνος παρουσίασης προβλημάτων οξείδωσης λόγω βροχής και υγρασίας. Σε αντίθεση, οι αποθήκες κλειστού χώρου είναι κατάλληλες για μακροχρόνια αποθήκευση υλικών, καθώς παρέχουν πλήρη προστασία από καιρικά φαινόμενα αλλά και προστασία από κλοπές υλικών. Το κόστος κατοχής αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό, καθώς στα πάγια έξοδα προστίθενται επιπλέον έξοδα, όπως οι ηλεκτρικές δαπάνες της αποθήκης, η συντήρηση του κτηρίου και η φορολογία κατοχής της αποθήκης [6.4-6.5].

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τα κυριότερα χαρακτηριστικά ενός αποθηκευτικού χώρου είναι το κόστος λειτουργίας και το μέγεθος του. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι αλληλοσυνδεδεμένα, καθώς το μέγεθος επηρεάζει την τιμή ενοικίασης και φορολογίας, συνεπώς το κόστος κατοχής. Το μέγεθος της αποθήκης δεν επιλέγεται

αυθαίρετα, καθώς εξαρτάται από τον όγκο και την ποσότητα του αποθηκευμένου εξοπλισμού. Για αυτόν τον σκοπό, ορίζεται η μέγιστη και η ελάχιστη χωρητικότητα κάθε αποθήκης. Η μέγιστη χωρητικότητα εξασφαλίζει ότι η λειτουργία της αποθήκης δεν την καθιστά δαπανηρή επένδυση για την εταιρία. Η ελάχιστη χωρητικότητα εξασφαλίζει τον επαρκή αποθηκευτικό χώρο, ο οποίος δύναται να φιλοξενήσει τον αναγκαίο εξοπλισμό που οφείλει να είναι άμεσα διαθέσιμος.

Στην πραγματικότητα, το πρόβλημα της αποθήκευσης για την ΔΕΗ νομού Σάμου λύνεται με έμμεσο τρόπο. Συγκεκριμένα, έχουν παραχωρηθεί αφύλακτες δημόσιες εκτάσεις, μέσα στις οποίες έχουν αποθηκευτεί υλικά και εξοπλισμός της ΔΕΗ (συμπεριλαμβανομένου και των μετασχηματιστών). Η αξιοποίηση των χώρων αυτών δεν αποτελεί την ιδανικότερη λύση, λόγω πιθανών κλοπών. Στον Νομό Σάμου δεν έχουν παρουσιαστεί κρούσματα κλοπών ηλεκτρολογικού υλικού. Αντίθετα, το παραπάνω πρόβλημα εντοπίζεται σε μεγάλους Νομούς, καθώς οι μετασχηματιστές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε άλλη περιοχή ή εναλλακτικά μπορεί να εμπορευτεί η μεγάλη ποσότητα χαλκού που βρίσκεται στο εσωτερικό τους. Επομένως, δεν θεωρείται αποδεκτή η λύση αποθήκευσης μετασχηματιστών σε αφύλακτους δημόσιους χώρους [6.2-6.3]

6.3.3.2.1 Δημιουργία εικονικής αποθήκης

Στον Νομό Σάμου υπάρχουν συνολικά έξι μεγάλες αποθήκες ηλεκτρολογικού υλικού. Οι παραπάνω αποθήκες ανήκουν στην ΔΕΗ ως ιδιόκτητες εγκαταστάσεις, επομένως το κόστος αποθήκευσης ελαχιστοποιείται. Επίσης, εκμεταλλεύονται δημόσιες εκτάσεις για προσωρινή αποθήκευση υλικών. Καθώς οι παραγγελίες ηλεκτρικού εξοπλισμού αφορούν ολόκληρο τον Νομό, θέτεται η παραδοχή μιας εικονικής αποθήκης με χωρητικότητα ίση με το άθροισμα των επιμέρους αποθηκών. Η εικονική αποθήκη, αποτελεί μια αρκετά καλή προσέγγιση του πραγματικού προβλήματος. Η χρήση της όμως δεν υπολογίζει τα έξοδα μεταφοράς του ηλεκτρικού εξοπλισμού στις επιμέρους αποθήκες. Τα έξοδα μεταφοράς κατηγοριοποιούνται σε οδικά έξοδα (μεταφορά με φορτηγά μέσα στα όρια του κάθε νησιού) και ναυσιπλοϊκά (μεταφορά του εξοπλισμού στα υπόλοιπα νησιά του Νομού.) Στην περίπτωση των οδικών εξόδων γίνεται χρήση ιδιόκτητων φορτηγών της ΔΕΗ, οπότε τα έξοδα ελαχιστοποιούνται και δεν υπολογίζονται στα έξοδα των αποθηκών. Τα ναυσιπλοϊκά έξοδα καταβάλλονται από την αγοράστρια εταιρία και το κόστος τους υπολογίζεται στα πρόσθετα έξοδα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το κόστος των ναυσιπλοϊκών εξόδων είναι αρκετά μικρό σε σχέση με το κόστος αγοράς του εξοπλισμού, ωστόσο προστίθεται στο συνολικό κόστος. Επίσης, θεωρείται ότι οι μετασχηματιστές διανομής αποτελούν τον μοναδικό εξοπλισμό που φιλοξενεί η αποθήκη.

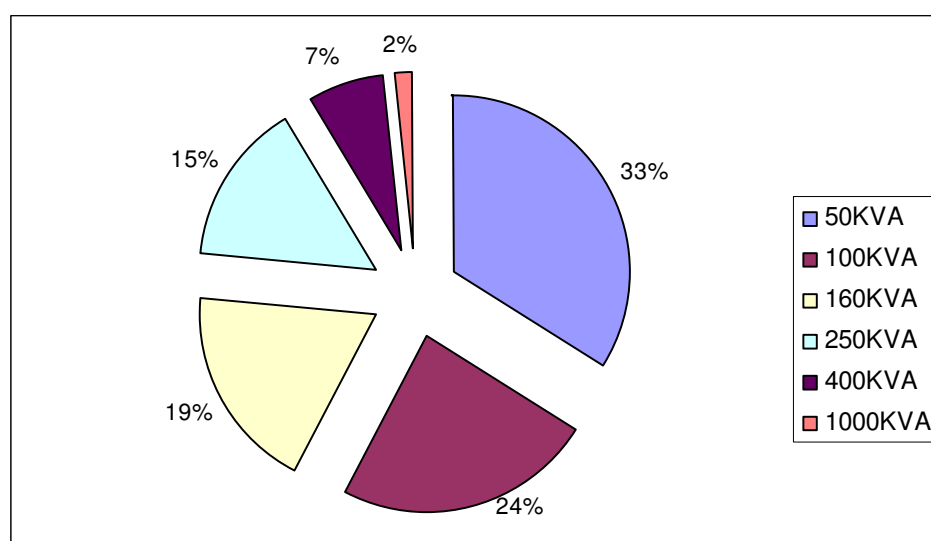
Η εικονική αποθήκη οφείλει να έχει συγκεκριμένη χωρητικότητα, καθώς αντιπροσωπεύει την συνολική χωρητικότητα των επιμέρους αποθηκών. Χωρίς την οριοθέτηση της αποθήκης παράγονται λανθασμένα αποτελέσματα, καθώς η χωρητικότητα τείνει προς το άπειρο. Ο χώρος που καταλαμβάνει ένας μετασχηματιστής μπορεί να θεωρηθεί ως μια θέση. Οι διαστάσεις των μετασχηματιστών ποικίλουν

ανάλογα με την ισχύς τους. Επομένως, πρέπει να οριστούν συγκεκριμένες θέσεις μετασχηματιστών για όλες τις βαθμίδες. Το μέγεθος της εικονικής αποθήκης ορίζεται από τον μέγιστο αριθμό των αποθηκευτικών θέσεων κάθε βαθμίδας που διατίθενται. Μια αρχική προσέγγιση της εικονικής αποθήκης μπορεί να θεωρηθεί ο αριθμός των ήδη αποθηκευμένων μετασχηματιστών του Νομού.

Κατηγορία Μ/Σ	Σάμος	Ικαρία	Φούρνοι	Αγαθονήσι	Σύνολο
50 kVA	8	7	5	0	20
100 kVA	7	4	1	2	14
160 kVA	4	5	2	0	11
250 kVA	5	2	1	1	9
400 kVA	4	0	0	0	4
630 kVA	0	0	0	0	0
800 kVA	0	0	0	0	0
1000 kVA	1	0	0	0	1
1250 kVA	0	0	0	0	0
1600 kVA	0	0	0	0	0
			Συνολική ποσότητα		59

Πίνακας 6.2 – Αποθηκευμένη ποσότητα μετασχηματιστών

Στον πίνακα 6.2 δίνονται τα στοιχεία κάθε αποθήκης του Νομού. Στην τελευταία στήλη υπολογίζεται το άθροισμα των ποσοτήτων κάθε βαθμίδας. Έχοντας ως στόχο τον προσδιορισμό θέσεων κάθε βαθμίδας, υπολογίζονται οι ποσοστιαίες μονάδες των ήδη αποθηκευμένων μετασχηματιστών. Τα ποσοστά κάθε βαθμίδας υπολογίζονται σύμφωνα με τον συνολικό αριθμό των αποθηκευμένων μονάδων. Τα αποτελέσματα δίνονται στο σχήμα 6.5.



Σχήμα 6.5 – Ποσοστά συμμετοχής βαθμίδων των υποθηκευμένων μετασχηματιστών

Μια αρκετά καλή προσέγγιση για το πλήθος των θέσεων είναι η υπόθεση ότι η εικονική αποθήκη μπορεί να διαθέσει συνολικά 100 θέσεις. Ωστόσο, πρέπει να οριστούν οι ελάχιστες και οι μέγιστες διαθέσιμες θέσεις μετασχηματιστών κάθε βαθμίδας. Οι διαθέσιμες θέσεις προκύπτουν από τον συνδυασμό των ήδη αποθηκευμένων μετασχηματιστών με τον αριθμό των εγκαταστημένων μετασχηματιστών στο δίκτυο διανομής. Ο παραπάνω συνδυασμός βοηθά στην προσέγγιση του μέγιστου αριθμού θέσεων της αποθήκης. Τα τελικά αποτελέσματα διαμορφώθηκαν σύμφωνα με εμπειρικές εκτιμήσεις. Η μέγιστη χωρητικότητα αποτρέπει την παραγγελία μονάδων που δεν μπορούν να αποθηκευτούν λόγω έλλειψη χώρου. Ο περιορισμός της μέγιστης χωρητικότητας έχει πρακτική σημασία σε σενάρια μεγιστοποίησης των αποθεμάτων.

	Ποσότητες υπάρχουσας αποθήκης	Ελάχιστη ποσότητα εικονικής αποθήκης	Μέγιστη ποσότητα εικονικής αποθήκης
50 KVA	20	12	40
100 KVA	14	4	18
160 KVA	11	4	16
250 KVA	9	2	12
400 KVA	4	1	4
630 KVA	0	1	2
800 KVA	0	1	2
1000 KVA	1	1	2
1250 KVA	0	1	2
1600 KVA	0	1	2
χωρητικότητα εικονικής αποθήκης			100

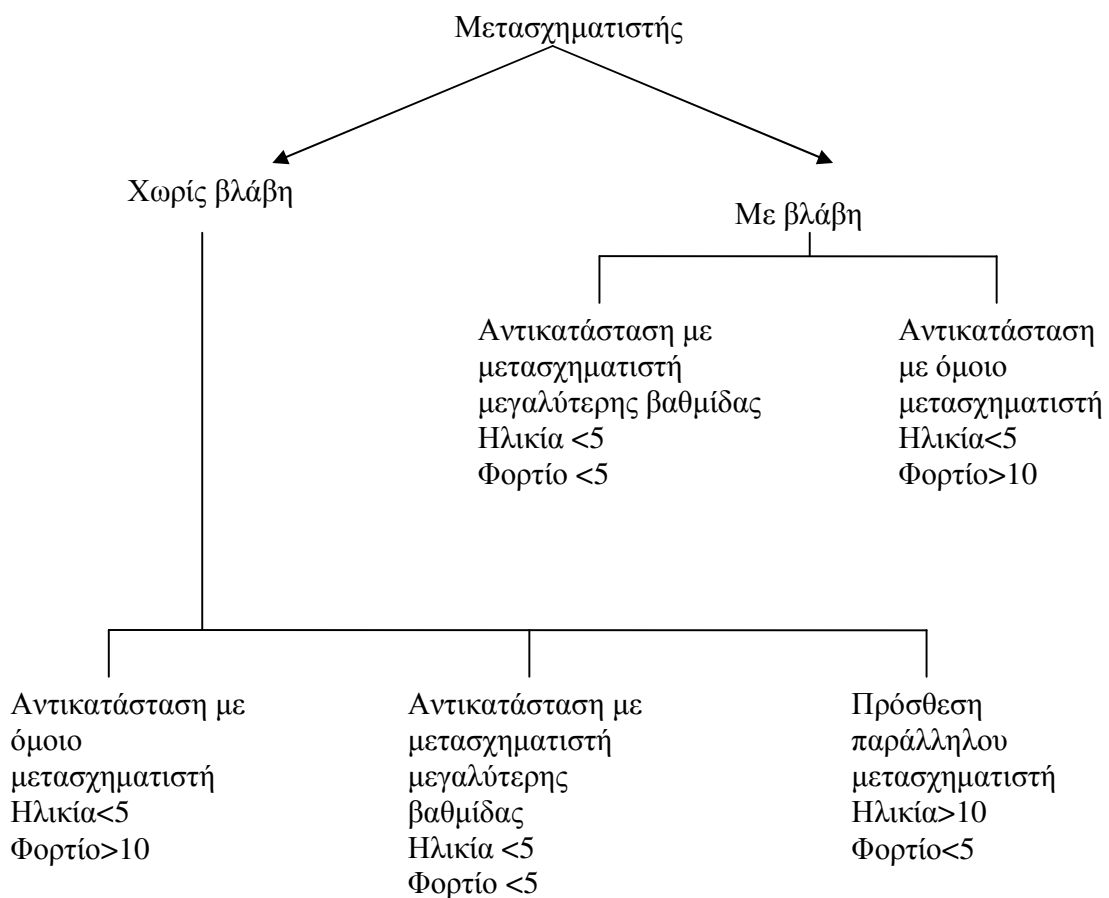
Πίνακας 6.3 – Ποσότητες εικονικής αποθήκης

Η ελάχιστη ποσότητα εξασφαλίζει την διαθεσιμότητα κάθε βαθμίδας. Η μικρότερη ποσότητα κάθε βαθμίδας που μπορεί να αποθηκευτεί είναι το ένα τεμάχιο. Δηλαδή πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένα τεμάχιο κάθε βαθμίδας, ώστε να πραγματοποιηθεί άμεσα η αντικατάσταση των ελαττωματικών μετασχηματιστών. Στους μετασχηματιστές των 630 kVA, 800 kVA, 1250 kVA, και 1600 kVA έχει οριστεί ως μέγιστη ποσότητα τα δύο τεμάχια. Αυτό οφείλεται στην μικρή ζήτηση των συγκεκριμένων βαθμίδων, καθώς το δίκτυο διανομής ηλεκτρικού ρεύματος του Νομού έχει μικρότερες ενεργειακές ανάγκες. Εν αντιθέσει, οι ελάχιστες ποσότητες των μετασχηματιστών μικρότερης ισχύς διαμορφώνονται από τις ανάγκες του δικτύου.

6.4 Μέθοδος υπολογισμού ποσοτήτων μετασχηματιστών

Όλες οι επιχειρήσεις επιδιώκουν την αύξηση του κεφαλαίου τους. Επομένως, επιδιώκοντας μέγιστη αύξηση του κέρδους, οφείλουν να περιορίζουν τα περιττά έξοδα.

Όταν πραγματοποιούνται αγορές μετασχηματιστών, πρέπει να παρέχεται σαφής πληροφόρηση σχετικά με το πλήθος των μετασχηματιστών που θα απορροφηθούν από το δίκτυο διανομής. Επομένως, αναπτύχθηκε μια εμπειρική μέθοδος που υπολογίζει πόσους μετασχηματιστές χρειάζεται το δίκτυο μέσα στα επόμενα πέντε χρόνια. Η λειτουργία της μεθόδου στηρίζεται στον υπολογισμό του χρονικού διαστήματος (σε χρόνια) που απομένουν μέχρι την αντικατάσταση ενός μετασχηματιστή λόγω ηλικίας ή λόγω φορτίου. Η λογική της μεθόδου παρουσιάζεται στο σχήμα 6.6. Οι επιλογές της αντικατάστασης λαμβάνονται σύμφωνα με τις προδιαγραφές που αναλύθηκαν στην ενότητα 5.4 [6.2-6.3]



Σχήμα 6.6 – Διάγραμμα μεθόδου υπολογισμού ποσοτήτων μετασχηματιστών

6.4.1 Παράδειγμα εύρεσης ποσοτήτων μετασχηματιστών 50Kva

Βήμα 1^ο

Καθορισμός βαθμίδων

Αρχικά απομονώνεται η βαθμίδα του μετασχηματιστή, στον οποίο πραγματοποιείται η έρευνα. Στην προκειμένη περίπτωση, επιλέγονται οι μετασχηματιστές των 50 kVA.

Βήμα 2^ο

Εντοπισμός μετασχηματιστών που έχουν υποστεί βλάβη

Εντοπίζονται οι μετασχηματιστές που έχουν υποστεί βλάβη. Η αντικατάσταση ενός μετασχηματιστή πραγματοποιείται σε περίπτωση που έχει υποστεί βλάβη. Ο διαχωρισμό των ελαττωματικών μετασχηματιστών πραγματοποιείται ώστε να αποφευχθεί διπλή αντικατάσταση ενός μετασχηματιστή. Σε περίπτωση βλάβης, πραγματοποιείται άμεση αντικατάσταση του μετασχηματιστή. Εάν ο ίδιος μετασχηματιστής χρειαζόταν αντικατάσταση (πχ λόγω ηλικίας), τότε θα καταγράφονταν η αντικατάσταση του δυο φορές. Με τον διαχωρισμό των ελαττωματικών, αποφεύγεται η παραπάνω σύγχυση.

Βήμα 3^ο

Α) Ελαττωματικοί μετασχηματιστές που αντικαθίστανται με έναν όμοιο.

Από τους ελαττωματικούς μετασχηματιστές επιλέγονται εκείνοι που πρόκειται να αντικατασταθούν με νέα μονάδα της ίδιας βαθμίδας. Η αντικατάσταση πραγματοποιείται στην περίπτωση που η ηλικία του μετασχηματιστή είναι μεγαλύτερη από 25 χρόνια, ενώ μπορεί να διαχειριστεί φορτίο για περισσότερο από 10 χρόνια.

Βήμα 4ο

Β) Ελαττωματικοί μετασχηματιστές που αντικαθίστανται από μεγαλύτερης βαθμίδας

Από τους ελαττωματικούς μετασχηματιστές επιλέγονται εκείνοι που πρόκειται να αντικατασταθούν με νέο μετασχηματιστή μεγαλύτερης βαθμίδας. Η αντικατάσταση πραγματοποιείται σε περίπτωση που η ηλικία του μετασχηματιστή είναι μεγαλύτερη από 25 χρόνια και ταυτόχρονα μπορεί να διαχειριστεί φορτίο για λιγότερα από 5 χρόνια.

Βήμα 5^ο

Εντοπισμός μετασχηματιστών χωρίς βλάβη

Επιλέγονται οι μετασχηματιστές που δεν έχουν υποστεί βλάβη. Η διαδικασία ακολουθεί την λογική του βήματος 2, δηλαδή αποφεύγεται ο διπλός υπολογισμός των ποσοτήτων. Οι λειτουργικοί μετασχηματιστές που πρόκειται να αντικατασταθούν, χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

Βήμα 6°**Α) Μετασχηματιστές που αντικαθίστανται με έναν όμοιο.**

Από τους μετασχηματιστές που δεν έχουν υποστεί βλάβη, επιλέγονται εκείνοι που πρόκειται να αντικατασταθούν με νέα μονάδα της ίδιας βαθμίδας. Η αντικατάσταση πραγματοποιείται στην περίπτωση που η ηλικία του μετασχηματιστή είναι μεγαλύτερη από 25 χρόνια και ταυτόχρονα μπορεί να διαχειριστεί φορτίο για περισσότερο από 10 χρόνια.

Βήμα 7°**Β) Μετασχηματιστές που αντικαθίστανται από έναν μεγαλύτερης βαθμίδας**

Από τους μετασχηματιστές που δεν έχουν υποστεί βλάβη, επιλέγονται εκείνοι που πρόκειται να αντικατασταθούν με νέο μετασχηματιστή μεγαλύτερης βαθμίδας. Η αντικατάσταση πραγματοποιείται στην περίπτωση που η ηλικία του μετασχηματιστή είναι μεγαλύτερη από 25 χρόνια και ταυτόχρονα μπορεί να διαχειριστεί φορτίο για λιγότερα από 5 χρόνια

Βήμα 8°**Γ) Μετασχηματιστές στους οποίους προστίθεται ένας ακόμη παράλληλος**

Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται οι μετασχηματιστές στους οποίους δεν έχει παρουσιαστεί κάποιο πρόβλημα κατά την λειτουργία τους. Επιπροσθέτως, η διάρκεια ζωής τους είναι μεγαλύτερη από 25 έτη και δεν μπορούν να καλύψουν το αυξανόμενο φορτίο της περιοχής τους. Σε αυτήν την περίπτωση, δεν γίνεται αντικατάσταση με έναν μετασχηματιστή μεγαλύτερης βαθμίδας, αλλά προσθέτεται ένας ακόμη της ίδιας βαθμίδας σε παράλληλη λειτουργία. Η πρόσθεση του παράλληλου μετασχηματιστή γίνεται για οικονομικούς λόγους, καθώς το κόστος αγοράς ενός μεγαλύτερου μετασχηματιστή είναι πολύ μεγαλύτερο από την προτεινόμενη λύση.

Βήμα 9°**Καθορισμός επόμενης βαθμίδας**

Απομονώνεται η επόμενη βαθμίδα των μετασχηματιστών που πρόκειται να εξεταστεί (πχ. 100 kVA). Στην συνέχεια, επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία.

Με την εφαρμογή των παραπάνω βημάτων υπολογίζονται οι ποσότητες των μετασχηματιστών που χρειάζονται για την σωστή λειτουργία του δικτύου. Επίσης, αναγράφεται το πλήθος των μετασχηματιστών που θα χρειαστούν είτε απλή αντικατάσταση, είτε πρόσθεση ενός παράλληλου, είτε αντικατάστασης από μετασχηματιστή μεγαλύτερης βαθμίδας. Το σημαντικό πλεονέκτημα της παραπάνω μεθοδολογίας είναι η καταγραφή του αύξοντα αριθμού (Α/Α) των μετασχηματιστών που χρειάζονται αλλαγή. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πίνακα 6.4, ο μετασχηματιστής με αύξοντα αριθμό (Α/Α 129) χρειάζεται αντικατάσταση με έναν της ίδιας βαθμίδας, ο μετασχηματιστής με αύξοντα αριθμό (Α/Α 5) χρειάζεται έναν ακόμα μετασχηματιστή της ίδιας βαθμίδας σε παράλληλη λειτουργία και ο μετασχηματιστής με

αύξοντα αριθμό (Α/Α 258) χρειάζεται αντικατάσταση με έναν μετασχηματιστή μεγαλύτερης βαθμίδας.

ΧΩΡΙΣ ΒΛΑΒΕΣ						ΜΕ ΒΛΑΒΕΣ			
Αντικατάσταση		Πρόσθεση Παραλλήλου		Μεγαλύτερης βαθμίδας		Αντικατάσταση		Μεγαλύτερης βαθμίδας	
Α/Α	Ποσότητα	Α/Α	Ποσότητα	Α/Α	Ποσότητα	Α/Α	Ποσότητα	Α/Α	Ποσότητα
129	12	5	30	258	2		0		0
265		65		744					
274		72							
313		148							
342		182							
464		216							
466		243							
530		267							
560		286							
596		348							
683		353							
684		437							
		474							
		486							
		597							
		609							
		628							
		651							
		655							
		658							
		673							
		698							
		700							
		726							
		743							
		747							
		748							
		755							
		760							
		782							

Πίνακας 6.4 – Υπολογισμός απαραίτητων ποσοτήτων βαθμίδας μετασχηματιστών 50 kVA

Η πρόσθεση του αύξοντα αριθμού στην επίλυση του προβλήματος κρίνεται ως σημαντικός παράγοντας. Ο αύξοντα αριθμός λειτουργεί ως κωδικοποίηση της τοποθεσίας του μετασχηματιστή. Επομένως, το συνεργείο που θα αναλάβει την τυχόν αντικατάσταση του, δεν χρειάζεται να αναζητεί την τοποθεσία που είναι τοποθετημένος, καθώς στο αρχείο με την λίστα των μετασχηματιστών υπάρχει αντιστοίχιση του αύξοντα αριθμού με την τοποθεσία του. Παραδείγματος χάρη, για τον μετασχηματιστή με αύξοντα αριθμό (Α/Α 129) ισχύει:

A/A	Νησί	Περιοχή	Χρονολογία Εγκατάστασης	Ονομαστική ισχύς	Κατασκευαστής
129	Σάμος	ΚΑΡΛΟΒΑΣΙ (Φυλάκιο Σχίνος)	1981	50	JEUMONT

Επομένως, ο μετασχηματιστής με A/A 129 βρίσκεται τοποθετημένος στο νησί της Σάμου, στην πόλη του Καρλοβάσου και βρίσκεται στην περιοχή του φυλακίου Σχίνος.

6.5 Προσφορές εταιριών

Σύμφωνα με την ενότητα 4.4, η τιμή πώλησης των μετασχηματιστών δεν αποτελεί το μοναδικό παράγοντα που επηρεάζει την αγορά τους. Σύμφωνα με την μέθοδο ισοδύναμου κόστους, υπολογίζεται το συνολικό κόστος κατοχής των μετασχηματιστών (TOC), δηλαδή το κόστος του μετασχηματιστή για όλη την διάρκεια της λειτουργίας του. Υπενθυμίζεται ότι το συνολικό κόστος κατοχής ισούται με:

$$TOC = BP + A \cdot NLL + B \cdot LL \quad (4.1)$$

Για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους κατοχής, το πρόγραμμα χρειάζεται να τροφοδοτηθεί με δεδομένα που αφορούν την τιμή αγοράς των μετασχηματιστών (BP) (€), τις απώλειες κενού LL (watt) και μη κενού φορτίου NLL (watt). Για το δίκτυο διανομής του Νομού Σάμου, θεωρείται ότι η τιμή του συντελεστή A ισούται με 6 €/watt και του συντελεστή B με 3 €/watt. Έπειτα, υπολογίζεται το συνολικό κόστος κατοχής και θεωρείται ως οικονομικότερη προσφορά η επιλογή του μετασχηματιστή με την μικρότερη τιμή TOC. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις βαθμίδες των μετασχηματιστών [6.6].

Για την εφαρμογή της έρευνας στον Νομό Σάμου, θεωρείται ότι υπάρχουν τρεις εταιρίες που προσφέρουν μετασχηματιστές. Έπειτα, εφαρμόζεται η μέθοδος ισοδύναμου κόστους για κάθε προσφορά των εταιριών και για όλες τις βαθμίδες. Τα αποτελέσματα της μεθόδου υπολογίζονται στην δεξιά στήλη των πινάκων 6.5-6.7.

kVA	Τιμή πώλησης (€)	Απώλειες (W)		Κόστος απωλειών (€)		Συνολικό κόστος κατοχής (€)
		κενού φορτίου	φορτίου	κενού φορτίου	φορτίου	
50	3000	190	1350	1140	4050	8190
100	4000	320	2150	1920	6450	12370
160	6500	460	3100	2760	9300	18560
250	9500	650	4200	3900	12600	26000
400	12000	930	6000	5580	18000	35580
630	15000	1300	8400	7800	25200	48000
800	19000	1500	10000	9000	30000	58000
1000	22500	1700	13000	10200	39000	71700
1250	25000	2600	20000	15600	60000	100600
1600	30000	3800	32000	22800	96000	148800

Πίνακας 6.5 – Προσφορές μετασχηματιστών εταιρίας A

	Τιμή πώλησης (€)	Απώλειες (W)		Κόστος απωλειών (€)		Συνολικό κόστος κατοχής (€)
kVA		κενού φορτίου	φορτίου	κενού φορτίου	φορτίου	
50	3300	145	1100	870	3300	7470
100	4500	260	1750	1560	5250	11310
160	7000	375	2350	2250	7050	16300
250	10200	530	3250	3180	9750	23130
400	14000	750	4600	4500	13800	32300
630	16500	1030	6500	6180	19500	42180
800	21000	1200	8000	7200	24000	52200
1000	23500	1400	10500	8400	31500	63400
1250	26200	2200	17000	13200	51000	90400
1600	32300	3200	26500	19200	79500	131000

Πίνακας 6.6 – Προσφορές μετασχηματιστών εταιρίας Β

	Τιμή πώλησης (€)	Απώλειες (W)		Κόστος απωλειών (€)		Συνολικό κόστος κατοχής (€)
kVA		κενού φορτίου	φορτίου	κενού φορτίου	φορτίου	
50	3800	125	875	750	2625	7175
100	5000	210	1475	1260	4425	10685
160	7700	300	2000	1800	6000	15500
250	11200	425	2750	2550	8250	22000
400	16500	610	3850	3660	11550	31710
630	18500	860	5400	5160	16200	39860
800	23000	950	7000	5700	21000	49700
1000	25600	1100	9500	6600	28500	60700
1250	27800	1700	14000	10200	42000	80000
1600	34000	2500	22000	15000	66000	115000

Πίνακας 6.7 – Προσφορές μετασχηματιστών εταιρίας Γ

Είναι άμεσα αντιληπτό ότι η εταιρία Α προσφέρει μετασχηματιστές υψηλών απωλειών, η εταιρία Β προσφέρει μετασχηματιστές μεσαίων απωλειών και η εταιρία Γ προσφέρει μονάδες χαμηλών απωλειών. Η δεύτερη παρατήρηση αφορά την τιμή πώλησης των μετασχηματιστών. Δηλαδή, η τιμή πώλησης είναι αντιστρόφως ανάλογη με τις απώλειες του μετασχηματιστή. Η παραπάνω παρατήρηση είναι απολύτως δικαιολογημένη, καθώς ένας αποδοτικός μετασχηματιστής κατασκευάζεται από υλικά υψηλής ποιότητας και η κατασκευή του απαιτεί μεγαλύτερο ερευνητικό και κατασκευαστικό έργο. Τέλος, παρατηρείται ότι οι μετασχηματιστές υψηλής απόδοσης κρίνονται ως οικονομικότερες επιλογές, καθώς καταλαμβάνουν τις μικρότερες τιμές του κόστους κατοχής (TOC). Παρόλο που η τιμή αγοράς τους είναι υψηλότερη από τις υπόλοιπες εναλλακτικές, το συνολικό κόστος λειτουργίας τους είναι μικρότερο. Το γεγονός αυτό φανερώνει την μεγάλη σημασία των απωλειών ενός μετασχηματιστή και δείχνει πόσο πολύ μπορεί να επηρεάσει την αγορά τους.

Με την πρώτη ματιά, η εξοικονόμηση χρημάτων από τους αποδοτικούς μετασχηματιστές δείχνει μικρή. Αξίζει να επισημανθεί ότι ο υπολογισμός της βέλτιστης προσφοράς των εταιριών αφορά την αγορά μίας μονάδας μετασχηματιστή από κάθε βαθμίδα. Επομένως, για τον υπολογισμό του συνολικού οφέλους από την εγκατάσταση νέων μετασχηματιστών, πρέπει να συμπεριληφθεί ο αριθμός των μετασχηματιστών που απαιτούνται να εγκατασταθούν στην περιοχή. Για περεταίρω κατανόηση, χρησιμοποιείται το παρακάτω παράδειγμα:

Έστω ότι ένα δίκτυο διανομής χρειάζεται να αντικαταστήσει 10 μετασχηματιστές των 50 kVA. Το συνολικό κόστος κατοχής (TOC) του μετασχηματιστή με την μικρότερη τιμή αγοράς, ανέρχεται στα 8190€, ενώ το συνολικό κόστος κατοχής (TOC) του αποδοτικού μετασχηματιστή ανέρχεται στα 7195€. Η διαφορά τους ανέρχεται στα 995€/μονάδα. Δηλαδή εξοικονομούνται 995€ από την αγορά μιας μονάδας μετασχηματιστή. Εφόσον ληφθεί υπόψη το πλήθος των μετασχηματιστών, η εξοικονόμηση χρημάτων ανέρχεται στα 9.950€

Στην περίπτωση που πραγματοποιείται αγορά πραγματοποιείται από ιδιώτη ή από μικρή εταιρία, ο υποψήφιος αγοραστής οφείλει να απευθυνθεί στις κατασκευάστριες εταιρίες και να λάβει προσφορές αγοράς μετασχηματιστών. Στην περίπτωση των μεγάλων εταιριών όπως η ΔΕΗ, η αγορά των μετασχηματιστών πραγματοποιείται μέσω προκήρυξη αγοράς. Δηλαδή δημοσιεύεται η επιθυμία για αγορά συγκεκριμένων ποσοτήτων μετασχηματιστών με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Οι κατασκευάστριες εταιρίες που επιθυμούν να λάβουν μέρος στον διαγωνισμό, στέλνουν τις προσφορές στους στο τμήμα αξιολόγησης αγοράς.

Στην πραγματικότητα η αγορά των μετασχηματιστών δεν πραγματοποιείται σύμφωνα με αυστηρά οικονομικά κριτήρια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μεγάλες εταιρίες, όπως η ΔΕΗ, επιδιώκουν συμβάσεις με τις κατασκευάστριες εταιρίες και λαμβάνουν την υποχρέωση να αποκτούν προϊόντα αποκλειστικά από εκείνες. Το μειονέκτημα της επικείμενης κίνησης είναι η αδυναμία αποδοχής μιας πιο οικονομικής προσφοράς από ανταγωνίστρια εταιρία [6.2-6.3].

6.6 Βιβλιογραφία

- [6.1] Π. Σ. Γεωργιλάκης, Ν. Δ. Χατζηαργυρίου, «Οικονομική Αξιολόγηση Μετασχηματιστών Διανομής», Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, ΙΙΙ, τεύχος 1-2, 2000, σελ. 51-62.
- [6.2] Συνέντευξη με τον κ. Διευθυντή διανομής ΔΕΗ Σάμου, κ. Κυριαζή Γεώργιο
- [6.3] Συνέντευξη με τον κ. Διευθυντή Σταθμού Παραγωγής (ΑΣΠ) Σάμου, κ. Ζαφείρη Δημήτριο
- [6.4] Υπηρεσιακό έγγραφο ΑΣΠ Σάμου «Στατιστικά μονάδων σταθμού Σάμου 2008»
- [6.5] Συνέντευξη με τους υπαλλήλους αποθήκης διαμονής Νομού Σάμου
- [6.6] Δημόσια επιχείρηση ηλεκτρισμού, «Οδηγός προγραμματισμού των δικτύων διανομής», 1998

Κεφάλαιο 7 – Αποτελέσματα μεθόδου ισοδύναμου κόστους επένδυσης

7.1 Γενικά

Σύμφωνα με την ενότητα 6, ο αριθμός των απαιτούμενων μετασχηματιστών αποτελεί τον πρώτο από τους δύο καθοριστικούς παράγοντες της τελικής αγοράς μετασχηματιστών. Ο δεύτερος παράγοντας είναι η οικονομική στρατηγική που ακολουθεί η αγοράστρια εταιρία. Η οικονομική στρατηγική συνδυάζεται άμεσα με το διαθέσιμο κεφάλαιο που δύναται να καταβληθεί για την αγορά των μετασχηματιστών, με σκοπό την επιδίωξη βραχυπρόθεσμου ή μακροπρόθεσμου κέρδους. Η αποθηκευτική δυνατότητα των εταιριών καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την επιλογή της βέλτιστης στρατηγικής που θα ακολουθεί. Στο παρόν κεφάλαιο χρησιμοποιούνται τρεις οικονομικές στρατηγικές [7.1-7.2]:

1. Αγορά μόνο των απαραίτητων μετασχηματιστών.
2. Αγορά των απαραίτητων μετασχηματιστών με την χρήση αποθήκης
3. Αγορά μέγιστης επιτρεπτής ποσότητας μετασχηματιστών

Οι παραπάνω στρατηγικές θεωρούνται ισάξιες και δεν είναι εφικτή η άμεση επιλογή της βέλτιστης. Η επιλογή της καταλληλότερης στρατηγικής αποτελεί καθαρά οικονομική επιλογή της εταιρείας, η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με τις κοινωνικές και οικονομικές συνθήκες κάθε χρονικής περιόδου.

Σκοπός της έρευνας είναι η εύρεση τις οικονομικότερης προσφοράς για κάθε βαθμίδα ξεχωριστά, ο υπολογισμός των απαιτούμενων ποσοτήτων μετασχηματιστών, οι προτεινόμενες ποσότητες μονάδων μετασχηματιστών όλων των βαθμίδων και το κόστος αγοράς τους για τα επόμενα πέντε χρόνια ξεχωριστά.

7.2 Σενάριο 1^ο - Αγορά των απαραίτητων μετασχηματιστών (χωρίς αποθήκη)

7.2.1 Εισαγωγή

Το πρώτο σενάριο που εξετάζεται, αναφέρεται στην αγορά μόνο των απαραίτητων μετασχηματιστών. Το παρόν σενάριο εφαρμόζεται από τις εταιρείες που επιδιώκουν να πραγματοποιηθούν μόνο οι απαραίτητες δαπάνες για την αγορά του εξοπλισμού. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται έλεγχος στον υπάρχον δίκτυο διανομής ρεύματος και εντοπίζονται οι μονάδες μετασχηματιστών που προβλέπεται να αντικατασταθούν στα επόμενα πέντε χρόνια. Οι τελικές ποσότητες των μετασχηματιστών ορίζονται ως ποσότητες κάθε βαθμίδας μετασχηματιστών που χρειάζονται αντικατάσταση στο δίκτυο, μείον τις ποσότητες μετασχηματιστών που υπάρχουν ήδη στους αποθηκευτικούς χώρους.

Η παραπάνω μέθοδος χαρακτηρίζεται ως η πιο οικονομική μέθοδος για την εταιρία, ωστόσο χαρακτηρίζεται και περισσότερο επικίνδυνη, καθώς η επανειλημμένη εφαρμογή της εξαντλεί τα αποθέματα μετασχηματιστών και παρουσιάζεται ο κίνδυνος της έλλειψης διαθέσιμων λειτουργικών μονάδων. Συγκεκριμένα, σε περίπτωση βλάβης μιας μονάδας του δικτύου δεν θα είναι εφικτή η άμεση αντικατάσταση της και συνεπώς προκύπτει ένα ελαττωματικό και ελλιπές δίκτυο.

Κατά την εφαρμογή του 1^{ου} σεναρίου, δεν χρειάζεται ο προσδιορισμός του διαθέσιμου κεφαλαίου. Ο αλγόριθμος ελαχιστοποιεί το κόστος αγοράς και το τελικό κόστος που υπολογίζεται αποτελεί το ελάχιστο δυνατό κόστος αγοράς που ικανοποιεί τις ανάγκες του δικτύου διανομής. Επομένως, οι περιορισμοί του προβλήματος αφορούν αποκλειστικά τον αριθμό των μετασχηματιστών. Αναλυτικά, οι περιορισμοί του σεναρίου είναι οι εξής:

1. Η ποσότητα των μετασχηματιστών πρέπει να είναι ακέραιος αριθμός. Όπως είναι απόλυτα λογικό, δεν είναι αποδεκτός δεκαδικός αριθμός που δηλώνει παραγγελίες μετασχηματιστών. Εφόσον η αγορά αφορά μονάδες μετασχηματιστών, δεν υπάρχει ενδιαφέρον για την αγορά επιμέρους εξαρτημάτων.
2. Το μέγεθος της παραγγελίας των μετασχηματιστών που παραγγέλλονται, οφείλει να μην ξεπερνά την μέγιστη χωρητικότητα της αποθήκης. Ως αποθήκη χρησιμοποιείται η έννοια της «εικονικής αποθήκης». Ο περιορισμός αυτός υφίσταται ώστε να αποτραπεί μια υπερβολικά μεγάλη παραγγελία, η οποία πιθανώς να δημιουργήσει προβλήματα στην αποθήκευση των μετασχηματιστών λόγω έλλειψης διαθέσιμου αποθηκευτικού χώρου.
3. Το μέγεθος της παραγγελίας των μετασχηματιστών ισούται με την ποσότητα των μετασχηματιστών που είναι απαραίτητη για την σωστή λειτουργία του δικτύου, αφαιρώντας από αυτή την ήδη υπάρχουσα αποθηκευμένη ποσότητα.

Δηλαδή, όσο υπάρχουν διαθέσιμοι μετασχηματιστές στις αποθήκες, δεν χρειάζεται παραγγελία νέων μονάδων.

Ποσότητα μετασχηματιστών	=	ακέραιος αριθμός
Τελική ποσότητα αγοράς	=	απαιτούμενη ποσότητα (-) ποσότητα αποθήκης
Τελική ποσότητα αγοράς	≤	μέγιστη χωρητικότητα αποθήκης
Ετήσιο κόστος αγοράς	≤	Ετήσιο διαθέσιμο κεφάλαιο

Πίνακας 7.1 – Περιορισμοί σεναρίου 1

7.2.2 Αποτελέσματα

Για την εκτέλεση του σεναρίου 1, πρέπει να προσδιοριστεί ο ακριβής αριθμός των μετασχηματιστών κάθε βαθμίδας που είναι απαραίτητος για την ομαλή λειτουργία του δικτύου. Τα βήματα του υπολογισμού περιγράφονται στη ενότητα 6.4 Έπειτα, υπολογίζεται η τελική ποσότητα των μετασχηματιστών, η οποία αρμόζει στις απαιτήσεις του σεναρίου 1. Οι τελικές ποσότητες των μετασχηματιστών, όλων των βαθμίδων, παρουσιάζονται στον πίνακα 7.2.

kVA	απαιτούμενη ποσότητα	ποσότητα αποθήκης	min αποθήκης	max αποθήκης	τελική ποσότητα
50	33	20	12	40	13
100	18	14	4	16	4
160	23	11	4	18	12
250	12	9	2	12	3
400	10	4	1	4	6
630	1	0	1	2	1
800	0	0	1	2	0
1000	0	1	1	2	0
1250	0	0	1	2	0
1600	0	0	1	2	0

Πίνακας 7.2 – Ποσότητες μετασχηματιστών σεναρίου 1

Στην στήλη «απαιτούμενη ποσότητα», αναγράφεται ο αριθμός των απαραίτητων μετασχηματιστών που απαιτούνται για την ομαλή λειτουργία του δικτύου. Οι απαιτούμενες ποσότητες των μετασχηματιστών συμβαδίζουν με τους υπολογισμούς της ενότητας 6.4. Οι στήλες «ποσότητα αποθήκης», «min αποθήκης» και «max αποθήκης», αναφέρονται στις παραμέτρους της εικονικής αποθήκης, που αναφέρονται στην ενότητα 6.3.3.2. Υπενθυμίζεται ότι η ποσότητα αποθήκης αναφέρεται στον αριθμό των ήδη αποθηκευμένων μετασχηματιστών, το min και max της αποθήκης στην ελάχιστη και στην μέγιστη ποσότητα που μπορεί να φιλοξενήσει η αποθήκη αντίστοιχα. Στην στήλη

«τελική ποσότητα», αναφέρονται οι ποσότητες των μετασχηματιστών κάθε βαθμίδας, σύμφωνα με τα λεγόμενα της ενότητας 7.1.1.

Στόχος της έρευνας είναι ο προσδιορισμός των βέλτιστων ποσοτήτων αγοράς μετασχηματιστών, ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος συνολικής κατοχής τους. Οι βέλτιστες ποσότητες υπολογίζονται ώστε να καλυφθεί χρονικό πλάνο αγοράς για μια πενταετία. Για τον υπολογισμό των ποσοτήτων χρησιμοποιείται ο βέλτιστος μετασχηματιστής σύμφωνα με την εξίσωση (TOC) της ενότητας 6.2. Στον πίνακα 7.3, δίνονται οι ποσότητες για όλες τις βαθμίδες (kVA) των μετασχηματιστών.

kVA	1 ^{ου} έτους	2 ^{ου} έτους	3 ^{ου} έτους	4 ^{ου} έτους	5 ^{ου} έτους	Σύνολο
50	0	2	4	4	3	13
100	0	1	1	0	2	4
160	5	1	3	2	1	12
250	0	1	0	1	1	3
400	2	1	0	1	2	6
630	0	1	0	0	0	1
800	0	0	0	0	0	0
1000	0	0	0	0	0	0
1250	0	0	0	0	0	0
1600	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 7.3 – Ποσότητες παραγγελιών μετασχηματιστών ανά έτος

Έχοντας υπολογίσει τις ακριβείς ποσότητες των μετασχηματιστών για κάθε έτος και βαθμίδα, υπολογίζεται το κόστος συνολικής κατοχής τους. Στην ουσία, πολλαπλασιάζεται η ποσότητα των τεμαχίων τους με το κόστος κατοχής του μετασχηματιστή. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 7.4 και είναι εκφράζεται σε ευρώ (€). Σε ορισμένες στήλες του πίνακα το κόστος κατοχής του μετασχηματιστή είναι μηδέν, το οποίο είναι απόλυτα λογικό καθώς δεν θα αγοραστεί κανένα τεμάχιο τις συγκεκριμένες βαθμίδες.

kVA	1 ^{ος} χρόνος	2 ^{ος} χρόνος	3 ^{ος} χρόνος	4 ^{ος} χρόνος	5 ^{ος} χρόνος
50	0	14350	28700	28700	21525
100	0	10685	10685	0	21370
160	77500	15500	46500	31000	15500
250	0	22000	0	22000	22000
400	63420	31710	0	31710	63420
630	0	39860	0	0	0
800	0	0	0	0	0
1000	0	0	0	0	0
1250	0	0	0	0	0
1600	0	0	0	0	0

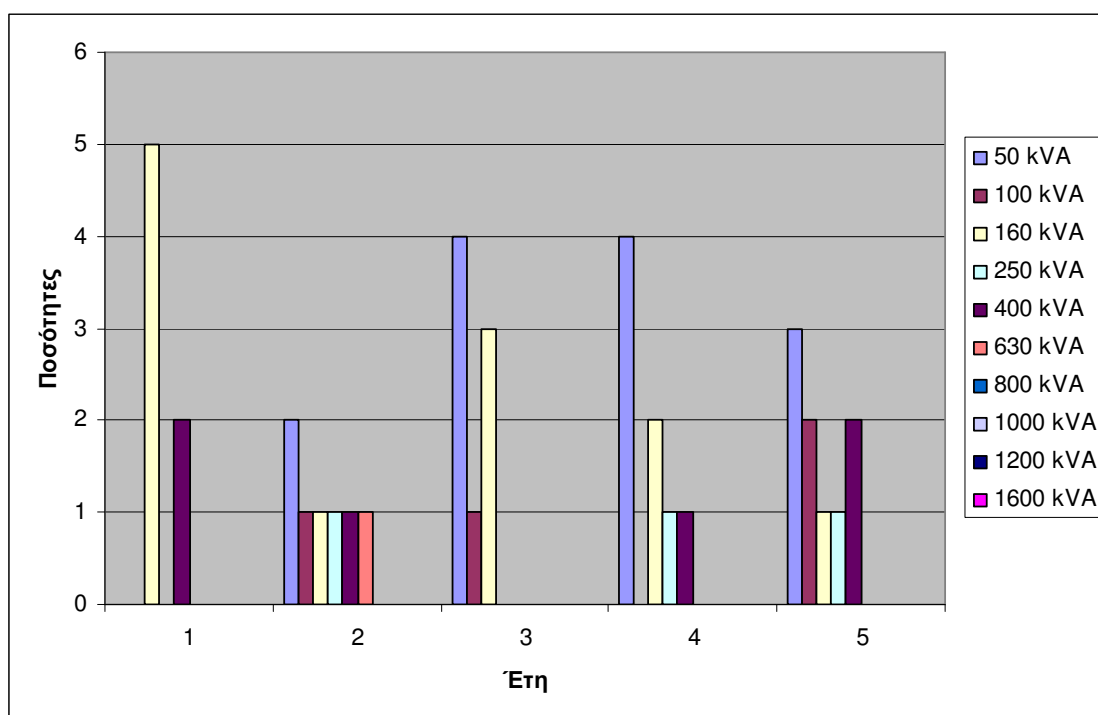
Πίνακας 7.4 – Κόστος αγοράς μετασχηματιστών (€)

Αφού έχει υπολογιστεί το κόστος κατοχής για κάθε βαθμίδα μετασχηματιστών, αθροίζονται τα κόστη και υπολογίζονται οι συνολικές δαπάνες ανά έτος. Έχοντας ως δεδομένο το διαθέσιμο ποσό, υπολογίζεται το χρηματικό υπόλοιπο όλης της επένδυσης. Δηλαδή, υπολογίζεται το ποσό που θα εξοικονομηθεί.

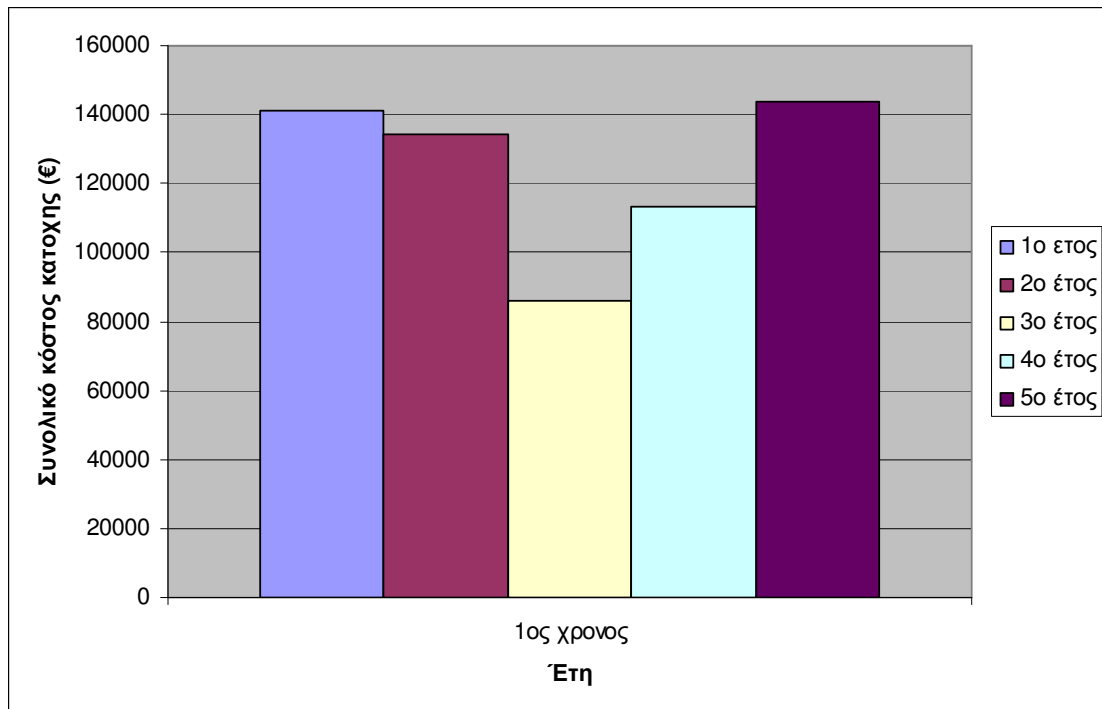
	1 ^{ος} χρόνος	2 ^{ος} χρόνος	3 ^{ος} χρόνος	4 ^{ος} χρόνος	5 ^{ος} χρόνος
Κόστος / έτος	140920	134105	85885	113410	143815
Συνολικό κόστος	618135				

Πίνακας 7.5 – Υπολογισμός συνολικών κόστους ανά έτος (€)

Στο σχήμα 7.1 παρουσιάζεται η ποσότητα των μετασχηματιστών κάθε βαθμίδας, που χρειάζεται να παραγγελθεί μέσα στην επόμενη πενταετία. Επίσης, στο σχήμα 7.2 παρουσιάζονται οι συνολικές δαπάνες της εταιρίας που ενδιαφέρεται για την αγορά των μετασχηματιστών.



Σχήμα 7.1 – Ποσότητες μετασχηματιστών ανά έτη



Σχήμα 7.2 – Κόστη συνολικής κατοχής μετασχηματιστών ανά έτη

7.3 Σενάριο 2^ο - Αγορά των απαραίτητων μετασχηματιστών (χρήση αποθήκης)

7.3.1 Εισαγωγή

Το δεύτερο σενάριο αποτελεί παραλλαγή του προηγούμενου. Η διαφοροποίηση με το πρώτο σενάριο αφορά την αποθήκευση επιπλέον μονάδων μετασχηματιστών. Το κόστος αγοράς των μετασχηματιστών αυξάνεται, καθώς στην αγορά προσθέτονται επιπλέον μονάδες, όμως απαλλάσσεται η εταιρία από τον κίνδυνο στέρησης υλικού σε περίπτωση βλάβης. Συγκεκριμένα, υπάρχουν πάντα αποθηκευμένες μονάδες όλων των βαθμίδων, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την άμεση αποκατάσταση του δικτύου. Το πλεονέκτημα αυτό κρίνεται απαραίτητο, καθώς η ΔΕΗ δεν αναλαμβάνει την επισκευή των ελαττωματικών μετασχηματιστών. Επομένως, στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της αποστολής του ελαττωματικού μετασχηματιστή και της επισκευής του από την κατασκευάστρια εταιρεία, οφείλει να εγκατασταθεί εφεδρικός μετασχηματιστής. Επομένως, η λειτουργία του δικτύου θα αποκατασταθεί σε σύντομο χρονικό διάστημα. Οι ελάχιστες ποσότητες των μετασχηματιστών που αποθηκεύονται προκύπτουν αναλογικά από τα ποσοστά χρήσης κάθε βαθμίδας μετασχηματιστών που βρίσκονται εγκαταστημένοι στο υπάρχον δίκτυο, σύμφωνα με την ενότητα 6.3.3.2.1.

Οι περιορισμοί του σεναρίου 2 συμφωνούν με τους περιορισμούς του προηγούμενου σεναρίου. Σε αυτήν την περίπτωση λαμβάνεται υπόψη το διαθέσιμο κεφάλαιο για την αγορά που παρέχεται για την αγορά των μετασχηματιστών. Αναλυτικά, οι περιορισμοί του προβλήματος είναι οι εξής:

1. Η ποσότητα των μετασχηματιστών πρέπει να είναι ακέραιος αριθμός. Όπως είναι απόλυτα λογικό, δεν είναι αποδεκτός δεκαδικός αριθμός που δηλώνει παραγγελίες μετασχηματιστών. Εφόσον η αγορά αφορά μονάδες μετασχηματιστών, δεν υπάρχει ενδιαφέρον για την αγορά επιμέρους εξαρτημάτων.
2. Το μέγεθος της παραγγελίας των μετασχηματιστών που παραγγέλλονται, οφείλει να μην ξεπερνά την μέγιστη χωρητικότητα της αποθήκης. Ως αποθήκη χρησιμοποιείται η έννοια της «εικονικής αποθήκης». Ο περιορισμός αυτός υφίσταται ώστε να αποτραπεί μια υπερβολικά μεγάλη παραγγελία, η οποία πιθανώς να δημιουργήσει προβλήματα στην αποθήκευση των μετασχηματιστών λόγω έλλειψης διαθέσιμου αποθηκευτικού χώρου.
3. Το μέγεθος της παραγγελίας των μετασχηματιστών ισούται με την ποσότητα των μετασχηματιστών που είναι απαραίτητη για την σωστή λειτουργία του δικτύου, αφαιρώντας από αυτή την ήδη υπάρχουσα αποθηκευμένη ποσότητα και προσθέτοντας την ελάχιστη ποσότητα που οφείλεται να βρίσκεται στην αποθήκη.
4. Το κόστος αγοράς των μετασχηματιστών οφείλει να είναι μικρότερο από το ετήσιο διαθέσιμο κεφάλαιο. Η παραγγελία των μετασχηματιστών δεν γίνεται να ξεπερνά το διαθέσιμο χρηματικό ποσό της αγοράς. Σε αντίθετη περίπτωση, πρέπει να μειωθούν οι ποσότητες των παραγγελλόμενων μετασχηματιστών. Μια ικανοποιητική προσέγγιση του ετησίου διαθέσιμου κεφαλαίου ανέρχεται στα 300.000€.

Ποσότητα μετασχηματιστών	=	ακέραιος αριθμός
Τελική ποσότητα αγοράς	=	απαιτούμενη ποσότητα (–) ποσότητα αποθήκης (+) ελάχιστη ποσότητα αποθήκης
Τελική ποσότητα αγοράς	≤	μέγιστη ποσότητα αποθήκης
Ετήσιο κόστος αγοράς	≤	Ετήσιος διαθέσιμο κεφάλαιο

Πίνακας 7.6 - Περιορισμοί σεναρίου 2

7.3.2 Αποτελέσματα

Όπως και στο σενάριο 1, πρέπει να γίνει προσδιορισμός των ακριβών ποσοτήτων μετασχηματιστών κάθε βαθμίδας. Ο προσδιορισμός πραγματοποιείται σύμφωνα με τα βήματα της ενότητας 6.4. Οι τελικές ποσότητες των μετασχηματιστών διαφέρουν από τις ποσότητες του σεναρίου 1, καθώς πραγματοποιείται αγορά περισσότερων ποσοτήτων μετασχηματιστών, ώστε να συμπληρωθεί το ελάχιστο όριο της αποθήκης. Οι τελικές ποσότητες, για κάθε βαθμίδα μετασχηματιστών δίνονται στον πίνακα 7.7

kVA	απαιτούμενη ποσότητα	ποσότητα αποθήκης	min αποθήκης	max αποθήκης	τελική ποσότητα
50	33	20	12	40	25
100	18	14	4	16	8
160	23	11	4	18	16
250	12	9	2	12	5
400	10	4	1	4	7
630	1	0	1	2	2
800	0	0	1	2	1
1000	0	1	1	2	0
1250	0	0	1	2	1
1600	0	0	1	2	1

Πίνακας 7.7 - Ποσότητες μετασχηματιστών σεναρίου 2

Στην συνέχεια πραγματοποιείται ο προσδιορισμός των βέλτιστων ποσοτήτων αγοράς των μετασχηματιστών, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος κατοχής τους. Ομοίως με το σενάριο 1, υπολογίζονται οι βέλτιστες ποσότητες για τα επόμενα πέντε χρόνια. Οι βέλτιστες ποσότητες του σεναρίου 2, δίνονται στον πίνακα 7.8.

kVA	1 ^ο έτους	2 ^ο έτους	3 ^ο έτους	4 ^ο έτους	5 ^ο έτους	Συνολο
50	5	6	3	5	6	25
100	3	2	2	1	0	8
160	3	5	0	6	2	16
250	2	0	1	0	2	5
400	1	1	3	1	1	7
630	0	0	0	2	0	2
800	0	0	1	0	0	1
1000	0	0	0	0	0	0
1250	0	0	1	0	0	1
1600	0	0	0	0	1	1

Πίνακας 7.8 - Ποσότητες παραγγελιών μετασχηματιστών ανά έτος

Έχοντας υπολογίσει τις ακριβείς ποσότητες των μετασχηματιστών για κάθε έτος και βαθμίδα, εκτιμάται το κόστος συνολικής κατοχής τους. Για τον υπολογισμό του κόστους χρησιμοποιείται η μεθοδολογία του σεναρίου 1. Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 7.9. Σε ορισμένες στήλες του πίνακα το κόστος κατοχής του μετασχηματιστή είναι μηδέν, το οποίο είναι απόλυτα λογικό καθώς δεν θα αγοραστεί κανένα τεμάχιο τις συγκεκριμένες βαθμίδες.

kVA	1 ^{ος} χρόνος	2 ^{ος} χρόνος	3 ^{ος} χρόνος	4 ^{ος} χρόνος	5 ^{ος} χρόνος
50	35875	43050	21525	35875	43050
100	32055	21370	21370	10685	0
160	46500	77500	0	93000	31000
250	44000	0	22000	0	44000
400	31710	31710	95130	31710	31710
630	0	0	0	79720	0
800	0	0	49700	0	0
1000	0	0	0	0	0
1250	0	0	80000	0	0
1600	0	0	0	0	115000

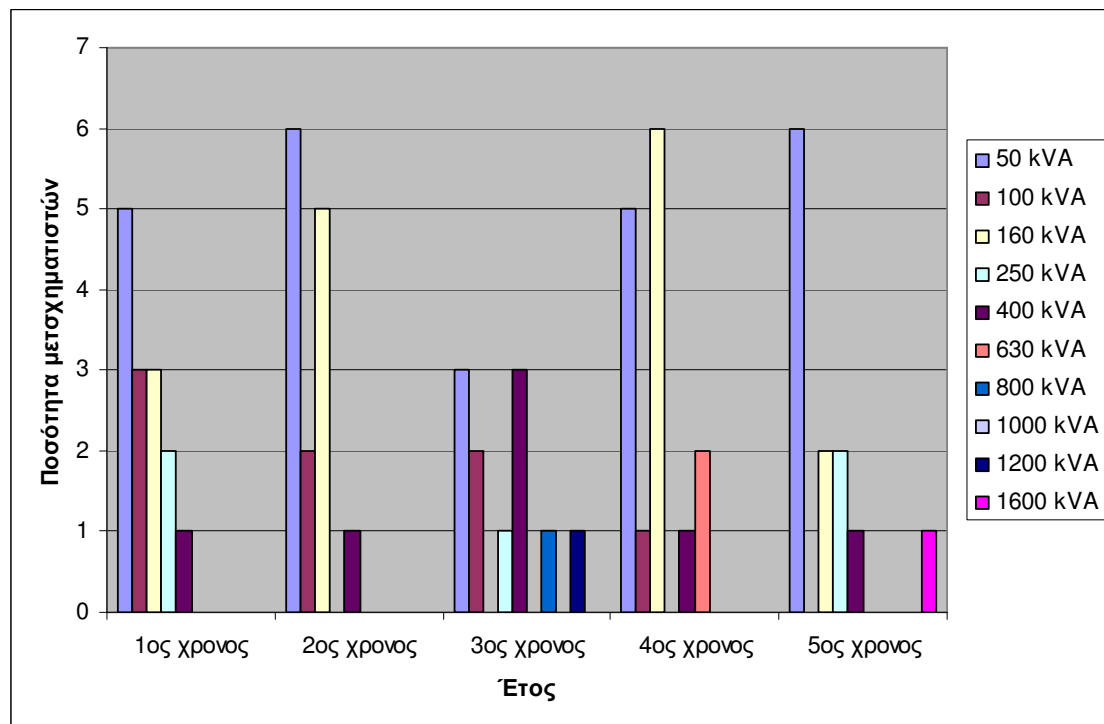
Πίνακας 7.9 - Πίνακας κόστους αγοράς μετασχηματιστών (€)

Αφού έχει υπολογιστεί το κόστος κατοχής για κάθε βαθμίδα μετασχηματιστών, αθροίζονται τα κόστη και υπολογίζονται οι συνολικές δαπάνες ανά έτος. Θεωρώντας ως δεδομένο το διαθέσιμο ποσό, υπολογίζεται και το χρηματικό υπόλοιπο όλης της επένδυσης. Δηλαδή, υπολογίζεται το ποσό που θα εξοικονομηθεί.

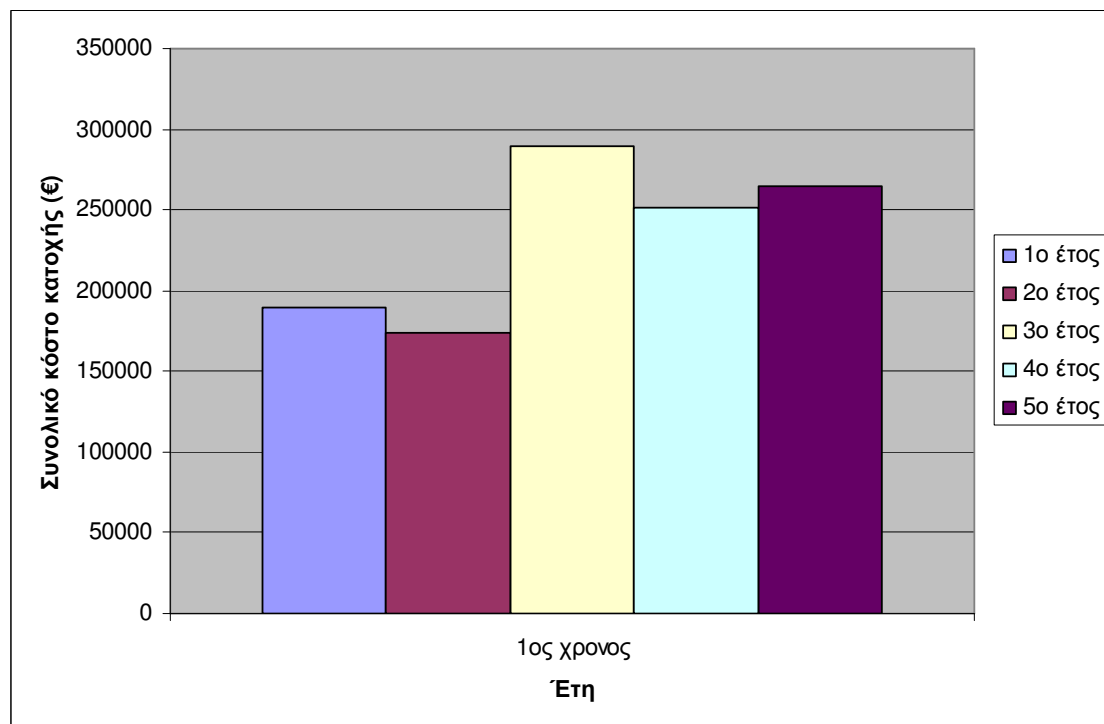
	1 ^{ος} χρόνος	2 ^{ος} χρόνος	3 ^{ος} χρόνος	4 ^{ος} χρόνος	5 ^{ος} χρόνος
Κόστος / έτος	190140	173630	289725	250990	264760
Συνολικό κόστος	1169245				

Πίνακας 7.10 - Υπολογισμός συνολικών κόστους ανά έτος (€)

Στο σχήμα 7.3 παρουσιάζεται η ποσότητα των μετασχηματιστών κάθε βαθμίδος, που χρειάζεται να παραγγελθεί μέσα στην επόμενη πενταετία. Επίσης, στο σχήμα 7.4 παρουσιάζονται οι συνολικές δαπάνες της εταιρίας που ενδιαφέρεται για την αγορά των μετασχηματιστών.



Σχήμα 7.3 - Ποσότητες μετασχηματιστών ανά έτη



Σχήμα 7.4 - Κόστη συνολικής κατοχής μετασχηματιστών ανά έτη

7.4 Σενάριο 3^ο – Αγορά μέγιστης επιτρεπτής ποσότητας μετασχηματιστών

7.4.1 Εισαγωγή

Με την εφαρμογή του 3^{ου} σεναρίου, εισάγεται ξανά ως δεδομένο το διαθέσιμο κεφάλαιο αγοράς. Στόχος του παρόντος σεναρίου είναι η αγορά της μέγιστης επιτρεπτής ποσότητας μετασχηματιστών που ορίζεται σύμφωνα με το διαθέσιμο κεφάλαιο και την χωρητικότητα της αποθήκης. Το πρόβλημα μετατρέπεται από πρόβλημα ελαχιστοποίησης κόστους σε πρόβλημα μεγιστοποίησης κόστους.

Η αγορά μετασχηματιστών μεγαλύτερης ποσότητας από την αναγκαία, έχει ως αποτέλεσμα την τροφοδότηση της αποθήκης με επιπλέον διαθέσιμες μονάδες. Η παραπάνω τροφοδοσία επιδιώκει την μεγιστοποίηση των αποθεμάτων. Επομένως, η αποκατάσταση των ελαττωματικών μετασχηματιστών είναι εφικτή και άμεση. Η εφαρμογή του 3^{ου} σεναρίου είναι η περισσότερο δαπανηρή σε σύγκριση με τις υπόλοιπες. Καθώς οι μετασχηματιστές διανομής αποθηκεύονται για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς φθορά, παρατηρείτε μακροπρόθεσμο κέρδος από τις μελλοντικές αγορές. Δηλαδή, η υπάρχουσα αποθηκευμένη ποσότητα μπορεί να καλύψει τις μελλοντικές ανάγκες αγοράς. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη την αύξηση των τιμών αγοράς και μεταφοράς μετασχηματιστών, παρουσιάζεται αύξηση του μακροπρόθεσμου κέρδους και μείωση του χρόνου απόσβεσης. Το παρόν σενάριο προτείνεται σε επιχειρήσεις με μεγάλο διαθέσιμο κεφάλαιο, λόγω του αυξημένου αρχικού κόστους επένδυσης.

Η αντικειμενική συνάρτηση του σεναρίου 3 παραμένει ίδια με την αντικειμενική συνάρτηση των προηγούμενων σεναρίων. Μόνο που σε αυτήν την περίπτωση δεν προσεγγίζεται η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, αλλά η μεγιστοποίηση του. Δηλαδή, ακολουθώντας την φιλοσοφία του σεναρίου, υπολογίζονται οι μέγιστες ποσότητες μετασχηματιστών ώστε να καλυφθούν οι διαθέσιμοι χώροι αποθήκευσης, ή να εξαντληθεί το διαθέσιμο κεφάλαιο. Επομένως, το πρόβλημα που δημιουργείται είναι πρόβλημα μεγιστοποίησης.

Οι περιορισμοί του σεναρίου 3 συμφωνούν με τους περιορισμούς του προηγούμενου σεναρίου. Σε αυτήν την περίπτωση λαμβάνεται υπόψη το διαθέσιμο κεφάλαιο για την αγορά που παρέχεται για την αγορά των μετασχηματιστών. Αναλυτικά, οι περιορισμοί του προβλήματος είναι οι εξής:

1. Η ποσότητα των μετασχηματιστών πρέπει να είναι ακέραιος αριθμός. Όπως είναι απόλυτα λογικό, δεν είναι αποδεκτός δεκαδικός αριθμός που δηλώνει παραγγελίες μετασχηματιστών. Εφόσον η αγορά αφορά μονάδες μετασχηματιστών, δεν υπάρχει ενδιαφέρον για την αγορά επιμέρους εξαρτημάτων.

2. Το μέγεθος της παραγγελίας των μετασχηματιστών που παραγγέλλονται, οφείλει να μην ξεπερνά την μέγιστη χωρητικότητα της αποθήκης. Ως αποθήκη χρησιμοποιείται η έννοια της «εικονικής αποθήκης». Ο περιορισμός αυτός υφίσταται ώστε να αποτραπεί μια υπερβολικά μεγάλη παραγγελία, η οποία πιθανώς να δημιουργήσει προβλήματα στην αποθήκευση των μετασχηματιστών λόγω έλλειψης διαθέσιμου αποθηκευτικού χώρου
3. Το μέγεθος της παραγγελίας των μετασχηματιστών ισούται με την ποσότητα των μετασχηματιστών που είναι απαραίτητη για την σωστή λειτουργία του δικτύου, αφαιρώντας από αυτή την ήδη υπάρχουσα αποθηκευμένη ποσότητα και προσθέτοντας την ελάχιστη ποσότητα που οφείλεται να βρίσκεται στην αποθήκη.
4. Το κόστος αγοράς των μετασχηματιστών οφείλει να είναι μικρότερο από το ετήσιο διαθέσιμο κεφάλαιο. Η παραγγελία των μετασχηματιστών δεν μπορεί να ξεπεράσει το διαθέσιμο χρηματικό ποσό της αγοράς. Σε αντίθετη περίπτωση, πρέπει να μειωθούν οι ποσότητες των παραγγελλόμενων μετασχηματιστών. Μια ικανοποιητική προσέγγιση του ετησίου διαθέσιμου κεφαλαίου ανέρχεται στα 300.000€.

Ποσότητες μετασχηματιστών	=	ακέραιος αριθμός
Ποσότητα μετασχηματιστών	$\leq$	μέγιστη ποσότητα αποθήκης
Ποσότητα μετασχηματιστών	$\geq$	ελάχιστη ποσότητα αποθήκης
Συνολικό κόστος αγοράς	$\leq$	διαθέσιμο κεφάλαιο

Πίνακας 7.11 - Περιορισμοί σεναρίου 3

7.4.2 Αποτελέσματα

Σε αντίθεση με τα σενάρια 1 και 2, στο σενάριο 3 δεν χρειάζεται ο προσδιορισμός των αναγκαίων ποσοτήτων μετασχηματιστών. Στο σενάριο 3, δεν απαιτείται να αγοραστεί μια συγκεκριμένη ποσότητα μετασχηματιστών, καθώς αγοράζονται όσο δυνατόν περισσότεροι μετασχηματιστές, μέχρι να εξαντληθεί το διαθέσιμο κεφάλαιο ή η χωρητικότητα της αποθήκης. Εφαρμόζοντας την μέθοδο ισοδύναμου κόστους, λαμβάνονται τα αποτελέσματα του πίνακα 7.12.

kVA	1 ^ο έτους	2 ^ο έτους	3 ^ο έτους	4 ^ο έτους	5 ^ο έτους	Σύνολο
50	8	2	9	2	3	24
100	7	0	0	8	0	15
160	1	9	6	0	2	18
250	0	0	0	1	11	12
400	0	0	3	0	0	3
630	0	1	1	0	0	2
800	0	2	0	0	0	2
1000	0	0	0	1	0	1
1250	2	0	0	0	0	2
1600	0	0	0	1	0	1

Πίνακας 7.12 - Ποσότητες μετασχηματιστών σεναρίου 3

Στην συνέχεια υπολογίζεται το κόστος κατοχής των μετασχηματιστών, ακολουθώντας την διαδικασία που αναπτύχθηκε στα σεναρία 1 και 2.

kVA	1 ^{ος} χρόνος	2 ^{ος} χρόνος	3 ^{ος} χρόνος	4 ^{ος} χρόνος	5 ^{ος} χρόνος
50	57400	14350	64575	14350	21525
100	74795	0	0	85480	0
160	15500	139500	93000	0	31000
250	0	0	0	22000	242000
400	0	0	95130	0	0
630	0	39860	39860	0	0
800	0	99400	0	0	0
1000	0	0	0	60700	0
1250	160000	0	0	0	0
1600	0	0	0	115000	0

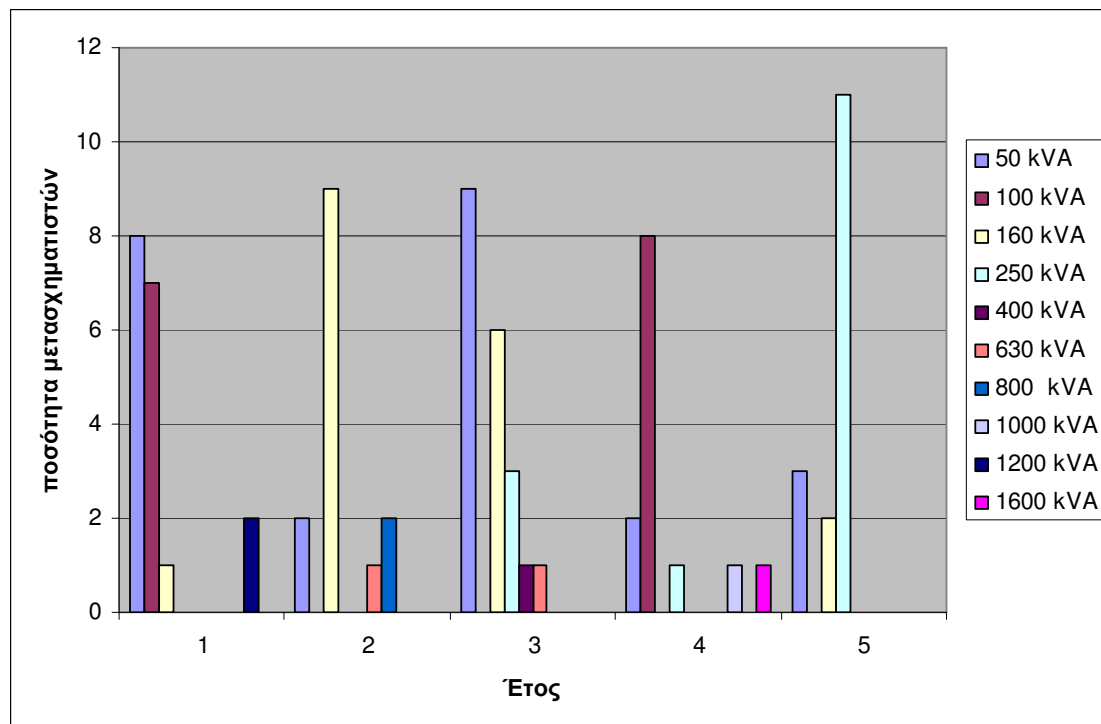
Πίνακας 7.13 - Κόστος αγοράς μετασχηματιστών (€)

Τέλος, αθροίζονται τα κόστη και υπολογίζονται οι συνολικές δαπάνες ανά έτος. Έχοντας ως δεδομένο το διαθέσιμο ποσό, υπολογίζεται το χρηματικό υπόλοιπο όλης της επένδυσης. Δηλαδή, υπολογίζεται το ποσό που θα εξοικονομηθεί.

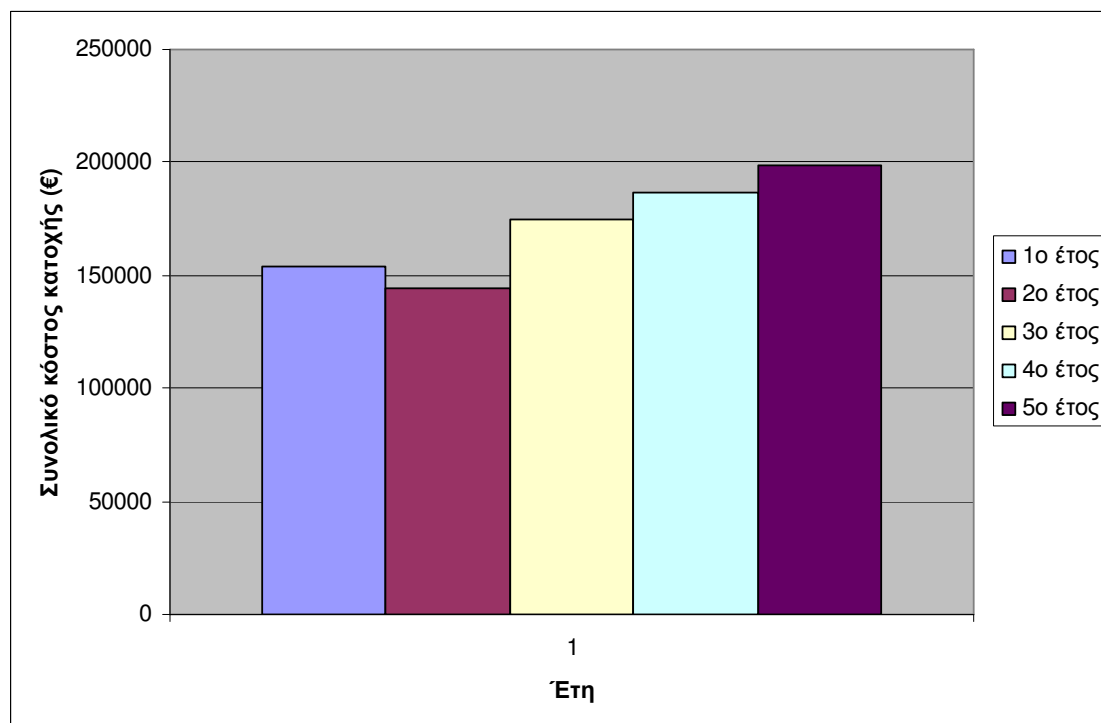
	1 ^{ος} χρόνος	2 ^{ος} χρόνος	3 ^{ος} χρόνος	4 ^{ος} χρόνος	5 ^{ος} χρόνος
Διαθέσιμα	300000	300000	300000	300000	300000
Κόστος / έτος	307695	293110	292565	297530	294525
Συνολικό κόστος	1485425				

Πίνακας 7.14 - Υπολογισμός συνολικών κόστους ανά έτος (€)

Στο σχήμα 7.5 παρουσιάζεται η ποσότητα των μετασχηματιστών κάθε βαθμίδος, που χρειάζεται να παραγγελθεί μέσα στην επόμενη πενταετία. Στο σχήμα 7.6 παρουσιάζονται οι συνολικές δαπάνες της εταιρίας που ενδιαφέρεται για την αγορά των μετασχηματιστών.



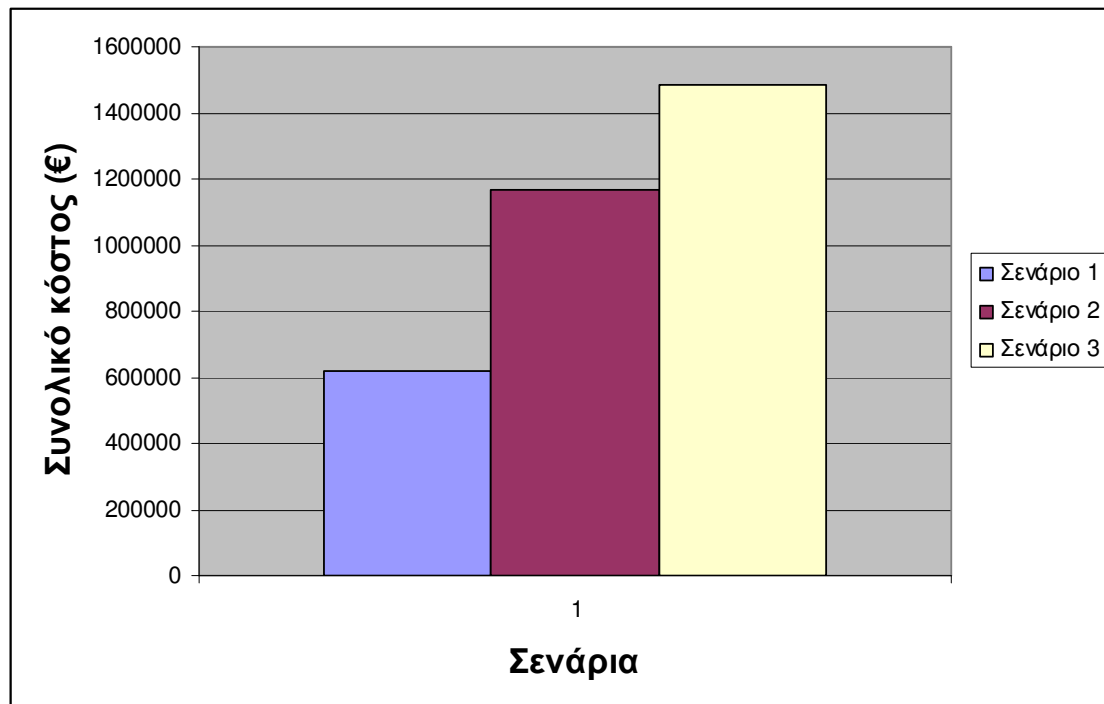
Σχήμα 7.5 - - Ποσότητες μετασχηματιστών ανά έτη



Σχήμα 7.6 - Κόστη συνολικής κατοχής μετασχηματιστών ανά έτη

7.5 Σύγκριση σεναρίων

Σε αυτό το σημείο πραγματοποιείται μια μικρή επισκόπηση των σεναρίων. Η δημιουργία των τριών σεναρίων βασίστηκε στην προσπάθεια μείωσης του συνολικού κόστους αγοράς των μετασχηματιστών. Επομένως, κρίνεται αναγκαίο η σύγκριση του κόστους εφαρμογής κάθε σεναρίου και επίσης η σύγκριση του χρηματικού ποσού που εξοικονομείται από την αγορά. Το συνολικό κόστος σεναρίων δίνεται στο σχήμα 7.7.



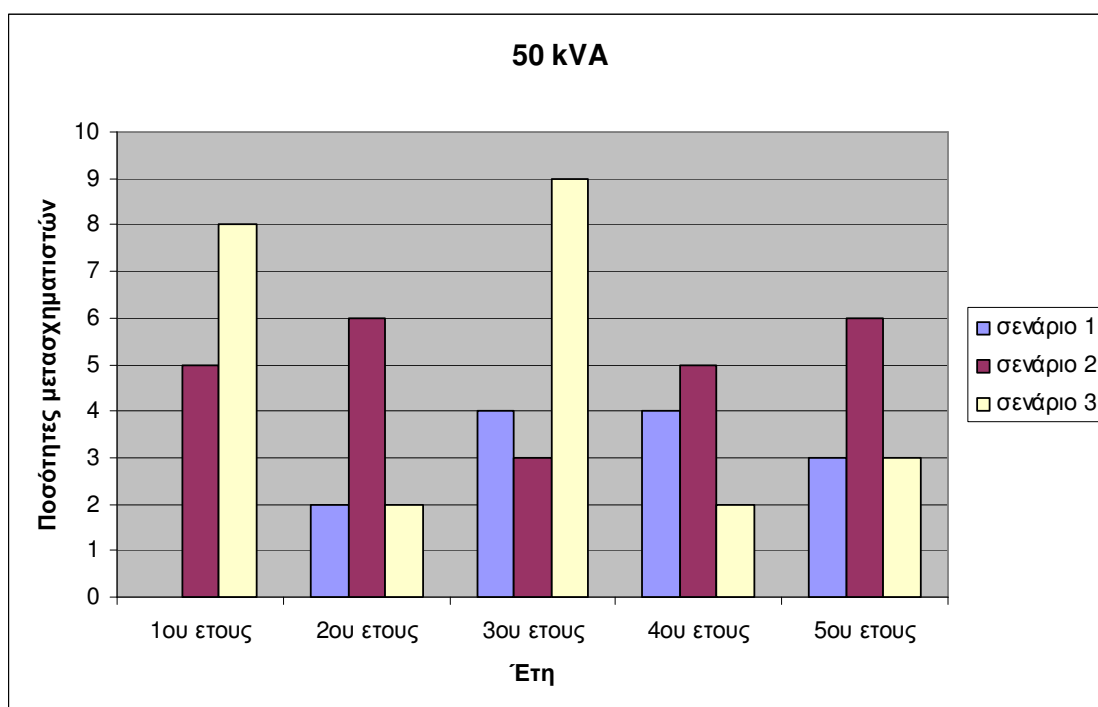
Σχήμα 7.7 – Συνολικό κόστος σεναρίων

Η εφαρμογή του σεναρίου 1 έχει το μικρότερο δυνατό κόστος αγοράς. Όμως, όπως αναλύθηκε στην ενότητα 7.2.1, η εφαρμογή του σεναρίου 1 κρύβει ορισμένους κινδύνους. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή του προτείνεται σε περιόδους οικονομικής κρίσης, δηλαδή κατά την περίοδο που δεν υπάρχει μεγάλο διαθέσιμο κεφάλαιο για την αγορά των μετασχηματιστών. Η επανειλημμένη χρήση του σεναρίου 1 δημιουργεί πρόβλημα διαθεσιμότητας μετασχηματιστών, καθώς σταδιακά μειώνονται τα αποθέματα των αποθηκών. Ως αποτέλεσμα, η διαθεσιμότητα πλησιάζει το κρίσιμο σημείο, όπου οι ποσότητα των μετασχηματιστών ισούται ακριβώς με τις ανάγκες του δικτύου. Το γεγονός αυτό ορίζεται ως κρίσιμο, καθώς σε περίπτωση βλάβης ενός μετασχηματιστή δεν υπάρχει διαθέσιμη μονάδα για αντικατάσταση.

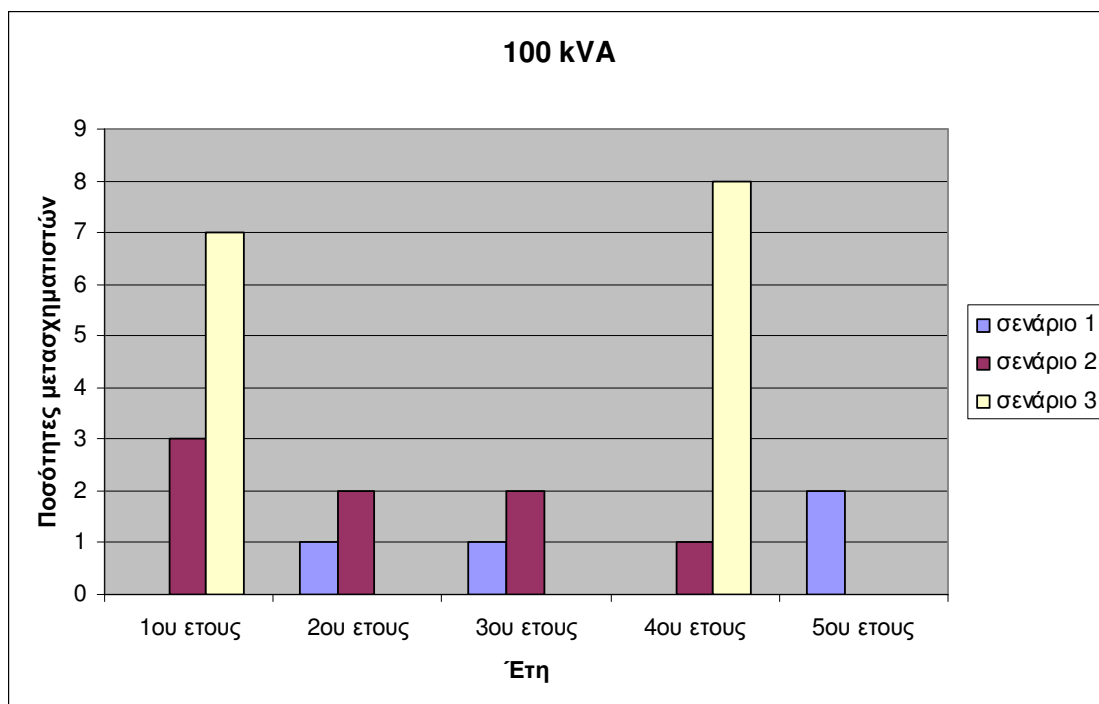
Το κόστος του σεναρίου 2 είναι κοντινό με το κόστος του σεναρίου 3. Το στοιχείο αυτό δεν είναι επαρκές ώστε να δοθούν ασφαλή συμπεράσματα για τα δύο σενάρια. Στην περίπτωση του σεναρίου 3, το συνολικό κόστος επηρεάζεται αποκλειστικά

από το μέγεθος της αποθήκης και από το διαθέσιμο κεφάλαιο. Δηλαδή, σε περίπτωση που το μέγεθος της αποθήκης ήταν μεγαλύτερο, το συνολικό κόστος απόκτησης μετασχηματιστών θα ήταν πολύ μεγαλύτερο, σε σημείο να καταναλώνεται όλο το διαθέσιμο κεφάλαιο. Στην περίπτωση του σεναρίου 2 δεν συμβαίνει το ίδιο. Στο σενάριο 2 υπάρχει σαφής περιορισμός στην ποσότητα αγοράς των μετασχηματιστών και ορίζεται μόνο από τις ανάγκες του δικτύου και το ασφαλή απόθεμα της αποθήκης. Δηλαδή, δεν επηρεάζεται από το μέγεθος της αποθήκης. Επομένως ο βασικός περιορισμός του σεναρίου 2 είναι το διαθέσιμο κεφάλαιο. Για αυτόν τον λόγο, θεωρείται ως το πιο αποδοτικό σενάριο. Αξίζει να σημειωθεί ότι το αυξημένο κόστος του 2^{ου} σεναρίου οφείλεται στην ανάγκη αγοράς μεγάλων ποσοτήτων μετασχηματιστών. Την συγκεκριμένη χρονική στιγμή, χρειάζονται αντικατάσταση αρκετοί μετασχηματιστές λόγω ηλικίας και λόγω φορτίου. Στις μελλοντικές αγορές, οι ποσότητες των αναγκαίων μετασχηματιστών μειώνονται, καθώς ένα μέρος τους έχει αντικατασταθεί τα προηγούμενα έτη. Επομένως, η συνεχής εφαρμογή του σεναρίου 2 κρίνεται αποδοτική και το συνολικό κόστος των αγορών μειώνεται όσο εφαρμόζεται το ίδιο σενάριο.

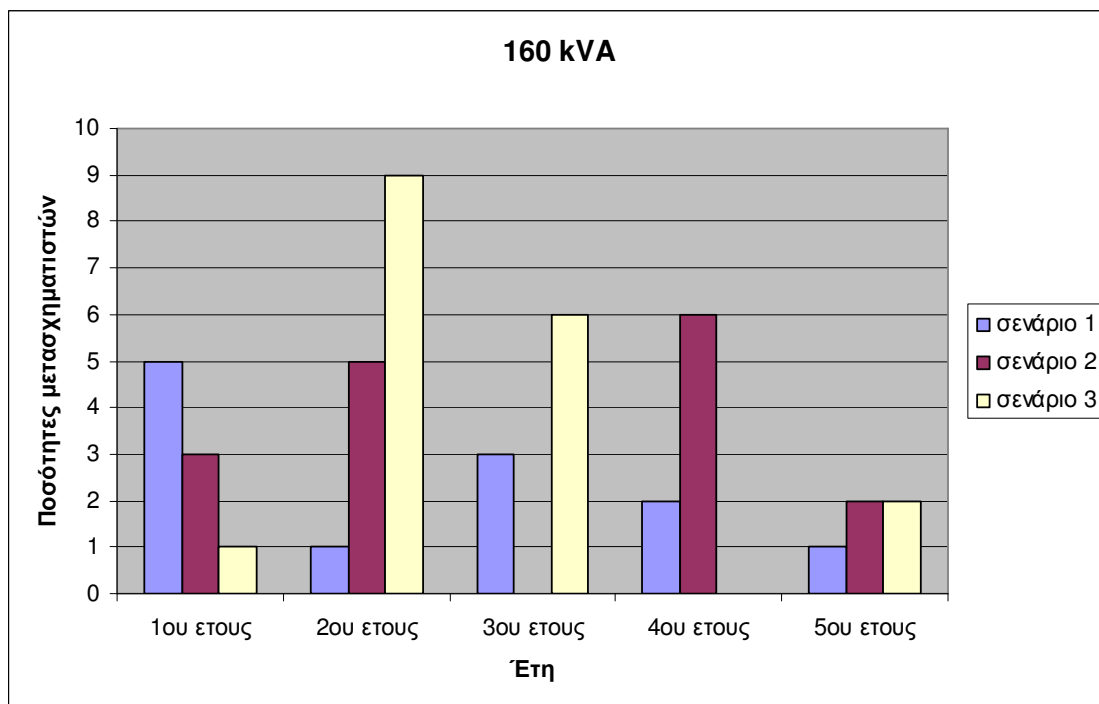
Τέλος, δίνονται οι ποσότητες παραγγελιών των μετασχηματιστών έπειτα από την εφαρμογή και των τριών σεναρίων. Υπενθυμίζεται ότι δεν είναι εφικτός ο συνδυασμός των σεναρίων, καθώς το κάθε σενάριο αποτελείται από δεδομένα ποσοτήτων μετασχηματιστών, τα οποία εξαρτώνται αποκλειστικά από την φιλοσοφία του κάθε σεναρίου.



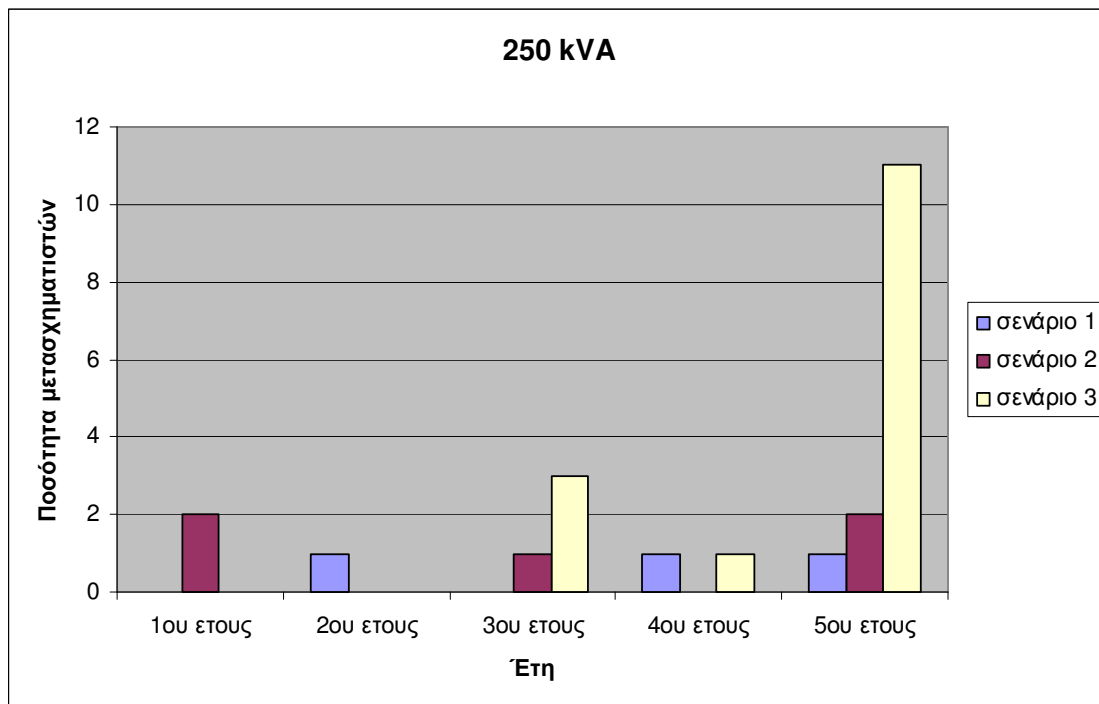
Σχήμα 7.9 – Ποσότητες μετασχηματιστών 50 kVA



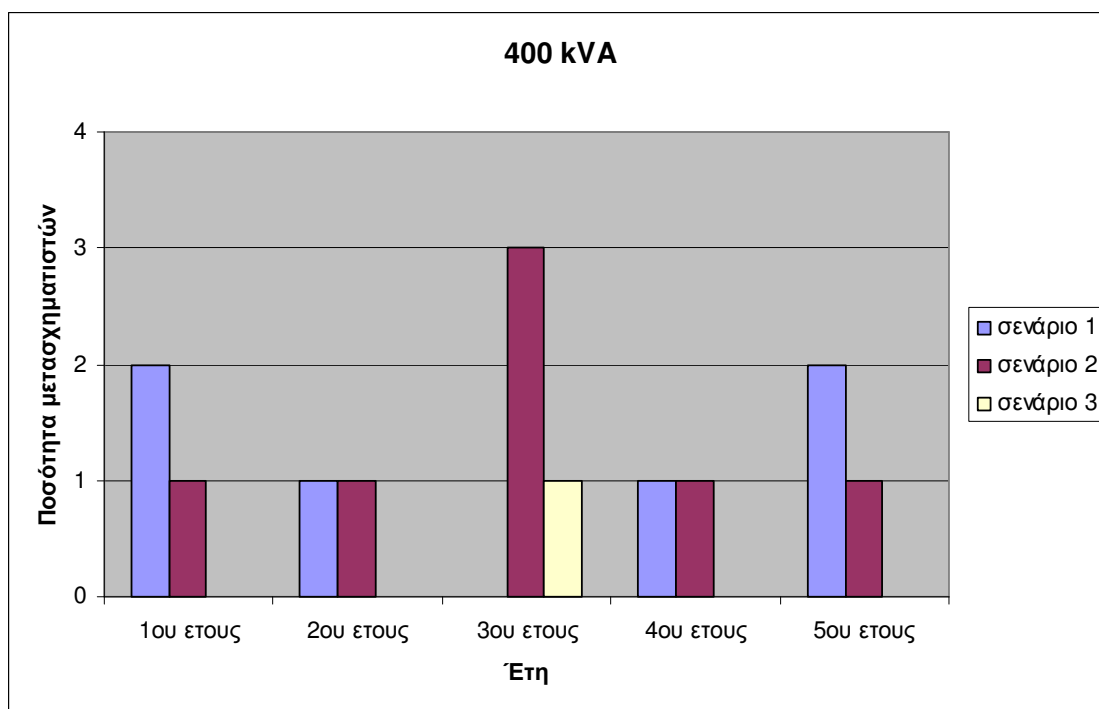
Σχήμα 7.10 - Ποσότητες μετασχηματιστών 100 kVA



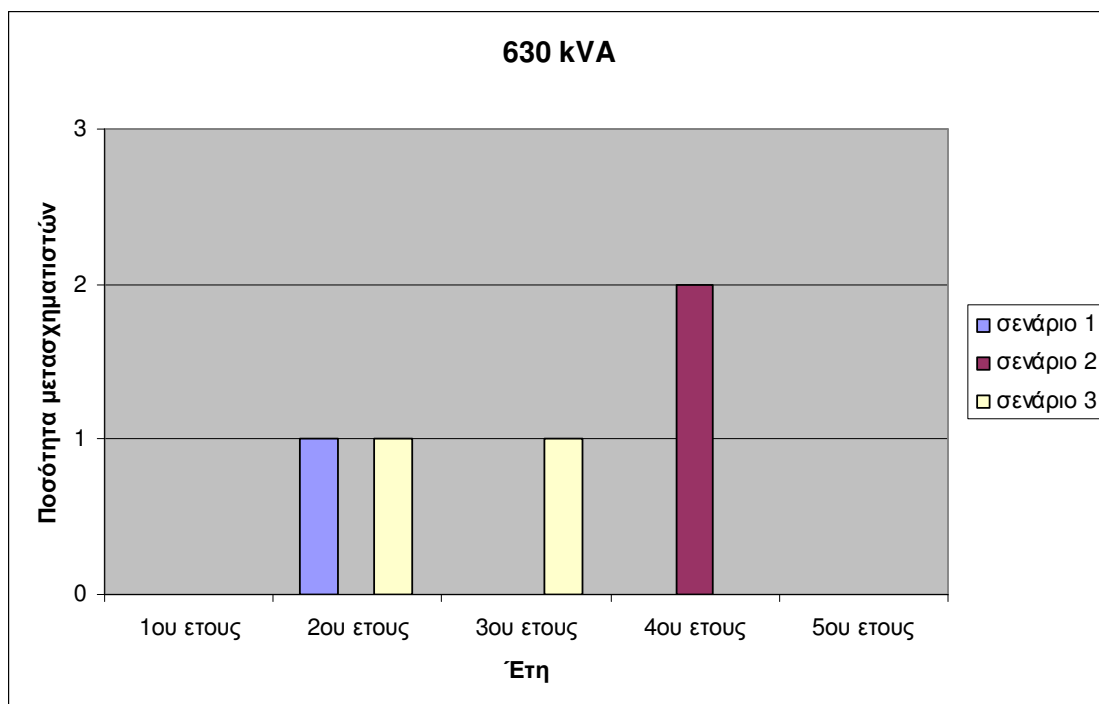
Σχήμα 7.11 - Ποσότητες μετασχηματιστών 160 kVA



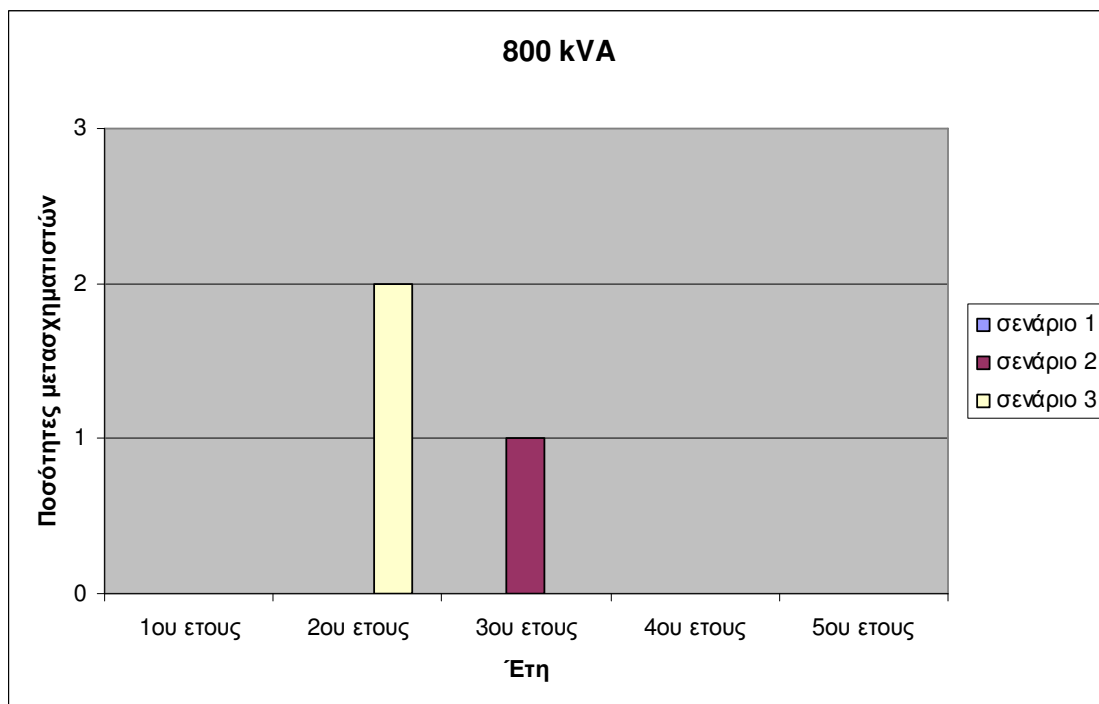
Σχήμα 7.12 - Ποσότητες μετασχηματιστών 250 kVA



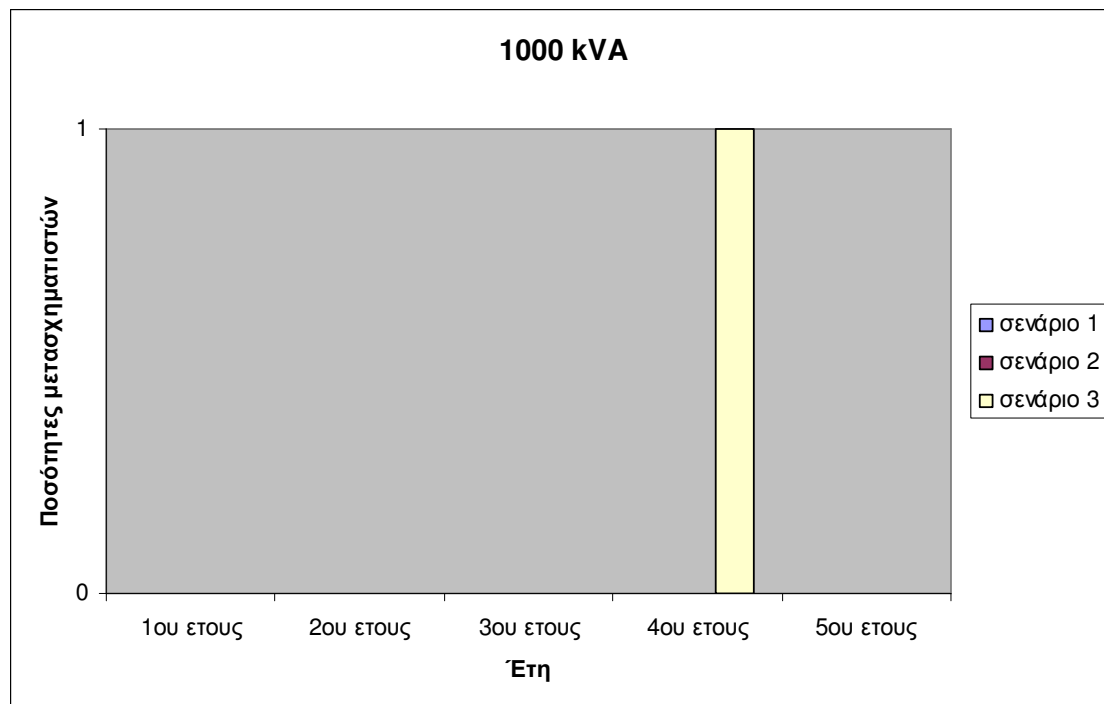
Σχήμα 7.13 - Ποσότητες μετασχηματιστών 400 kVA



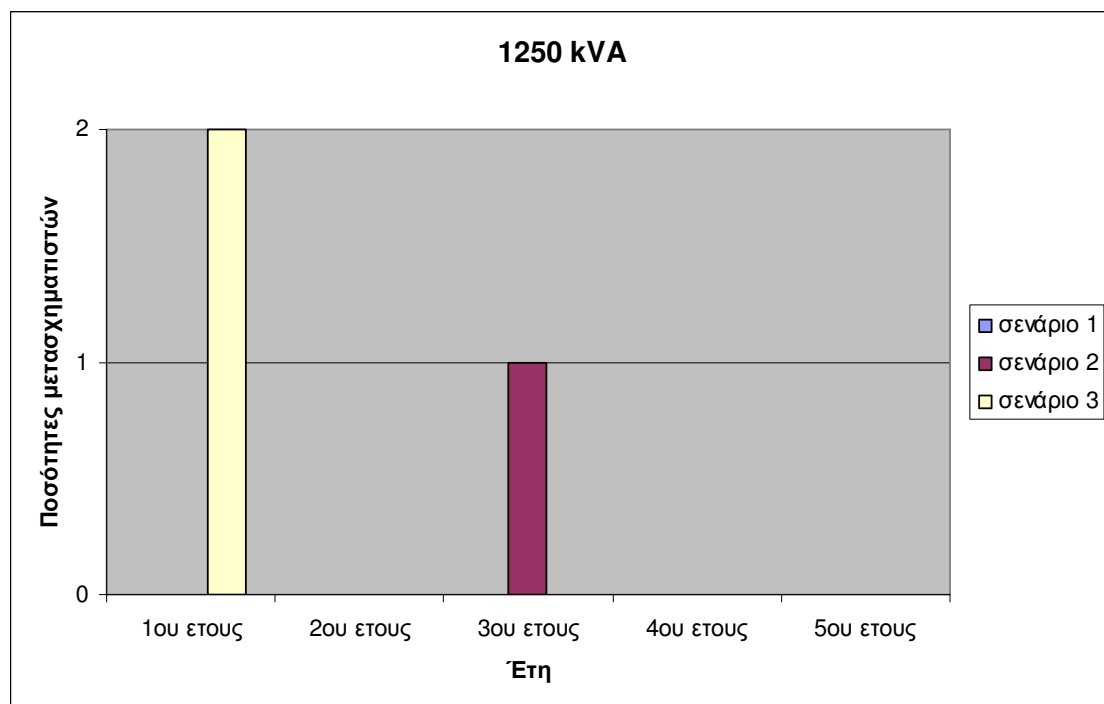
Σχήμα 7.14 - Ποσότητες μετασχηματιστών 630 kVA



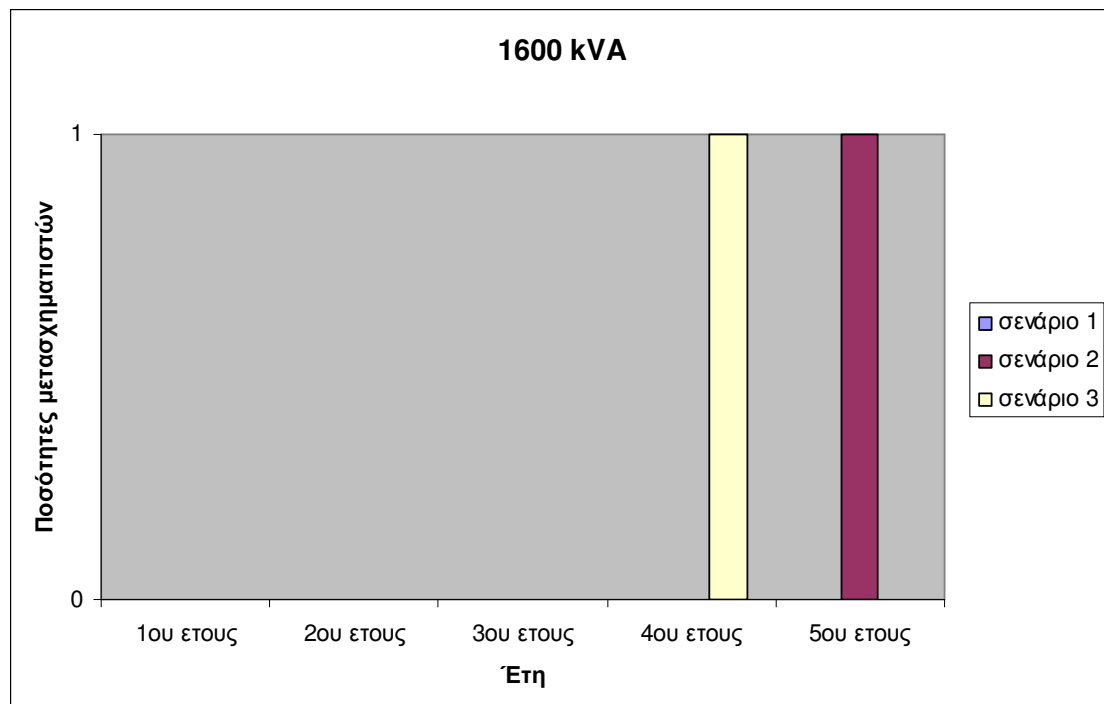
Σχήμα 7.15 - Ποσότητες μετασχηματιστών 800 kVA



Σχήμα 7.16 - Ποσότητες μετασχηματιστών 1000 kVA



Σχήμα 7.17 - Ποσότητες μετασχηματιστών 1250 kVA



Σχήμα 7.18 - Ποσότητες μετασχηματιστών 1600 kVA

7.6 Βιβλιογραφία

- [7.1] Συνέντευξη με τον κ.Διευθυντή διανομής ΔΕΗ Σάμου, κ. Κυριαζή Γεώργιο
- [7.2] Συνέντευξη με τον κ. Διευθυντή Σταθμού Παραγωγής (ΑΣΠ) Σάμου, κ. Ζαφείρη Δημήτριο

Κεφάλαιο 8 – Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν οι μέθοδοι αξιολόγησης των μετασχηματιστών υψηλής ενεργειακής απόδοσης. Δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στο κόστος των απωλειών σε σχέση με το αρχικό κόστος αγοράς τους. Οι συγκρίσεις που περιλαμβάνονται στην εργασία έγιναν σε σχέση με το συνολικό κόστος κατοχής.

Αρχικά, παρουσιάστηκαν τα είδη των μετασχηματιστών που διατίθενται στον Ελλαδικό χώρο, καθώς επίσης και τις αρχές λειτουργίας τους. Επίσης αναλύθηκαν οι κατασκευαστικές προδιαγραφές τους και παρουσιάστηκε μια εκτεταμένη αναφορά των εξαρτημάτων τους.

Έπειτα, γίνεται αναφορά στις απώλειες των μετασχηματιστών και στο κόστος των απωλειών. Παρόλο που η απόδοση των μετασχηματιστών ξεπερνά το 95%, οι απώλειες που παρουσιάζονται είναι σημαντικές, εάν αναλογιστεί το πλήθος των μετασχηματιστών που χρησιμοποιείται σε ένα αυτόνομο σύστημα. Επομένως το συνολικό κόστος απωλειών από τους μετασχηματιστές διανομής είναι συγκρίσιμο με την παραγωγή ενέργειας. Η απόδοση των μετασχηματιστών συνδέεται ανάλογα με την τιμή αγοράς τους. Η βέλτιστη αγορά πραγματοποιείται εφόσον αποκτηθεί ένας μετασχηματιστής υψηλής απόδοσης σε χαμηλή τιμή αγοράς. Η παραπάνω προσδοκία έρχεται αντίθετα στα συμφέροντα των κατασκευαστών, οι οποίοι επιδιώκουν την πώληση των αποδοτικών μετασχηματιστών σε υψηλότερες τιμές. Η προσδοκία των κατασκευαστών δεν θεωρείται αβάσιμη, καθώς για την κατασκευή των αποδοτικών μετασχηματιστών χρησιμοποιούνται ακριβά υλικά και δαπάνες για έρευνα που αφορούν την βελτίωση της λειτουργίας τους. Η απόδοση τους συνδέεται επίσης και με περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις. Η μείωση των απωλειών συμβάλει στην μείωση της παραγωγής, καθώς εξοικονομείται ηλεκτρική ενέργεια. Σε ατομικό επίπεδο, η εξοικονόμηση και η περιβαλλοντολογική προστασία φαντάζει μικρή, όμως τα οφέλη της σε εταιρία εθνικής εμβέλειας, αντανακλούν σε κοινωνικό επίπεδο.

Οι απώλειες των μετασχηματιστών μεταφράζονται σε χρηματικό κόστος. Επομένως, κρίνεται αναγκαίος ο υπολογισμός των απωλειών με ακρίβεια, ώστε να επιλεγεί ο ιδανικότερος μετασχηματιστής που μπορεί να καλύψει τις ανάγκες του δικτύου διανομής. Για την διαλογή των ιδανικότερων μετασχηματιστών, οφείλεται να εφαρμοστούν μέθοδοι που διευκολύνουν τον αγοραστή να λάβει την συμφέρουσα απόφαση. Στην ουσία, με την επιλογή του βέλτιστου μετασχηματιστή, περιορίζονται οι απώλειες και επομένως πραγματοποιείται εξοικονόμηση ενέργειας και χρήματος. Το πρόβλημα της επιλογής των μετασχηματιστών είναι εντονότερο στις περιπτώσεις όπου η αγοράστρια εταιρία ενδιαφέρεται για αγορά μεγάλων ποσοτήτων. Επομένως, οι απώλειες

έχουν κύριο ρόλο στην απόφαση αγοράς και χρειάζονται λεπτομερή εξέταση. Στο κόστος απωλειών οφείλει να λαμβάνεται υπόψη η διάρκεια ζωής των μετασχηματιστών, η οποία υπολογίζεται γύρω στα 30 χρόνια λειτουργίας. Ο πληθωρισμός, το κόστος βλάβης, το κόστος αντικατάστασης, το κόστος ανά μονάδας χαμένης ενέργειας και το κόστος συντήρησης πρέπει να συνυπολογίζονται στη διάρκεια του χρόνου, ώστε να είναι κάποιος ικανός να λάβει τη σωστή απόφαση για την επιλογή του κατάλληλου μετασχηματιστή.

Έχουν αναπτυχθεί τρεις βασικοί μέθοδοι που αφορούν την οικονομική αξιολόγηση των μετασχηματιστών: η μέθοδος ισοδύναμου κόστους επένδυσης, ισοκατανεμημένου ετησίου κόστους και παρούσας αξίας. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην μέθοδο ισοδύναμου κόστους επένδυσης, καθώς η εφαρμογή της είναι απλή και τα αποτελέσματα ευκολονόητα και αντιληπτά από τους χρήστες. Η αντικειμενική εξίσωση της μεθόδου περιλαμβάνει το κόστος των απωλειών καθ' όλη την διάρκεια ζωής των μετασχηματιστών, το κόστος αγοράς τους και την μελλοντική αξία του χρήματος. Επίσης, κρίνεται απαραίτητη η εκτίμηση της μελλοντικής ζήτησης ενέργειας, καθώς αποτελεί έναν από τους δύο απαραίτητους παράγοντες της απόφασης αγοράς των μετασχηματιστών. Ο δεύτερος παράγοντας αφορά τον ακριβή αριθμό μετασχηματιστών που απαιτούνται για την κάλυψη των αναγκών.

Έχοντας ως στόχο την σωστή εφαρμογή της μεθόδου ισοδύναμου κόστους στον Νομό Σάμου, αναπτύχθηκαν τρία σενάρια που αντικατοπτρίζουν πραγματικές συνθήκες αποφάσεων αγοράς. Το πρώτο σενάριο αναπαριστά την απόφαση αγοράς μετασχηματιστών σε ποσότητες που καλύπτουν οριακά τις ανάγκες του δικτύου. Το δεύτερο σενάριο αφορά την αγορά των απαραίτητων μετασχηματιστών, υπολογίζοντας ωστόσο την ελάχιστη ποσότητα που οφείλει να βρίσκεται στις αποθήκες. Το τρίτο σενάριο αφορά την μέγιστη επιτρεπτή ποσότητα αγοράς μετασχηματιστών, περιορισμένη από το κεφάλαιο αγοράς και την χωρητικότητα της αποθήκης.

Οι έρευνες σχετικά με την μεγιστοποίηση της απόδοσης των μετασχηματιστών συνεχίζονται, παρέχοντας καλύτερα υλικά κατασκευής και επομένως μετασχηματιστές υψηλότερης απόδοσης. Επιδιώκεται συνεχώς μείωση των απωλειών, χωρίς να αυξάνεται κατά πολύ το κόστος απόκτησης των μετασχηματιστών. Όλο και περισσότερες εταιρίες στρέφονται προς την αγορά αποδοτικών μετασχηματιστών, παρά το αυξημένο κόστος αγοράς. Η παραπάνω κίνηση πραγματοποιείται λόγω της εξοικονόμησης ενέργειας από τις μειωμένες απώλειες, καθώς το κόστος παραγωγής ενέργειας συνεχώς αυξάνεται. Επίσης, τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται οικολογική λογική από τις κυβερνήσεις των περισσότερων κρατών, γεγονός που τροφοδοτεί με τον τρόπο του την περεταίρω αγορά αποδοτικών μετασχηματιστών.