ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Τομέας Συστημάτων Παραγωγής

ΕΛΕΓΧΟΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
της

ΚΑΖΑΝΤΖΟΓΛΟΥ ΦΩΤΕΙΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ

ΓΕΩΡΓΙΛΑΚΗΣ ΠΑΥΛΟΣ, Επίκουρος Καθηγητής

ΧΑΝΙΑ

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2008

Στον Αλέκο που

μας άφησε νωρίς…

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη Διπλωματική μου Εργασία στα πλαίσια των σπουδών μου στο Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η εκπόνησή της ξεκίνησε το Μάρτιο του 2008 και ολοκληρώθηκε τον Οκτώβριο του 2008, υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή κ. Γεωργιλάκη Παύλου.

Με την ευκαιρία της παρουσίασης της εργασίας μου αυτής, θεωρώ χρέος μου να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλαν αποφασιστικά στην όλη μου προσπάθεια. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Γεωργιλάκη Παύλο, ο οποίος μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με το αντικείμενο των ανεμογεννητριών και με την καθοδήγηση και τις πολύτιμες συμβουλές που παρείχε, καλλιέργησε άρτιο κλίμα συνεργασίας σε όλη την πορεία της εργασίας, υπογράφοντας την επιτυχή της ολοκλήρωση. Επίσης ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στον κ. Ν. Μάργαρη, Καθηγητή του ΑΠΘ, ο οποίος παρόλο που δε με είχε μαθήτριά του, με βοήθησε πολύ.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου είναι το λιγότερο που θα μπορούσα να πω στους ανθρώπους εκείνους, η διαρκή υποστήριξη των οποίων στο διάστημα των πέντε χρόνων της φοίτησής μου στο Πολυτεχνείο επιβεβαίωσε για άλλη μία φορά ότι είναι πάντα δίπλα μου.

Τέλος, δε θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τους φίλους μου, για τα ανεπανάληπτα φοιτητικά χρόνια που συνέθεσαν οι αξέχαστες στιγμές που περάσαμε μαζί.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική παρουσιάζει συνοπτικά τις ανεμογεννήτριες και εστιάζει στον τρόπο κατασκευής και λειτουργίας των επαγωγικών γεννητριών καθώς και στις τεχνικές ελέγχου τους.

Περιγράφονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα και οι διαφορετικές κατηγορίες τους σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας. Γίνεται μια σύντομη αλλά περιεκτική ανάλυση της λειτουργίας της ασύγχρονης ηλεκτρικής μηχανής επαγωγής. Στη συνέχεια για να κατανοηθεί ο τρόπος ελέγχου αυτών, είναι απαραίτητη η παρουσίαση του δυναμικού μοντέλου της μηχανής, του οποίου οι εξισώσεις αναπτύσσονται σε ένα περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς.

Αναλύονται οι πιο διαδεδομένες τεχνικές ελέγχου των γεννητριών επαγωγής. Αυτές είναι ο βαθμωτός (μονόμετρος) έλεγχος, ο διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό πεδίου και ο άμεσος έλεγχος ροής και ροπής. Παρατίθενται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου και γίνεται σύγκριση αυτών ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής.

Στη συνέχεια δίνεται ιδιαίτερη σημασία στις τεχνικές του άμεσου και έμμεσου διανυσματικού ελέγχου. Προσομοιώνονται οι δύο αυτές τεχνικές με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab/Simulink και συγκρίνονται μεταξύ τους.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ανεμογεννήτριες, γεννήτριες επαγωγής, τεχνικές ελέγχου, άμεσος και έμμεσος ανυσματικός έλεγχος

SUMMARY

This Diploma Thesis presents the topic of wind turbines in a concise manner and further focuses on the method of construction and operation of the induction generators as well as on their control techniques.

The main characteristics of horizontal axis wind turbines and their different categories according to their mode of operation are being examined. A brief but comprehensive analysis of the operation of asynchronous induction machine is then presented. In order to understand further their control method, it is necessary to study the machine's dynamic model whose equations are developed in a rotational reporting system (frame).

We concentrate on the analysis of the most widespread control techniques of the induction machines. These techniques are the Scalar Control, the Vector Control with Field Orientation and the Direct Torque and Flux Control. The advantages and shortcomings of each method are being thoroughly described and are compared according to the demands of each application.

Particular emphasis is given on Direct and Indirect Vector Control which are simulated and compared using Matlab/Simulink software.

KEY WORDS

Renewable Energy Sources, wind turbines, induction generators, direct and indirect vector control techniques

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 Γενικά 1
1.2 Μορφές Ενέργειας 3
1.2.1 Μη Ανανεώσιμες Πηγές 3
1.2.2 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας 3
1.3 Αιολική Ενέργεια 4
1.4 Ιστορική Εξέλιξη 5
1.5 Υπάρχουσα Κατάσταση 5
1.5.1 Υπάρχουσα Κατάσταση Στην Ελλάδα 5
1.5.2 Υπάρχουσα Κατάσταση Στην Ευρώπη και Παγκόσμια 7
1.6 Μειονεκτήματα Αξιοποίησης της Αιολικής Ενέργειας 8
1.7 Πλεονεκτήματα Αξιοποίησης της Αιολικής Ενέργειας 9
1.8 Περιεχόμενα Εργασίας 10
1.9 Βιβλιογραφία 12

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

2.1 Εισαγωγή 13
2.2 Μετατροπή Ενέργειας από τον Άνεμο 13
2.2.1 Περιγραφή αιολικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 13
2.2.2 Βασικά δομικά στοιχεία γεννητριών 14
2.2.3 Αρχές λειτουργίας του συστήματος μετατροπής αιολικής ενέργειας 16
2.3 Κατηγορίες Αιολικών Συστημάτων 18
2.4 Αυτόνομα Αιολικά Συστήματα Φόρτισης Συσσωρευτών 19
2.5 Συστήματα Ανεμογεννητριών 20
2.6 Βιβλιογραφία 27

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή 29
3.2 Συστήματα Ηλεκτρικής Κίνησης 29
3.2.1 Πηγή Ισχύος 31
3.2.2 Μετατροπέας Ισχύος 31
3.2.2.1 Ελεγχόμενος μετατροπέας ισχύος 32
3.2.2.2 Αντιστροφέας 33
3.2.2.3 Ανορθωτής 34
3.2.3 Ηλεκτρική Μηχανή 36
3.2.3.1 Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος 36
3.2.3.2 Κινητήρες Εναλλασσομένου Ρεύματος 37
3.2.4 Φορτίο 39
3.2.5 Σύστημα Παρακολούθησης και Ελέγχου 39
3.3 Βιβλιογραφία 41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

4.1 Εισαγωγή 43
4.2 Γεννήτριες 43
4.3 Γεννήτριες Επαγωγής 44
4.4 Δομή Επαγωγικών Κινητήρων 44
4.5 Βασικές Αρχές Επαγωγικών Μηχανών 47
4.5.1 Αρχή Λειτουργίας 47
4.5.2 Ταχύτητα επαγωγικών κινητήρων 48
4.5.3 Η έννοια της ολίσθησης του δρομέα 49
4.6 Ισοδύναμο Κύκλωμα Επαγωγικής Μηχανής 49
4.7 Δυναμικό Μοντέλο Μηχανής Επαγωγής 51
4.8 Μοντέλο Μηχανής Επαγωγής σε χωρικά διανύσματα 56
4.8.1 Εισαγωγή 56
4.8.2 Θεωρία συστήματος αναφοράς 57
4.8.3 Δυναμικό μοντέλο μηχανών επαγωγής με χωρικά διανύσματα 60
4.8.3.1 Δυναμικό μοντέλο σε στατό πλαίσιο αναφοράς (εξισώσεις Stanley) 62
4.8.3.2 Δυναμικό μοντέλο σε σύγχρονα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (εξισώσεις Kron) 63
4.9 Απώλειες των Επαγωγικών Κινητήρων 65
4.10 Κατασκευή των Επαγωγικών Κινητήρων 67
4.11 Βιβλιογραφία 71

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

5.1 Εισαγωγή 73
5.2 Ρύθμιση Ταχύτητας Επαγωγικών Κινητήρων 74
5.2.1 Έλεγχος της ταχύτητας με τη ρύθμιση της αντίστασης του δρομέα. 74
5.2.2 Έλεγχος της ταχύτητας με τη ρύθμιση της τάσης του στάτη. 76
5.2.3 Έλεγχος της ταχύτητας με τη μεταβολή του αριθμού των πόλων 76
5.2.4 Έλεγχος της ταχύτητας με τη μεταβολή της συχνότητας 77
5.3 Τεχνικές Ελέγχου Κινητήρων Επαγωγής 77
5.3.1 Βαθμωτός Έλεγχος 78
5.3.1.1 Έλεγχος με σταθερό λόγο τάσης προς συχνότητα σε ανοικτό βρόχο 79
5.3.1.2 Έλεγχος με σταθερό λόγο τάσης προς συχνότητα σε κλειστό βρόχο 80
5.3.1.3 Έλεγχος ταχύτητας μέσω της ηλεκτρικής ροπής και της μαγνητικής ροής σε κλειστό βρόχο 83
5.3.2 Διανυσματικός Έλεγχος με Προσανατολισμό Πεδίου 85
5.3.2.1 Αρχές Διανυσματικού Ελέγχου με Προσανατολισμό Πεδίου 87
5.3.2.2 Άμεσος Διανυσματικός Έλεγχος με Προσανατολισμό με το Πεδίο του Δρομέα 88
5.3.2.3 Έμμεσος Διανυσματικός Έλεγχος με Προσανατολισμό με το Πεδίο του Δρομέα 90
5.3.3 Άμεσος Έλεγχος Ροπής και Ροής (DTFC ή DTC) 92
5.3.4 Σύγκριση των μελετώμενων τεχνικών ελέγχου 94
5.4 Βιβλιογραφία 96

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

6.1 Εισαγωγή 97
6.2 Προσομοίωση Τεχνικών Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών Επαγωγής 97
6.3 Προσομοίωση Διανυσματικού Ελέγχου με Προσανατολισμό Πεδίου 102
6.3.1 Έμμεσος διανυσματικός έλεγχος 102
6.3.2 Άμεσος διανυσματικός έλεγχος με μαγνητική ροή στο ρότορα (rotor flux) 107
6.3.3 Άμεσος διανυσματικός έλεγχος με μαγνητική ροή στο στάτορα (stator flux) 111
6.4 Γενικά συμπεράσματα των Μελετώμενων Μεθόδων 116
6.5 Βιβλιογραφία 118

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 119

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ : ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ MATLAB/SIMULINK

Π.1 Γενικά 121
Π.2 Μοντελοποίηση συστημάτων ισχύος 123
Π.3 Εργαλεία Δυναμικής Προσομοίωσης 123
Π.4 Κριτήρια Επιλογής του Matlab/ Simulink 123
Π.5 Εισαγωγή στο Matlab 124
Π.5.1 Ειδικά χαρακτηριστικά του MATLAB 125
Π.5.2 Καινοτομίες και βελτιώσεις του MATLAB 126
Π.5.3 Εφαρμογές 127
Π.6 Εισαγωγή στο Simulink 128
Π.6.1 Ειδικά χαρακτηριστικά του Simulink 128
Π.6.2 Επιλύτες και Παράμετροι του Simulink 138
Π.6.3 Εφαρμογές 139
Π.6.4 Παρατηρήσεις για την Προσομοίωση και τα Αποτελέσματα 142

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Σαν ενέργεια ορίζεται η ικανότητα ενός σώματος να παράγει έργο λόγω της κίνησης, της θέσης ή της κατάστασής του. Για να πραγματοποιήσει η ανθρωπότητα τις κάθε φύσης δραστηριότητές της, από την αρχή ακόμα της οργάνωσής της σε μικρές ομάδες, είχε ανάγκη από πηγές που θα μπορούσαν να καλύψουν τις λίγες αρχικά απαιτήσεις της σε ενέργεια. Οι μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις της βιομηχανικής μας εποχής, οδήγησαν τον άνθρωπο στην αλόγιστη και σπάταλη εκμετάλλευση των συμβατικών καυσίμων, αγνοώντας τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) και αν αυτή η νοοτροπία δεν ανατραπεί σύντομα, θα θέσει σε κίνδυνο τη μελλοντική επιβίωση του ανθρώπου. Η συνεχής αύξηση της κατά κεφαλήν κατανάλωσης ενέργειας, σε συνδυασμό με την έντονη ανομοιομορφία της ενεργειακής ζήτησης στις διάφορες περιοχές του πλανήτη, εγγυώνται τη διατήρηση υψηλών ρυθμών κατανάλωσης ενέργειας και κατά τα επόμενα χρόνια. Το 1973, η πρώτη πετρελαϊκή κρίση έρχεται να ταράξει τα νερά, καθώς το βασικό καύσιμο εκείνης της περιόδου αυξήθηκε διεθνώς στα 15$ το βαρέλι, από 2-3 $ που πωλούνταν για αρκετά χρόνια. Η ανησυχία όμως σχετικά με την επάρκεια των αποθεμάτων του και την πλήρη εξάρτηση των περισσότερων χωρών από τις πετρελαιοπαραγωγές χώρες γενικεύεται με την δεύτερη πετρελαϊκή κρίση το 1979.

Οι βιομηχανικά ανεπτυγμένες χώρες έστρεψαν τις προσπάθειές τους στον περιορισμό της εξάρτησης αυτής με δύο τρόπους: α) με τη λήψη μέτρων εξοικονόμησης και ορθολογικής χρήσης της ενέργειας και β) με την έρευνα για νέες πηγές που θα υποκαθιστούσαν το πετρέλαιο.

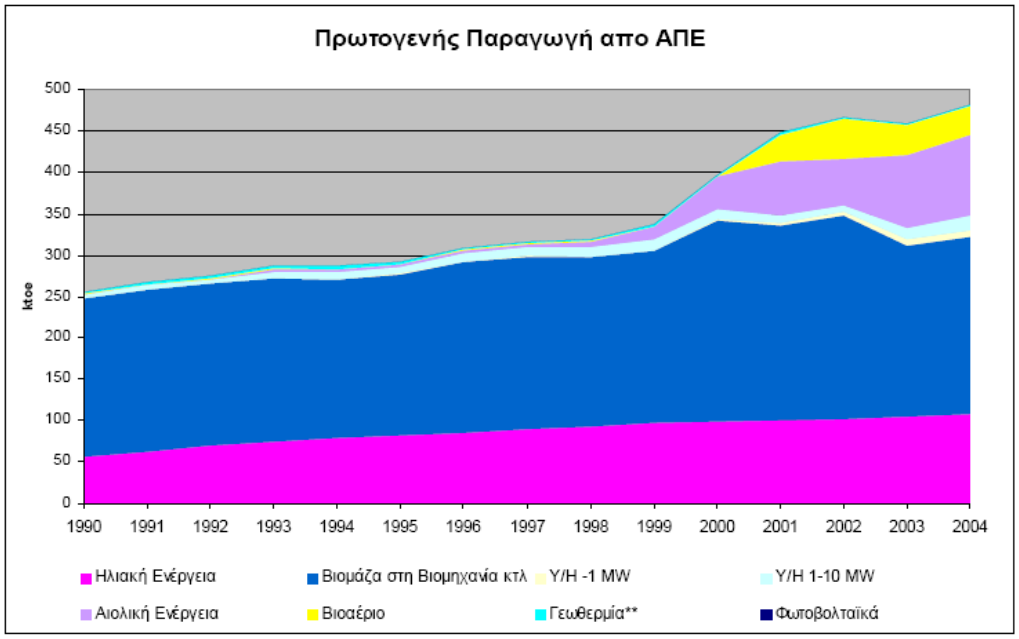
Τα ίδια αυτά μέτρα υπαγορεύονται και από ακόμη μία ανάγκη, που έγινε κατανοητή μόλις τα τελευταία χρόνια, την προστασία του περιβάλλοντος, του οποίου η μόλυνση έχει φθάσει σε ανησυχητικά επίπεδα, λόγω των έντονων δραστηριοτήτων του ανθρώπου. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου, που δημιουργείται από την συσσώρευση CO_2 στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, είναι ένα από τα βασικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα, στα οποία καλείται η ανθρωπότητα να βρει λύση.

Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνολογικά αναπόφευκτες απώλειες ενέργειας στα συστήματα παραγωγής και μεταφοράς, καθώς και τη μη ορθολογική χρήση της ενέργειας, όπως και την αδιαφορία και έλλειψη ενημέρωσης των πολιτών για την αναμενόμενη εξάντληση των βεβαιωμένων ενεργειακών αποθεμάτων, αρκετοί επιστήμονες πιστεύουν, ότι η άφιξη του «ενεργειακού χειμώνα» στον πλανήτη μας καθίσταται σχεδόν αναπόφευκτη. Δε θα πρέπει να ξεχάσουμε να αναφέρουμε τέλος τις τέσσερις πληγές του ανθρώπου: μείωση των ενεργειακών αποθεμάτων, ρύπανση του περιβάλλοντος, υπερπληθυσμός και εξάντληση των φυσικών πόρων.

Επίσης πρέπει να τονιστεί, ότι τα συμβατικά καύσιμα αποκαλούνται και μη ανανεώσιμα, διότι η χρονική περίοδος επαναδημιουργίας τους υπερβαίνει το ένα εκατομμύριο έτη, ενώ απαιτούνται ειδικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Με σταθερούς τους σημερινούς ρυθμούς αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας, τα συνολικά αποθέματα συμβατικών καυσίμων δεν επαρκούν για περισσότερο από τριακόσια χρόνια. Σε μια προσπάθεια να συνειδητοποιήσουμε το μέγεθος της κατασπατάλησης των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων του πλανήτη μας, αξίζει να σημειωθεί ότι η ανθρωπότητα έχει δαπανήσει τα τελευταία εκατό

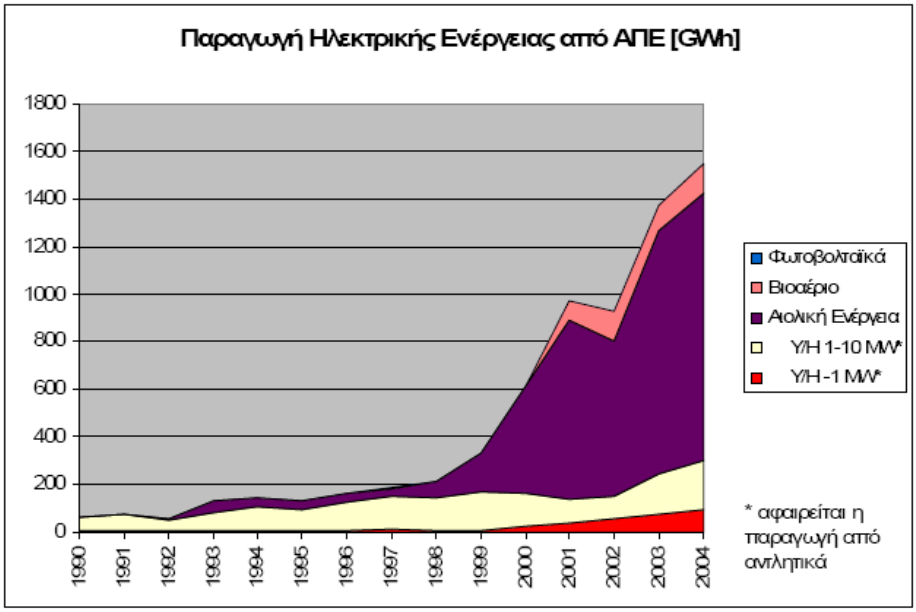
χρόνια, όλα τα αποθέματα πρώτων υλών και πηγών ενέργειας, τα οποία αποταμιεύθηκαν κατά τη διάρκεια συνολικά της ζωής του πλανήτη μας μέχρι σήμερα . [1.1]

Παράλληλα η χώρα μας δε θεωρείται ευνοημένη από πλευράς ύπαρξης αποθεμάτων καυσίμων, γεγονός που την υποχρεώνει σε σημαντική εξάρτηση από εισαγόμενα καύσιμα και σχετικά μικρό συντελεστή ενεργειακής αυτάρκειας. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται η εξέλιξη της παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας από ΑΠΕ από το έτος 1990 έως το 2004.



Σχήμα 1.1: Πρωτογενής παραγωγή από ΑΠΕ μη συμπεριλαμβανομένων των μεγάλων Υ/Η & της βιομάζας στον οικιακό τομέα (**ktoe: k**ilo **t**onnes of **o**il **e**quivalent) [1.2]

Η μόνη απάντηση στην εξάντληση των συμβατικών καυσίμων και στη διαρκή επιβάρυνση του περιβάλλοντος από τη λειτουργία συμβατικών σταθμών παραγωγής, είναι η στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι οποίες δεν εξαντλούνται και δε ρυπαίνουν το περιβάλλον.



Σχήμα 1.2: Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ [1.2]

Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζεται η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Φυσικά, οι ανανεώσιμες πηγές δεν είναι δυνατόν να επιλύσουν το συνολικό ενεργειακό πρόβλημα της ανθρωπότητας, τουλάχιστον με τα σημερινά οικονομικά και τεχνολογικά δεδομένα. Εάν όμως η αξιοποίησή τους συνδεθεί με την προσπάθεια εξοικονόμησης των συμβατικών πηγών ενέργειας και με την ορθολογική διαχείριση των υφιστάμενων ενεργειακών πόρων, είναι δυνατή η σταδιακή απομάκρυνση του εφιάλτη της ανθρωπότητας, δηλαδή του «επερχόμενου ενεργειακού χειμώνα».

1.2. ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι «αποθήκες» ενέργειας ονομάζονται «Πηγές Ενέργειας» και διακρίνονται σε αυτογενείς (πυρήνες ατόμων, ήλιος, γαιάνθρακες ή πετρέλαιο) και τεχνητές (ταμιευτήρες, ηλεκτρικοί συσσωρευτές). Επίσης διακρίνονται σε πρωτογενείς πηγές που περιλαμβάνουν τη δυναμική ενέργεια των πυρήνων και δευτερογενείς που είναι όλες οι άλλες μορφές / πηγές ενέργειας. Όσον αφορά όμως τα αποθέματα ενέργειας (ενεργειακό δυναμικό), οι πηγές ενέργειας διακρίνονται σε συμβατικές ή μη ανανεώσιμες και σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι αυτογενείς ή πρωταρχικές πηγές ενέργειας είναι αποθηκευμένες ή υπάρχουν στη φύση. Ο ήλιος είναι η πρωταρχική και η βασική πηγή ενέργειας της γης. Η ενέργειά του είναι αποθηκευμένη και σε άλλες πρωταρχικές πηγές, όπως στο κάρβουνο, στο πετρέλαιο, στο φυσικό αέριο, στη βιομάζα και προκαλεί τον υδρολογικό κύκλο και την ενέργεια του ανέμου. Άλλες πρωταρχικές πηγές ενέργειας που υπάρχουν στη γη, είναι η πυρηνική ενέργεια των ραδιενεργών στοιχείων, η θερμική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο εσωτερικό της γης και βέβαια η δυναμική ενέργεια.

1.2.1 Μη ανανεώσιμες πηγές

Αποκαλούνται έτσι γιατί δεν είναι δυνατό να ανανεώσουν σε εύλογο για τον άνθρωπο χρονικό διάστημα, την αποθηκευμένη τους ενέργεια. Η διαδικασία σχηματισμού τους διήρκεσε εκατομμύρια χρόνια. Οι μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνουν :

- Τα στερεά καύσιμα των γαιανθράκων, όπως λιγνίτη, ανθρακίτη, τύρφη
- Τα υγρά καύσιμα που παίρνουμε με κατεργασία, όπως μαζούτ, πετρέλαιο, βενζίνη, κηροζίνη κλπ.
- Τα αέρια καύσιμα όπως το φυσικό αέριο, υγραέριο κλπ.
- Την πυρηνική ενέργεια που παίρνουμε από τη σχάση ραδιενεργών υλικών

Οι μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι αυτές που χρησιμοποιούνται κυρίως τα τελευταία χρόνια και που έχουν οδηγήσει σε ενεργειακές κρίσεις, αλλά και στη δημιουργία σειράς προβλημάτων, με αποτέλεσμα την επιβάρυνση του περιβάλλοντος.

1.2.2. Ανανεώσιμες πηγές

Οι "***ήπιες μορφές ενέργειας***" ή "***ανανεώσιμες πηγές ενέργειας***" (ΑΠΕ), είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχεται από διάφορες φυσικές πηγές, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Ο όρος "ήπιες" αναφέρεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους.

- Για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση, καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, αλλά η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση.

- Πρόκειται για "καθαρές" μορφές ενέργειας, φιλικές στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, διοξείδιο του άνθρακα ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα.

Είδη ήπιων μορφών ενέργειας :

• ***Αιολική ενέργεια.*** Χρησιμοποιήθηκε παλιότερα για την άντληση νερού από πηγάδια καθώς και για μηχανικές εφαρμογές (π.χ. άλεση στους ανεμόμυλους). Έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται για ηλεκτροπαραγωγή.

• ***Ηλιακή ενέργεια.*** Χρησιμοποιείται περισσότερο για θερμικές εφαρμογές (ηλιακοί θερμοσίφωνες και φούρνοι) ενώ η χρήση της για την παραγωγή ηλεκτρισμού έχει αρχίσει να κερδίζει έδαφος, με την βοήθεια της πολιτικής προώθησης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας από το ελληνικό κράτος και την Ευρωπαϊκή Ένωση.

• ***Υδατοπτώσεις.*** Είναι τα γνωστά υδροηλεκτρικά έργα, που στο πεδίο των ήπιων μορφών ενέργειας εξειδικεύονται περισσότερο στα μικρά υδροηλεκτρικά. Είναι η πιο διαδεδομένη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας.

• ***Βιομάζα.*** Χρησιμοποιεί τους υδατάνθρακες των φυτών (κυρίως αποβλήτων της βιομηχανίας ξύλου, τροφίμων και ζωοτροφών και της βιομηχανίας ζάχαρης) με σκοπό την αξιοποίηση της ενέργειας που δεσμεύτηκε απ' το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Ακόμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αστικά απόβλητα και απορρίμματα. Μπορεί να δώσει βιοαιθανόλη και βιοαέριο, που είναι καύσιμα πιο φιλικά προς το περιβάλλον από τα παραδοσιακά. Είναι μια πηγή ενέργειας με πολλές δυνατότητες και εφαρμογές που θα χρησιμοποιηθεί στο μέλλον.

• ***Γεωθερμική ενέργεια***. Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται απ' τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια, π.χ. στους θερμοπίδακες ή στις πηγές ζεστού νερού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας για θερμικές εφαρμογές είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η Ισλανδία καλύπτει το 80-90% των ενεργειακών της αναγκών με γεωθερμική ενέργεια.

• ***Ενέργεια από παλίρροιες.*** Εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του Ήλιου και της Σελήνης, που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού. Το νερό αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει και για να ξανακατέβει αναγκάζεται να περάσει μέσα από μια τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρισμό. Έχει εφαρμοστεί στην Αγγλία, τη Γαλλία, τη Ρωσία και αλλού.

• ***Ενέργεια από κύματα.*** Εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας.

• ***Ενέργεια από τους ωκεανούς***. Εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων. Βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας.

1.3 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια του ανέμου, που προέρχεται από τη μετακίνηση αερίων μαζών της ατμόσφαιρας. Οι μετακινήσεις του αέρα, οι άνεμοι, προέρχονται από τις μεταβολές και τις διαφορετικές από τόπο σε τόπο τιμές της ατμοσφαιρικής πίεσης. Οι διαφορετικές αυτές τιμές της πίεσης, οφείλονται στη διαφορετική θέρμανση (απορρόφηση ενέργειας) της ατμόσφαιρας κάθε τόπου από τον Ήλιο.

Η αιολική ενέργεια, μια από τις παλαιότερες μορφές φυσικής ενέργειας, αξιοποιήθηκε από πολύ νωρίς για την παραγωγή μηχανικού έργου και είχε αποφασιστική συμβολή στην εξέλιξη της ανθρωπότητας. Η σημασία της ενέργειας του ανέμου φαίνεται από την Ελληνική μυθολογία.

Ο άνθρωπος πρωτοχρησιμοποίησε την αιολική ενέργεια στα ιστιοφόρα πλοία, γεγονός που συνέβαλε αποφασιστικά στην ανάπτυξη της ναυτιλίας. Μια άλλη εφαρμογή της αιολικής ενέργειας είναι οι ανεμόμυλοι. Μαζί με τους νερόμυλους συγκαταλέγονται στους αρχικούς κινητήρες που αντικατέστησαν τους μυς των ζώων ως πηγές ενέργειας. Διαδόθηκαν στην Ευρώπη επί 650 χρόνια, από τον 12^{ο} μέχρι τις αρχές του 19^{ου} αιώνα, οπότε άρχισε σταδιακά να περιορίζεται η χρήση τους, λόγω κυρίως της ατμομηχανής. Η οριστική τους εκτόπιση άρχισε μετά τον Α΄ Παγκόσμιο πόλεμο, παράλληλα με την ανάπτυξη του κινητήρα εσωτερικής καύσεως και την διάδοση του ηλεκτρισμού.

Κατά τη δεκαετία του 1970 , το ενδιαφέρον για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας με ανεμογεννήτριες και ανεμόμυλους ανανεώθηκε, λόγω της ενεργειακής κρίσης και των προβλημάτων που δημιουργεί η ρύπανση του περιβάλλοντος.

1.4 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

Η αξιοποίηση του ανέμου ξεκίνησε από τους προ Χριστού αιώνες και ήταν ο ρυθμιστής για την ανάπτυξη και την εξέλιξη της ανθρωπότητας με τη χρήση της τόσο, στη ναυτιλία και την άρδευση, όσο και στις αγροτικές καλλιέργειες. Η οικονομική και παραγωγική δραστηριότητα των αρχαίων χρόνων τονίζεται με την αναφορά στον διαχειριστή των ανέμων, τον Αίολο, στην ελληνική μυθολογία.

Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τον άνθρωπο για την κίνηση των ιστιοφόρων πλοίων, για τις συγκοινωνίες και τις εξερευνήσεις. Επίσης ιστορικές και αρχαιολογικές αναφορές υποστηρίζουν, πώς και άλλοι λαοί πλην των Ελλήνων, χρησιμοποίησαν αιολικές μηχανές (ανεμόμυλους). Οι λαοί αυτοί ήταν οι Πέρσες, Κινέζοι, Βαβυλώνιοι και Αιγύπτιοι. Κύρια υλικά κατασκευής είχαν το ξύλο, τα πανιά και ειδικές λιθόκτιστες κατασκευές. Οι ανεμόμυλοι τόσο των Βαβυλώνιων, όσο και των Περσών ήταν οριζοντίου άξονα, ενώ τον 3^{ο} π.Χ. αιώνα ο Ήρων ο Αλεξανδρεύς, σχεδίασε τον πρώτο ανεμόμυλο οριζοντίου άξονα με τέσσερα πτερύγια.

Κατά τη Βυζαντινή εποχή έχουμε τη χρήση των ανεμόμυλων για την άλεση των δημητριακών και την άρδευση στις χώρες της Ανατολής, στη Μικρά Ασία και στα νησιά του Αιγαίου Πελάγους.

Στην Ευρώπη οι πρώτοι ανεμόμυλοι εμφανίσθηκαν τον 13ο μ.Χ. αιώνα. Κατά την εποχή του Μεσαίωνα, έχουμε την εμφάνιση των ανεμόμυλων στην Ολλανδία, την Ισπανία, την Πορτογαλία, τη Γαλλία και την Ιταλία. Ο τύπος του ανεμόμυλου που χρησιμοποιήθηκε στην Ευρώπη την εποχή του Μεσαίωνα, ήταν αυτός του οριζοντίου άξονα με περιστρεφόμενο κλωβό και περιστρεφόμενη οροφή. Οι ανεμόμυλοι εκείνης της εποχής, χρησιμοποιούνταν για το άλεσμα των σιτηρών, το κόψιμο του καπνού, του ξύλου και άλλων γεωργικών προϊόντων, καθώς και για άντληση νερού. Την εποχή της Αναγέννησης, είχαμε την εξάπλωση του λεγόμενου «Αμερικάνικου ανεμόμυλου», ο οποίος χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα και είναι ένας αργός πολύπτερος ανεμόμυλος.

Στις αρχές του προηγούμενου αιώνα, πρώτοι οι Δανοί παράγουν ηλεκτρισμό από τον άνεμο, ενώ στην Αμερική χρησιμοποιούνται ανεμόμυλοι μεταλλικής κατασκευής. Στα χρόνια που ακολούθησαν το δεύτερο Παγκόσμιο πόλεμο, η χρήση της ατομικής ενέργειας και οι χαμηλές τιμές του πετρελαίου, περιόρισαν το ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Όμως η ρύπανση του περιβάλλοντος και οι διαδοχικές ενεργειακές κρίσεις, υποχρέωσαν ξανά τις τεχνολογικά ανεπτυγμένες χώρες, να ενδιαφερθούν γι΄αυτή την αρχαία πηγή ενέργειας του πλανήτη μας.

Στη χώρα μας η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας στη ναυσιπλοΐα ήταν καθιερωμένη από αρχαιοτάτων χρόνων, ενώ ιστορικές μαρτυρίες αναφέρουν, ότι και οι ανεμόμυλοι ήταν ήδη γνωστοί στα νησιά του Αρχιπελάγους και στην Κρήτη από τον 19^{ο} π.Χ. αιώνα.

1.5 ΥΠΑΡΧΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

1.5.1 Υπάρχουσα κατάσταση στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα αναπτύχθηκε ο «Μεσογειακός ανεμόμυλος», ο οποίος ήταν προσαρμοσμένος στις κλιματολογικές συνθήκες και ο τρόπος κατασκευής του είναι διαφορετικός από τους αντίστοιχους των βόρειο-ευρωπαϊκών χωρών. Οι ανεμόμυλοι αυτοί είναι οριζοντίου άξονα, πέτρινοι με πάνινα πτερύγια. Χρησιμοποιήθηκαν κυρίως στην Ανατολική Κρήτη για την άντληση ποτιστικού νερού από τα πηγάδια και ήταν κατασκευασμένοι από σίδερο και υφασμάτινα πανιά. Σε κάποιες περιοχές χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα ανεμόμυλοι για την άντληση νερού, όπως για παράδειγμα στη Ρόδο, όπου υπάρχουν διακόσιοι δέκα εννιά ανεμόμυλοι. Ακόμα γνωστοί είναι οι ανεμόμυλοι της Μυκόνου, όπου η ύπαρξη τους είναι εξακριβωμένη από τον 15° αιώνα.

Στη χώρα μας σήμερα γίνεται μια φιλότιμη προσπάθεια αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας με τη χρήση μεγάλων κυρίως αιολικών μηχανών οριζοντίου άξονα και με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τοποθεσίες των παλιών ανεμόμυλων, αποτελούν μια αξιόπιστη ένδειξη περιοχών με αξιόλογο αιολικό δυναμικό, δοκιμασμένων μάλιστα από το πέρασμα αρκετών αιώνων.

Στον Πίνακα 1.1 φαίνεται η εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος ανεμογεννητριών στον ελληνικό χώρο.

Πίνακας 1.1: Η εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος ανεμογεννητριών στον ελληνικό χώρο [1.2]

Εγκατεστημένη ισχύς		
Τέλος έτους	MW	Ετήσια αύξηση %
1983	**0,10**	
1984	**0,10**	**0,0%**
1985	**0,10**	**0,0%**
1986	**0,20**	**100,0%**
1987	**0,40**	**100,0%**
1988	**0,40**	**0,0%**
1989	**0,40**	**0,0%**
1990	**0,70**	**75,0%**
1991	**3,00**	**328,6%**
1992	**16,00**	**433,3%**
1993	**26,00**	**62,5%**
1994	**26,00**	**0,0%**
1995	**28,00**	**7,7%**
1996	**28,00**	**0,0%**
1997	**28,00**	**0,0%**
1998	**40,00**	**42,9%**
1999	**109,00**	**172,5%**
2000	**226,00**	**107,3%**
2001	**272,00**	**20,4%**
2002	**297,00**	**9,2%**
2003	**374,00**	**25,9%**
2004	**473,00**	**26,5%**
2005	**573,00**	**21,1%**
2006	**746,56**	**30,3%**
2007	**870,90**	**16,7%**

1.5.2 Υπάρχουσα Κατάσταση στην Ευρώπη και Παγκόσμια

Από πολλές απόψεις, η αιολική ενέργεια θεωρείται ως η μεγαλύτερη επιτυχία στην εξέλιξη των ανανεώσιμων πηγών. Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικών πάρκων δωδεκαπλασιάσθηκε μέσα στα εννέα έτη, από 7.600 MW το 1998 σε 94.112 MW το 2007, με μία αύξηση των 86.512 MW, καθιστώντας την αιολική ενέργεια, ως την ταχύτερα αναπτυσσόμενη μορφή παραγωγής ενέργειας παγκοσμίως.

Πάνω από τα ¾ της συνολικής παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος αιολικών πάρκων, λειτουργεί στη περιοχή της Ευρώπης και είναι και η περιοχή, στην οποία οφείλεται η ραγδαία ανάπτυξη των τελευταίων ετών, ένα επίτευγμα το οποίο απορρέει από τη σταθερή δέσμευση για ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1.2, σχεδόν όλες οι χώρες τις Ευρωπαϊκής ένωσης, διαθέτουν αιολικά πάρκα και παράγουν με αυτόν τον τρόπο ηλεκτρική ενέργεια. Η Δανία είναι η πρωτοπόρος χώρα από άποψη τεχνολογίας. Η Γερμανία και η Ισπανία όμως (λόγω μεγαλύτερης έκτασης) διαθέτουν την μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ.

Πίνακας 1.2 : Ισχύς (MW) που παράγεται στην Ευρώπη από αιολική ενέργεια στα τέλη του 2007 [1.2]

Εγκατεστημένη Ισχύς σε MW		
Χώρες	**2006**	**2007**
Αυστρία	965	982
Βέλγιο	194	287
Βουλγαρία	36	70
Γαλλία	1567	2454
Γερμανία	20622	22247
Δανία	3136	3125
Ελβετία	12	12
Ελλάδα	746	871
Εσθονία	32	59
Ηνωμένο Βασίλειο	1962	2389
Ιρλανδία	746	805
Ισπανία	11623	15145
Ιταλία	2123	2726
Κροατία	17	17
Λετονία	27	27
Λιθουανία	48	50
Λουξεμβούργο	35	35
Νορβηγία	325	333
Ολλανδία	1558	1746
Ουγγαρία	61	65
Ουκρανία	86	89
Πολωνία	153	276
Πορτογαλία	1716	2150
Ρουμανία	3	8
Σλοβακία	5	5
Σουηδία	571	788
Τουρκία	50	146
Τσέχικη Δημοκρατία	54	116
Φερόε Νήσοι	4	4
Φινλανδία	86	110
Σύνολο	**48563**	**57137**

Στον Πίνακα 1.3 δίνεται η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς, αλλά και η εγκατεστημένη ισχύς στην Ε.Ε. Είναι φανερό ότι η Ε.Ε. κατέχει παραπάνω από το 70% της συνολικής εγκατεστημένης παγκόσμιας ισχύος. Το υπόλοιπο 30% βασικά ανήκει στις Η.Π.Α. αλλά και σε άλλες περιοχές του κόσμου όπως Κίνα και Ιαπωνία.

Πίνακας 1.3 : Η συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς [1.2]

Παγκόσμια εγκατεστημένη Ισχύς 2007		
Χώρες	**MW**	**%**
Γερμανία	22.247	23,6
ΗΠΑ	16.818	17,9
Ισπανία	15.145	16,1
Ινδία	8.000	8,5
Κίνα	6.050	6,4
Δανία	3.125	3,3
Ιταλία	2.726	2,9
Γαλλία	2.454	2,6
Ηνωμένο Βασίλειο	2.389	2,5
Πορτογαλία	2.150	2,3
Υπόλοιπος κόσμος	13.008	13,8
Σύνολο των 10 χωρών	**81.104**	**86,2**
Σύνολο	**94.112**	**100**

1.6 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν από τον άνθρωπο σε αρκετές περιπτώσεις. Αντικαταστάθηκε όμως από άλλες πηγές ενέργειας, σχεδόν στο σύνολο του 20^{ου} αιώνα, λόγω των σημαντικών μειονεκτημάτων που παρουσίαζε σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μορφές ενέργειας. Οι μηχανές που χρησιμοποιούνται σήμερα, δεν έχουν καμία σχέση τόσο από αεροδυναμικής άποψης, όσο και από κατασκευαστικής αντοχής και ποιότητας, με τους θρυλικούς ανεμόμυλους. Εμφανίζουν δε αξιοσημείωτη συγκέντρωση ισχύος. Παρόλα αυτά, είναι χρήσιμο να εξετάσουμε τα κυριότερα μειονεκτήματα που αποδίδονται στην αιολική ενέργεια, ώστε να αποκτήσουμε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα.

- Οι ανεμογεννήτριες χαρακτηρίζονται από περιορισμένη συγκέντρωση ισχύος (Watt/m^2). Τυπικές τιμές αιολικής ισχύος κυμαίνονται μεταξύ 200 - 400 W/m^2. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη χρήση είτε μεγάλου αριθμού ανεμογεννητριών είτε τη χρήση μηχανών μεγάλων διαστάσεων για την παραγωγή της επιθυμητής ποσότητας ενέργειας. Σήμερα καταβάλλονται προσπάθειες αύξησης συγκέντρωσης ισχύος των αιολικών μηχανών, οι οποίες σε επιλεγμένες περιπτώσεις πλησιάζουν ή και υπερβαίνουν τα 500 W/m^2.

- Η αδυναμία ακριβούς πρόβλεψης της ταχύτητας και της διεύθυνσης των ανέμων δε μας δίνει τη δυνατότητα να έχουμε πλήρη κάλυψη του φορτίου κάθε χρονική στιγμή. Το γεγονός αυτό μας υποχρεώνει να χρησιμοποιούμε τις αιολικές μηχανές, κυρίως, σαν εφεδρικές πηγές ενέργειας, σε συνδυασμό πάντοτε με κάποια άλλη πηγή ενέργειας (σύνδεση με ηλεκτρικό δίκτυο, παράλληλη λειτουργία με μονάδες Diesel).

- Σε περιπτώσεις διασύνδεσης της αιολικής εγκατάστασης με το ηλεκτρικό δίκτυο, η παραγόμενη ενέργεια δεν πληροί πάντα τις τεχνικές απαιτήσεις του δικτύου, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η τοποθέτηση αυτοματισμών ελέγχου, συσκευών ρύθμισης τάσεως και συχνότητας, καθώς και ελέγχου της άεργου ισχύος. Η εξέλιξη της τεχνολογίας σήμερα, έχει δώσει λύσεις στα περισσότερα από τα αναφερθέντα, προβλήματα, ιδιαίτερα με την κατασκευή ανεμογεννητριών μεταβλητού βήματος και μεταβλητών στροφών. Παρόλα αυτά, υπάρχει κάποιο αυξημένο κόστος για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών της παραγόμενης ενέργειας, το οποίο προστίθεται στο συνολικό κόστος της παραγόμενης ενέργειας (KWh). Τέλος, ακόμα και σήμερα, εξακολουθούν να μας απασχολούν οι διαδικασίες ζεύξης–απόζευξης αιολικών μηχανών στο ηλεκτρικό δίκτυο, λόγω των μεταβατικών φαινόμενων, που αυτές προκαλούν. Λόγω των τελευταίων προβλημάτων, απαγορεύεται η διασύνδεση, πέραν ενός ορίου παραγόμενης ισχύος αιολικών μηχανών σε μικρά τοπικά ηλεκτρικά δίκτυα, τα οποία όμως αποτελούν και την πλειονότητα των δικτύων του ελληνικού αρχιπελάγους.

- Αντίστοιχα, σε περιπτώσεις αυτόνομων μονάδων, είναι απαραίτητη η ύπαρξη συστημάτων αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας, σε μια προσπάθεια να έχουμε συγχρονισμό της ζήτησης και της διαθέσιμης ενέργειας. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται αυξημένο αρχικό κόστος (λόγω της προσθήκης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας) και επιπλέον απώλειες ενέργειας κατά τις φάσεις μετατροπής και αποθήκευσης, καθώς και αυξημένες υποχρεώσεις συντήρησης και εξασφάλισης της ομαλής λειτουργίας.

- Ένα ακόμα μειονέκτημα της αιολικής ενέργειας είναι η περιορισμένη δυνατότητα αξιοποίησης του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού. Στην πραγματικότητα αξιοποιούμε μερικώς μόνο την κινητική ενέργεια, η οποία αντιστοιχεί σε ένα περιορισμένο φάσμα της ταχύτητας του ανέμου.

- Τέλος, θα πρέπει να επισημάνουμε το σχετικά υψηλό κόστος της αρχικής επένδυσης για την εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας, ειδικά μάλιστα για μεμονωμένες περιπτώσεις αιολικών μηχανών μικρού μεγέθους. Στο σημείο αυτό, πρέπει να προσθέσουμε, ότι η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας και ο ανταγωνισμός μεταξύ των κατασκευαστών έχει συμπιέσει τα τελευταία χρόνια σημαντικά τις τιμές των μηχανών. [1.3]

1.7 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Αν και δεν είναι δυνατό να αγνοηθούν τα μειονεκτήματα που συνοδεύουν την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, είναι σημαντικό, να ληφθούν υπόψη και οι παρακάτω παράγοντες, ορισμένοι από τους οποίους ισχύουν ιδιαίτερα στη χώρα μας, ώστε να διαμορφωθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα για τις δυνατότητες και τους περιορισμούς αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα:

- Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Το γεγονός αυτό σημαίνει, ότι η αιολική ενέργεια δεν εξαντλείται, σε αντίθεση με το σύνολο των συμβατικών καυσίμων, των οποίων τα βεβαιωμένα αποθέματα του πλανήτη μας αναμένεται να εξαντληθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα.

- Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια καθαρή μορφή ενέργειας, ήπια προς το περιβάλλον. Η χρήση της δεν επιβαρύνει τα οικοσυστήματα των περιοχών εγκατάστασης και παράλληλα αντικαθιστά ιδιαίτερα ρυπογόνες πηγές ενέργειας, όπως το κάρβουνο και το πετρέλαιο.

- Μια δυνατότητα τόνωσης της Ελληνικής κατασκευαστικής δραστηριότητας με προϊόντα υψηλής Εγχώριας Προστιθέμενης Αξίας (Ε.Π.Α.) και συγκριτικά χαμηλού επενδυτικού κόστους, θα μπορούσε να αποτελέσει η απόφαση συμπαραγωγής ανεμογεννητριών στη

χώρα μας, συνεισφέροντας ταυτόχρονα και στη μείωση της ανεργίας. Χαρακτηριστικά είναι τα στοιχεία από την EWEA (Ευρωπαϊκό Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας) για τις θέσεις εργασίας που δημιουργούνται από τη λειτουργία αιολικών πάρκων και γενικά από τη χρήση της αιολικής ενέργειας.

- Η αξιόλογη εγχώρια ηλεκτρο-μηχανολογική εμπειρία, καθώς και το σημαντικό επιστημονικό-ερευνητικό ενδιαφέρον και δραστηριότητα στη γνωστική περιοχή της αιολικής ενέργειας.

- Η δυνατότητα αποκεντρωμένης ανάπτυξης, μέσα από αυτόνομα συστήματα παραγωγής ενέργειας, γεγονός που μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την οικονομική δραστηριότητα των τοπικών κοινωνιών.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, είναι πολύ σημαντικά, παρά την ύπαρξη αρκετών μειονεκτημάτων. Με την απόφαση να αξιοποιηθεί στη χώρα μας το υπάρχον αιολικό δυναμικό και να αναπτυχθούν κατασκευαστικές μονάδες παραγωγής ανεμογεννητριών, θα οδηγηθούμε σε οικονομικά βιώσιμες αλλά και ελκυστικές επενδύσεις. Επίσης θα είναι σημαντικά τα οφέλη, που θα αφορούν την προστασία του περιβάλλοντος και την ενεργειακή απεξάρτηση της χώρας μας.

1.8 ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της εργασίας είναι η παρουσίαση των ανεμογεννητριών και ειδικότερα των γεννητριών επαγωγής, καθώς και του τρόπου ελέγχου αυτών.

Περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα που έχουν επικρατήσει σε μεγάλο ποσοστό, σε σχέση με αυτές του κατακόρυφου άξονα, καθώς παρουσιάζουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και μικρότερη διακύμανση στην παραγόμενη ισχύ.

Οι γεννήτριες επαγωγής ή ασύγχρονες γεννήτριες εναλλασσομένου ρεύματος παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως υψηλή αξιοπιστία και απόδοση, μεγάλη διάρκεια ζωής χωρίς ιδιαίτερες ανάγκες συντήρησης και μικρό βάρος και όγκο. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με τους μοντέρνους αντιστροφείς και τις προηγμένες τεχνικές ελέγχου τους, καθιστούν τις γεννήτριες επαγωγής την ιδανική επιλογή για τα περισσότερα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης. Ήδη υπάρχει η τάση αντικατάστασης των μηχανών συνεχούς ρεύματος σε βιομηχανικό επίπεδο από τις πιο οικονομικές και αξιόπιστες μηχανές επαγωγής, ενώ το ενδιαφέρον και για νέες εφαρμογές είναι αυξημένο.

Αναλύονται οι πιο διαδεδομένες τεχνικές ελέγχου των γεννητριών επαγωγής. Αυτές είναι ο βαθμωτός (μονόμετρος) έλεγχος, ο διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό πεδίου και ο άμεσος έλεγχος ροής και ροπής. Ο βαθμωτός έλεγχος, όπως φανερώνει και η ονομασία του, συνίσταται στον έλεγχο μόνο του μέτρου (πλάτους) των ελεγχόμενων μεταβλητών. Ο διανυσματικός έλεγχος έχει ως κεντρική ιδέα τον έλεγχο του διανύσματος των ελεγχόμενων μεταβλητών (πέρα από το μέτρο τους ελέγχει και τη γωνία τους -φάση-, ώστε να προσδιορίσει επακριβώς το διάνυσμά τους). Ο άμεσος έλεγχος ροπής και ροής αποτελεί μια ιδιαίτερα προηγμένη τεχνική βαθμωτού ελέγχου.

Στη συνέχεια δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στις τεχνικές του άμεσου και έμμεσου διανυσματικού ελέγχου. Χρησιμοποιούνται μοντέλα προσομοίωσης για την καλύτερη κατανόηση αυτών των μεθόδων και γίνεται μια συνολική σύγκριση των τεχνικών ελέγχου.

Τα κεφάλαια της εργασίας έχουν την ακόλουθη δομή:

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται μια γενική παρουσίαση των αιολικών συστημάτων. Περιγράφονται τα βασικά υποσυγκροτήματα που απαρτίζουν ένα αιολικό σύστημα και γίνεται σύντομη αναφορά στις αρχές λειτουργίας του συστήματος μετατροπής αιολικής

ενέργειας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διάφορες κατηγορίες αιολικών συστημάτων (αυτόνομα, υβριδικά και διασυνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο) και τέλος οι διάφορες κατηγορίες ανεμογεννητριών σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας και ελέγχου τους.

Στο **Κεφάλαιο 3** γίνεται μια συνοπτική αλλά περιεκτική περιγραφή των πιο συχνά απαντούμενων στην πράξη Συστημάτων Ηλεκτρικής Κίνησης. Οι κύριες βαθμίδες που απαρτίζουν ένα τέτοιο σύστημα είναι: η πηγή ισχύος, ο μετατροπέας ισχύος, η ηλεκτρική μηχανή, το φορτίο και το σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου. Ο σχεδιασμός ενός ολοκληρωμένου συστήματος ηλεκτρικής κίνησης ξεκινάει με την εξέταση του τύπου του φορτίου. Ακολούθως επιλέγεται ο κατάλληλος κινητήρας με αντίστοιχη ισχύ και ροπή, ανάλογα με το είδος της εφαρμογής. Με βάση το είδος του κινητήρα και την ισχύ του, επιλέγεται ο μετατροπέας και το κατάλληλο σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου για τον μετατροπέα αυτό.

Στο **Κεφάλαιο 4** η μελέτη επικεντρώνεται στις ασύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές επαγωγής. Στο κεφάλαιο αυτό ο αναγνώστης μπορεί να βρει μια σύντομη αλλά περιεκτική ανάλυση της λειτουργίας της ασύγχρονης ηλεκτρικής μηχανής επαγωγής, ένα μοντέλο που προσομοιώνει τη λειτουργία της στη μόνιμη κατάσταση, τη μαθηματική θεμελίωση του γενικού αλγεβρικού μετασχηματισμού σε πλαίσιο που στρέφεται με αυθαίρετη ταχύτητα και με τη χρήση αυτού την παρουσίαση μοντέλων της μηχανής που προσομοιώνουν τη δυναμική της συμπεριφορά.

Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζονται θεωρητικά οι σημαντικότερες τεχνικές ελέγχου που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης με ασύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές επαγωγής, όπου απαιτείται μεταβλητή ταχύτητα λειτουργίας. Οι τεχνικές που αναλύονται και συγκρίνονται, είναι ο βαθμωτός (μονόμετρος) έλεγχος, ο διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό πεδίου και ο άμεσος έλεγχος ροής και ροπής. Η αντιπαραβολή των τριών τεχνικών ελέγχου γίνεται σε θεωρητικό επίπεδο.

Το **Κεφάλαιο 6** επικεντρώνεται μόνο στις τεχνικές του άμεσου και έμμεσου διανυσματικού ελέγχου με και χωρίς ανάδραση ροπής. Προσομοιώνεται η εφαρμογή τους σε ένα σύστημα ηλεκτρικής κίνησης μέσω του λογισμικού MATLAB/SIMULINK με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και αντιπαραβάλλονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

Στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

1.9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1.1] Κολοκυθάς Αναστάσιος, Φρέρης Νικόλαος, "Τεχνο-οικονομική μελέτη αιολικού πάρκου", Πτυχιακή Εργασία ΑΤΕΙ Πάτρας, Μάϊος 2003.

[1.2] European Wind Energy Association (www.ewea.org).

[1.3] Σχοινάς Νικόλαος, "Ανάλυση και έλεγχος μετατροπέων αιολικής ενέργειας", Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πάτρας, 2007.

[1.4] Γ. Μπεργελές, "Ανεμοκινητήρες", εκδόσεις Συμεών, 2000.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ
2

ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

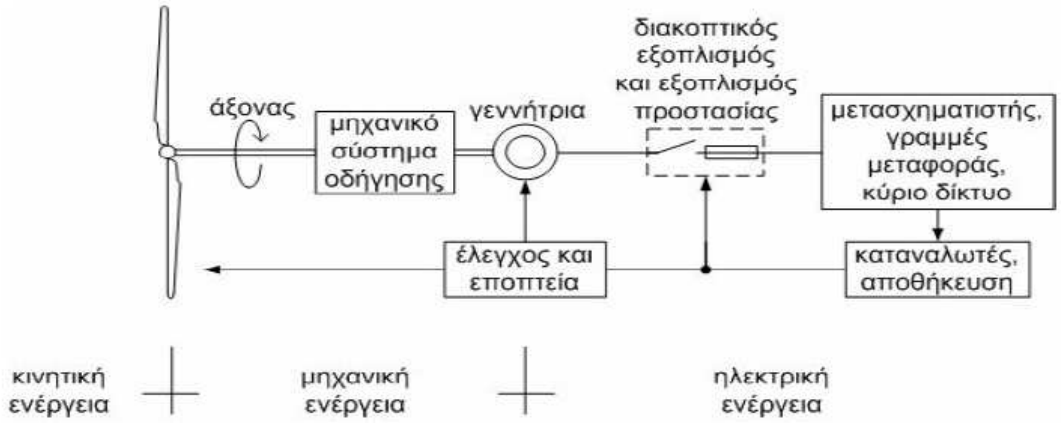
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σήμερα στη γενική τους μορφή οι ανεμοκινητήρες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου, σε άλλες πιο χρήσιμες μορφές ενέργειας. Ο άνεμος όμως είναι μια ανεξέλεγκτη και χρονικά μεταβαλλόμενη πηγή ενέργειας. Η δέσμευση και χρησιμοποίηση της ενέργειας αυτής, είναι ως εκ τούτου μια πολύ δαπανηρή διαδικασία. Η σχεδίαση και η κατασκευή μιας αποδοτικής και παράλληλα οικονομικής ανεμομηχανής δεν είναι εύκολη. Παρόλα αυτά, οι σύγχρονες ανεμομηχανές (που η επιστημονική ονομασία τους είναι "συστήματα μετατροπής της αιολικής ενέργειας" ή πιο απλά "ανεμοκινητήρες" ή όταν παράγουν ηλεκτρική ενέργεια "ανεμογεννήτριες", χρησιμοποιώντας τα πρόσφατα επιτεύγματα στην τεχνολογία των υλικών, στη μηχανολογία, στην ηλεκτρονική και στην αεροδυναμική, έχουν ανεβάσει σε υψηλά επίπεδα την απόδοσή τους, μειώνοντας συνεχώς το κόστος της παραγόμενης ενέργειας. Η μελέτη ενός συστήματος ανεμογεννήτριας (Α/Γ), περιλαμβάνει την αεροδυναμική σχεδίαση και τη μελέτη εφαρμογής, στην οποία περιλαμβάνονται η μηχανολογική μελέτη και σχεδίαση, η μελέτη του ηλεκτρολογικού συστήματος και τα ηλεκτρολογικά συστήματα ελέγχου και ασφαλείας. Η αεροδυναμική σχεδίαση, αποτελεί προϋπόθεση για το σχεδιασμό ενός συστήματος δέσμευσης και μετατροπής της ενέργειας του ανέμου, ενώ η ηλεκτρομηχανολογική μελέτη, είναι το αμέσως επόμενο και αναγκαίο στάδιο, για την υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος, κατά τον αποδοτικότερο και πλέον συμφέροντα τεχνοοικονομικό τρόπο [2.1] .

2.2 ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΝΕΜΟ

2.2.1 Περιγραφή αιολικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Η γενική δομή ενός αιολικού σταθμού παραγωγής φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο [2.2]

Καθώς ο άνεμος περνάει από τον ανεμοκινητήρα, μέρος της κινητικής του ενέργειας δεσμεύεται από τα πτερύγια και μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια. Αυτή η ενέργεια διοχετεύεται μέσω του μηχανικού συστήματος οδήγησης, στο δρομέα της γεννήτριας και μετατρέπεται τελικά σε ηλεκτρική. Η ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτείται στο κύριο ηλεκτρικό δίκτυο (κατευθείαν στους καταναλωτές ή σε κάποιο μέσο αποθήκευσης ενέργειας), μέσω διακοπτικού εξοπλισμού, εξοπλισμού προστασίας, μετασχηματιστών και γραμμών μεταφοράς. Ο σταθμός διαθέτει και ένα σύστημα εποπτείας και ελέγχου, ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει σε περιπτώσεις μεταβολών του ανέμου και αλλαγών στη δομή του κύριου δικτύου στο οποίο συνδέεται.

2.2.2 Βασικά δομικά στοιχεία γεννητριών

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Ανεμογεννήτριες με οριζόντιο άξονα, ο οποίος διατηρείται παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους.
- Ανεμογεννήτριες με κατακόρυφο άξονα, ο οποίος είναι σταθερός και κάθετος στην επιφάνεια του εδάφους.

Στην παγκόσμια αγορά έχουν επικρατήσει οι ανεμογεννήτριες με οριζόντιο άξονα (με δύο ή τρία πτερύγια), σε ποσοστό μεγαλύτερο από 90%, καθώς παρουσιάζουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και μικρότερη διακύμανση στην παραγόμενη ισχύ, σχετικά με τις ανεμογεννήτριες με κατακόρυφο άξονα. Ακόμη οι ανεμογεννήτριες με οριζόντιο άξονα, εκκινούν χωρίς βοηθητικό εξοπλισμό (self-starting), αντίθετα από τις ανεμογεννήτριες με κατακόρυφο άξονα.

Μία ανεμογεννήτρια περιλαμβάνει συνήθως τα ακόλουθα μέρη [2.3]:

Δρομέας: που αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια από ενισχυμένο πολυεστέρα. Τα πτερύγια προσδένονται πάνω σε μία πλήμνη είτε σταθερά είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονά τους μεταβάλλοντας το βήμα.

Σύστημα μετάδοσης της κίνησης: αποτελείται από τον κύριο άξονα, τα έδρανά του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία της μηχανής.

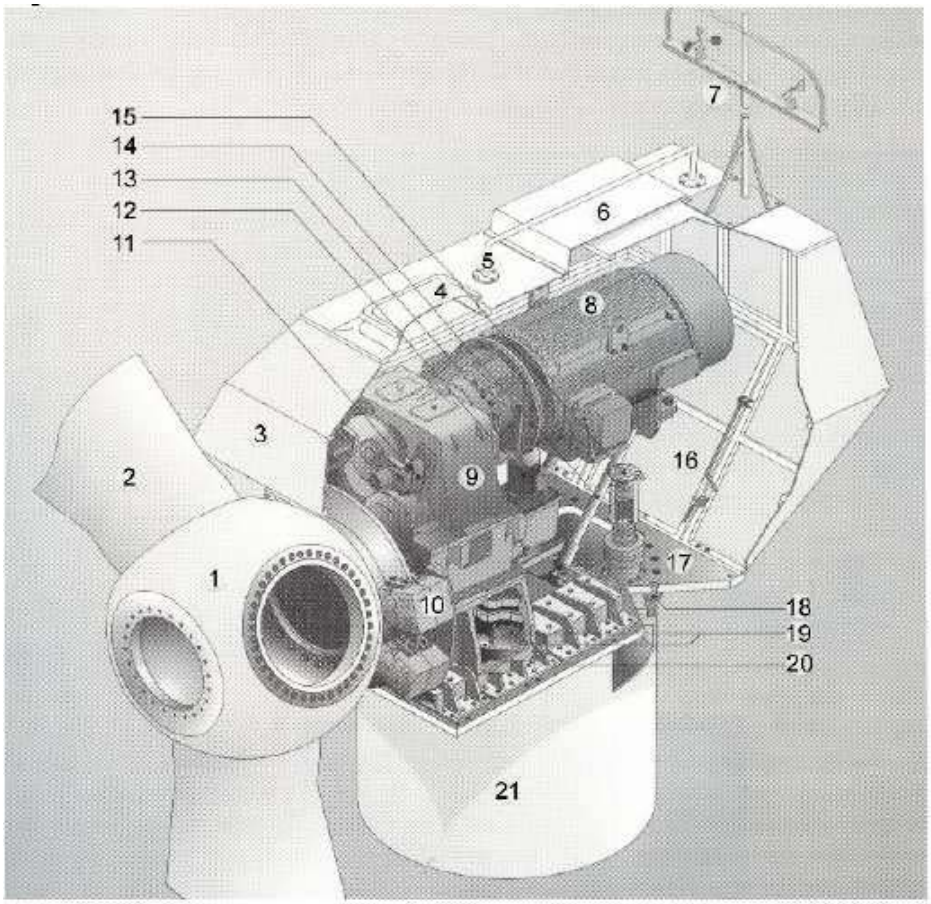
Γεννήτρια: συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή, μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και βρίσκεται συνήθως πάνω στον πύργο της ανεμογεννήτριας. Υπάρχει και το σύστημα πέδης, το οποίο είναι ένα συνηθισμένο δισκόφρενο που τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας.

Σύστημα προσανατολισμού: αναγκάζει συνεχώς τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου.

Πύργος: που στηρίζει όλη την παραπάνω ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση. Ο πύργος είναι συνήθως σωληνωτός ή δικτυωτός και σπανίως από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Ηλεκτρονικός πίνακας και πίνακας ελέγχου: που είναι τοποθετημένοι στη βάση του πύργου . Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί , συντονίζει και ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας, φροντίζοντας για την απρόσκοπτη λειτουργία της.

Στο Σχήμα 2.2 φαίνονται οι κύριες συνιστώσες μιας σύγχρονης ατράκτου.



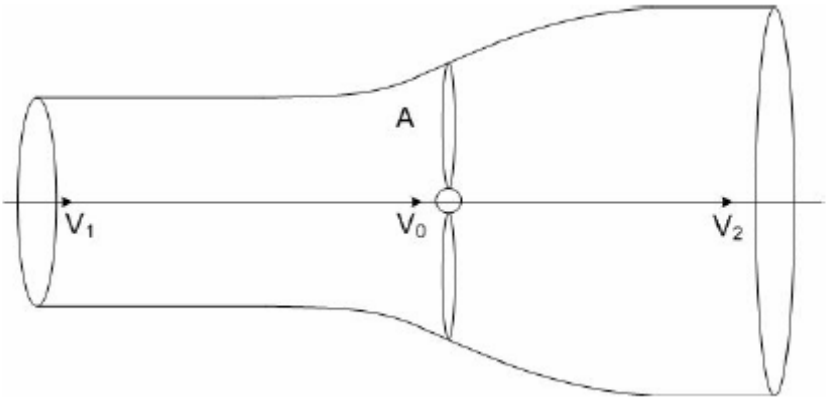
1. Πλήμνη δρομέα
2. Πτερύγια δρομέα
3. Κάλυμμα ατράκτου
4. Φωταγωγός
5. Ράβδος ασφαλείας
6. Εξαγωγή αέρα
7. Αλεξικέραυνο και μετρητής ταχύτητας ανέμου
8. Γεννήτρια
9. Κιβώτιο ταχυτήτων
10. Δισκόφρενο δρομέα
11. Εφεδρικό φρένο
12. Υδραυλικά
13. Ελαστικός σύνδεσμος
14. Αναρτήσεις γεννήτριας
15. Συστήματα προσανατολισμού
16. Θυρίδα επισκόπησης
17. Εξέδρα
18. Στεφάνη ρουλεμάν συστήματος προσανατολισμού
19. Φρένο συστήματος προσανατολισμού
20. Αποζεύκτης θορύβου
21. Πύργος

Σχήμα 2.2 : Φωτογραφία του εσωτερικού της Α/Γ [2.1]

2.2.3 Αρχές λειτουργίας του συστήματος μετατροπής αιολικής ενέργειας

Το Σχήμα 2.3 αναπαριστά την ιδανική ροή του αέρα γύρω από τον ανεμοκινητήρα και είναι γνωστό ως σωλήνας ατμού (*steam tube)*. Θεωρώντας πως ο δρομέας του ανεμοκινητήρα είναι ένας ιδανικός δίσκος και αν γίνουν μια σειρά από παραδοχές, σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας (εξίσωση Bernoulli) κατά μήκος των ρευματικών γραμμών πριν και μετά τον ανεμοκινητήρα, θα ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_{01} + \frac{1}{2}\rho V_0^2 \tag{2.1}$$



Σχήμα 2.3: Ιδανική ροή του αέρα γύρω από ανεμοκινητήρα

$$P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 = P_{02} + \frac{1}{2}\rho V_0^2 \tag{2.2}$$

όπου

P_1, P_2 οι στατικές πιέσεις αρκετά πριν και αρκετά μετά από τον δρομέα

P_{01}, P_{02} οι στατικές πιέσεις λίγο πριν και λίγο μετά το δρομέα

V_1, V_2, V_0 οι ταχύτητες του ανέμου αρκετά πριν, αρκετά μετά και κοντά στο δρομέα

ρ η πυκνότητα του αέρα

Η δύναμη που ασκείται στο δρομέα μπορεί να εκφρασθεί από την ασυνέχεια που δημιουργείται στην πίεση πριν και μετά από αυτόν :

$$F = A(P_{01} - P_{02}) \tag{2.3}$$

όπου

Α το εμβαδό της επιφάνειας του δίσκου που σαρώνουν τα πτερύγια του δρομέα,

καθώς και από την μεταβολή της ορμής του αέρα αρκετά πριν και αρκετά μετά τον δρομέα:

$$F = \rho \cdot A \cdot V_0 (V_1 - V_2) \tag{2.4}$$

όπου,

$\rho A V_0$ η παροχή του αέρα μέσω του σωλήνα, Σχήμα 2.3.

Εξισώνοντας τις σχέσεις (2.3) και (2.4) προκύπτει ότι η V_0 είναι η μέση τιμή των V_1 και V_2:

$$V_0 = \frac{V_1 + V_2}{2} \tag{2.5}$$

Η ισχύς που δεσμεύεται από τον ανεμοκινητήρα δίνεται από τη σχέση:

$$P = A V_0 (P_{01} - P_{02}) \tag{2.6}$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση 2.6 τις 2.1, 2.2 και 2.5 προκύπτει:

$$P = \frac{1}{4} \rho A (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2) \tag{2.7}$$

Η οποία γίνεται με πράξεις:

$$P = \frac{1}{4} \rho A V_1^3 \left[1 + \frac{V_2}{V_1} - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^3 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right] \tag{2.8}$$

Παραγωγίζοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς V_2/V_1 (ο λόγος αυτός αποτελεί τη μεταφορά ισχύος) και εξισώνοντας με το μηδέν, προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση, από την οποία εξάγεται η μεγίστη μεταφορά ισχύος:

$$\frac{dP}{d\left(\frac{V_2}{V_1}\right)} = 0 \Rightarrow 3\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 + 2\left(\frac{V_2}{V_1}\right) - 1 = 0$$

$$\Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{3}$$

Αντικαθιστώντας αυτήν την τιμή στη 2.8 γίνεται:

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \rho A V_1^3 \Rightarrow P_{\max} = \left(\frac{16}{27}\right) \frac{1}{2} \rho A V_1^3$$

$$P_{\max} = (0.593) \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \tag{2.9}$$

Η εξίσωση 2.9 λέγεται **νόμος ή όριο Betz**. Σύμφωνα με αυτόν ακόμη και σε ιδανική ενεργειακή μετατροπή, η μέγιστη ισχύς που μπορεί να ληφθεί, είναι μόνο 0.593 ή 16/27 της συνολικής ισχύος P του ανέμου.

Τα παραπάνω αναφέρονται σε ιδεατές ανεμογεννήτριες, πράγμα το οποίο δεν υφίσταται στην πραγματικότητα. Οι πραγματικές ανεμογεννήτριες συναντούν αντίσταση λόγω του αέρα στα πτερύγιά τους, προκαλώντας τριβές και συνεπώς απώλεια ενέργειας. Επιπλέον η περιστροφή του δρομέα της Α/Γ προκαλεί στροβιλισμό του ανέμου, προκαλώντας μείωση της ροπής στρέψης των φτερών. Η επίδραση όλων των απωλειών που εμφανίζονται σε μία Α/Γ λαμβάνονται υπόψη από μία παράμετρο που συμβολίζεται C_p και λέγεται συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης. Το C_p έχει παρόμοια επίδραση στην ισχύ μίας Α/Γ με το cosφ κατά τον υπολογισμό της ενεργού ισχύος μιας συσκευής κ.τ.λ. Για παράδειγμα για μια ταχύτητα άνεμου V_1 κατάντι στην ανεμογεννήτρια η ισχύς που παράγεται είναι:

$$P_{\max} = C_p \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \tag{2.10}$$

Η παράμετρος C_p είναι αδιάστατη και δίνεται από τη σχέση :

$$C_p = \frac{1}{2}\left[1 + \frac{V_2}{V_1}\right] \cdot \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right] \tag{2.11}$$

Σε ιδανικές περιπτώσεις όταν : $\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{3}$ τότε ο παραπάνω παράγοντας έχει τιμή ίση με 16/27 ή 0,593 που είναι η μέγιστη τιμή του και λέγεται νόμος Betz, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Στις πραγματικές Α/Γ παίρνει τιμές: $0 \leq C \leq 0.4$. Για τιμή ίση με 0,4 διαπιστώνεται ότι η ισχύς που απορροφάται από τον άνεμο είναι 0,4/0,593 ή 67% της ιδανικής θεωρητικής τιμής. Ο συντελεστής ισχύος Cp έχει τιμή, η οποία εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου, την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα καθώς και από παραμέτρους των πτερυγίων, όπως η γωνία περιστροφής τους (pitch angle).

2.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

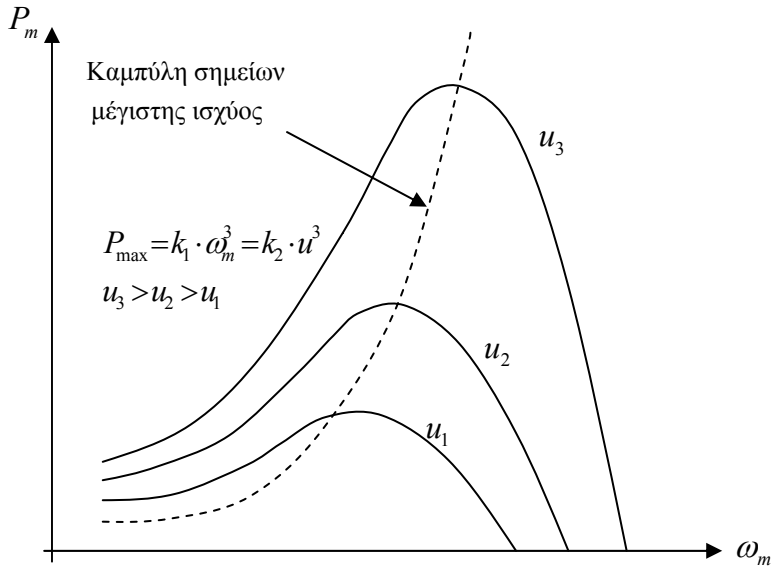
Τα αιολικά συστήματα διακρίνονται σε αυτόνομα, σε υβριδικά και σε διασυνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο. Στα αυτόνομα συστήματα η ανεμογεννήτρια συνδυάζεται με μια συστοιχία συσσωρευτών για την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία ελέγχεται από ένα ρυθμιστή φόρτισης.

Στα υβριδικά συστήματα για τη μόνιμη παροχή ισχύος στο φορτίο, η ανεμογεννήτρια λειτουργεί σε συνδυασμό με μια γεννήτρια ντίζελ και μια συστοιχία συσσωρευτών.

Στα διασυνδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο αιολικά συστήματα, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της ανεμογεννήτριας είναι σταθερή ή μεταβλητή. Στις ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας, ως ηλεκτρογεννήτριες χρησιμοποιούνται συνήθως σύγχρονες μηχανές, με διέγερση συνεχούς ρεύματος (ΣΡ) ή ασύγχρονες μηχανές με βραχυκυκλωμένο κλωβό. Το τριφασικό τύλιγμα του στάτη των γεννητριών, συνδέεται απευθείας στο εναλλασσόμενο δίκτυο (ΕΡ). Επομένως η ταχύτητα περιστροφής της ηλεκτρογεννήτριας ορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου και τον αριθμό των πόλων της γεννήτριας (1500rpm σε μια τετραπολική μηχανή) και διατηρείται σταθερή. Η γεννήτρια ρυθμίζεται (κλειδώνει) στη συχνότητα του δικτύου και επιτρέπει μόνο πολύ μικρές διακυμάνσεις στην ταχύτητα του δρομέα της ανεμογεννήτριας, ανάλογα με την ολίσθηση στην περίπτωση της ασύγχρονης μηχανής. Η ηλεκτρική ισχύς P_G που παράγει η ανεμογεννήτρια, εξαρτάται σημαντικά από την ταχύτητα του ανέμου, καθώς ισχύει $P_G \cong P_m$. Επειδή η ταχύτητα στον άξονα της ανεμογεννήτριας παραμένει σταθερή, η ισχύς που λαμβάνεται από τον άνεμο και μετατρέπεται σε ηλεκτρική, δεν είναι η μέγιστη δυνατή.

Στην επέκταση της περιοχής λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, η γωνία των πτερυγίων μεταβάλλεται (blade pitch control). Όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί την ονομαστική τιμή της ανεμογεννήτριας, η γωνία των πτερυγίων αυξάνεται, προκαλώντας τη μείωση του συντελεστή C_p. Έτσι η παραγόμενη ισχύς, διατηρείται στην ονομαστική τιμή.

Στις ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας για τη διασύνδεση της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι. Η μέθοδος με τη χρήση των μετατροπέων ισχύος, παρέχει τα καλύτερα αποτελέσματα. [2.5]



Σχήμα 2.4: Μεταβολή της μηχανικής ισχύος P_m στον άξονα μιας ανεμογεννήτριας, ως προς την ταχύτητα του άξονα ω_m , σε διάφορες ταχύτητες του ανέμου u

Το αυξημένο κόστος από τη χρήση των μετατροπέων ισχύος, αντισταθμίζεται με τη βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης σε κάθε ταχύτητα ανέμου. Ένας πρόσθετος μηχανισμός για τη λειτουργία σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, είναι η μείωση της ταχύτητας ω_m , σε μια τιμή που προκαλεί μείωση του συντελεστή C_p, επομένως και της μηχανικής ισχύος στην ονομαστική τιμή.

Η λειτουργία των ανεμογεννητριών διακόπτεται, όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι πολύ μικρή, οπότε η διαθέσιμη ισχύς P_m είναι ελάχιστη ή πολύ υψηλή, οπότε η μηχανική ισχύς P_m υπερβαίνει την ονομαστική ισχύ της ηλεκτρογεννήτριας. Σε περίπτωση διακοπής της τάσης του δικτύου, το φορτίο της ανεμογεννήτριας τείνει στο μηδέν, με συνέπεια την ταχεία αύξηση της ταχύτητας περιστροφής. Για την προστασία της ανεμογεννήτριας από την υψηλή ταχύτητα, χρησιμοποιείται ένα σύστημα μηχανικής πέδησης. Σε ισχύ μεγαλύτερη από μερικές εκατοντάδες kW, οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας με τη ρύθμιση της γωνίας των πτερυγίων, είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενες στα διασυνδεδεμένα συστήματα. [2.5]

2.4 ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

Στα αυτόνομα αιολικά συστήματα χρησιμοποιούνται συνήθως ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος, έως μερικές δεκάδες kW, για τη φόρτιση συσσωρευτών και την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές, όπου το ηλεκτρικό δίκτυο, δεν είναι διαθέσιμο. Οι ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος διαθέτουν συνήθως σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη με πολύ μεγάλο αριθμό πόλων, καθώς οδηγούνται απευθείας από τον άξονα του δρομέα, χωρίς τη χρήση μειωτήρα. Για τη μείωση του κόστους και την αύξηση της αξιοπιστίας, τα πτερύγια

στηρίζονται σταθερά στην πλήμνη και ο δρομέας προσανατολίζεται στην διεύθυνση του ανέμου παθητικά, μέσω ουραίου πτερυγίου (tail vane), χωρίς τη χρήση κινητήριου μηχανισμού.

Στη συμβατική μέθοδο φόρτισης μιας συστοιχίας συσσωρευτών από την ανεμογεννήτρια, η έξοδος ενός τριφασικού ανορθωτή με διόδους, συνδέεται απευθείας με τους συσσωρευτές. Η τριφασική γέφυρα ανορθώνει την εναλλασσόμενη τάση, με μεταβλητό πλάτος και συχνότητα που παράγει η σύγχρονη γεννήτρια, καθώς η ταχύτητα του δρομέα της ανεμογεννήτριας μεταβάλλεται με τη συχνότητα του ανέμου. Οι πυκνωτές C σε σειρά με τις φάσεις της γεννήτριας, αντισταθμίζουν την επαγωγική αντίδραση της γεννήτριας, η οποία αυξάνεται σημαντικά με τη συχνότητα. Η χωρητικότητα των πυκνωτών επιλέγεται, έτσι ώστε στη μέγιστη συχνότητα λειτουργίας, η χωρητική αντίδραση των πυκνωτών, να είναι ίση με την επαγωγική αντίδραση της γεννήτριας. Με τον τρόπο αυτό, μειώνεται η συνθέτη αντίσταση της γεννήτριας, επομένως αυξάνεται η ισχύς που παρέχει το φορτίο. [2.5]

2.5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Σήμερα η πρόοδος στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος, μας έχει προσφέρει τη δυνατότητα επιλογής, ανάμεσα σε διαφορετικές τοπολογίες ελέγχου ισχύος των ανεμογεννητριών.

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να λειτουργήσουν είτε με σταθερή είτε με μεταβλητή ταχύτητα. Επομένως, οι δύο κύριες κατηγορίες των τοπολογιών αυτών είναι: [2.1] [2.6]

• ανεμογεννήτριες ***σταθερής ταχύτητας***
• ανεμογεννήτριες ***μεταβλητής ταχύτητας***

Στην περίπτωση των ανεμογεννητριών σταθερής συχνότητας, ανεξάρτητα από την ταχύτητα του ανέμου, η ταχύτητα του δρομέα είναι σταθερή και καθορίζεται από τη συχνότητα του συνδεόμενου δικτύου, τη σχέση του κιβωτίου ταχυτήτων και το σχεδιασμό της γεννήτριας. Σχεδιάζονται έτσι ώστε να παρουσιάζουν βέλτιστη αεροδυναμική απόδοση σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας αποτελούνται από μια επαγωγική γεννήτρια, που συνδέεται κατευθείαν στο δίκτυο, με μια διάταξη ομαλής εκκίνησης (soft starter) και μια συστοιχία πυκνωτών για τη μείωση της κατανάλωσης αέργου ισχύος. Το πλεονέκτημά τους, είναι ότι είναι απλές κατασκευαστικά, στιβαρές και αξιόπιστες. Επίσης το κόστος των ηλεκτρικών τους μερών είναι χαμηλό. Τα μειονεκτήματά τους είναι η έλλειψη ελέγχου της αέργου ισχύος και οι μηχανικές καταπονήσεις. Λόγω της λειτουργίας τους με σταθερή ταχύτητα, όλες οι ταλαντώσεις της ταχύτητας του ανέμου μεταδίδονται ως ταλαντώσεις στη μηχανική ροπή και στη συνέχεια ως ταλαντώσεις στην ηλεκτρική ισχύ στο συνδεόμενο δίκτυο.

Για τους παραπάνω λόγους, τα τελευταία χρόνια επικρατεί η τοπολογία της λειτουργίας των ανεμογεννητριών με μεταβλητές στροφές [2.7] [2.8]. Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών σχεδιάζονται έτσι ώστε να επιτυγχάνουν βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς, σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων του ανέμου. Μέσω της λειτουργίας με μεταβλητές στροφές, γίνεται εφικτό να προσαρμόζεται η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα της ανεμογεννήτριας σε κάθε ταχύτητα ανέμου. Με αυτόν τον τρόπο ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου λ διατηρείται σταθερός σε μία προκαθορισμένη τιμή, που αντιστοιχεί στον συντελεστή μέγιστης αεροδυναμικής απόδοσης. Σε αντίθεση με τη διάταξη σταθερών στροφών, η διάταξη μεταβλητών στροφών, διατηρεί τη ροπή της γεννήτριας σχεδόν σταθερή και οι διακυμάνσεις του ανέμου αποσβένονται μέσω της αλλαγής της ταχύτητας της γεννήτριας. Το ηλεκτρικό σύστημα μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών είναι πιο πολύπλοκο, από το αντίστοιχο των σταθερών στροφών. Συνήθως αποτελείται από μια επαγωγική ή σύγχρονη γεννήτρια που συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα ισχύος. Τα πλεονεκτήματά αυτής της διάταξης είναι η αυξημένη απορρόφηση ισχύος, η βελτιωμένη

ποιότητα ισχύος και η μειωμένη καταπόνηση των μηχανικών μερών της ανεμογεννήτριας. Τα μειονεκτήματά της είναι οι απώλειες στους μετατροπείς ισχύος, η πολυπλοκότητα και το αυξημένο κόστος.

Οι *ανεμογεννήτριες* μπορούν να περιέχουν διάφορους τύπους γεννητριών:
• **σύγχρονες**
• **ασύγχρονες (επαγωγικές)**

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη ανεμογεννήτρια είναι η ασύγχρονη. Παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα όπως στιβαρότητα, κατασκευαστική απλότητα και χαμηλό κόστος. Το κύριο μειονέκτημά της είναι, ότι ο στάτης χρειάζεται ένα άεργο ρεύμα μαγνήτισης. Η ασύγχρονη μηχανή δεν περιέχει μόνιμους μαγνήτες και κύκλωμα διέγερσης. Το απαιτούμενο ρεύμα διέγερσης το λαμβάνει από μια άλλη πηγή, απορροφώντας άεργο ισχύ. Η άεργος ισχύς μπορεί να παρέχεται από το δίκτυο ή από μια διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος. Το μαγνητικό πεδίο της γεννήτριας αναπτύσσεται μόνο όταν συνδέεται με ένα ενεργό δίκτυο ΕΡ. Στην περίπτωση που υπάρχει διέγερση από ΕΡ, το δημιουργούμενο μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται με μια ταχύτητα που καθορίζεται από τον αριθμό των πόλων στα τυλίγματα και τη συχνότητα του ρεύματος, τη σύγχρονη ταχύτητα. Έτσι αν ο δρομέας περιστρέφεται με μια ταχύτητα που ξεπερνά τη σύγχρονη ταχύτητα, ένα ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται ανάμεσα στα πεδίο του δρομέα και το στρεφόμενο πεδίο του στάτη, ανάλογο με τη σχετική ταχύτητα (ολίσθηση), που προκαλούν τα ρεύματα στα τυλίγματα του δρομέα. Η αλληλεπίδραση του μαγνητικού πεδίου του δρομέα με αυτό του στάτη, έχει σαν αποτέλεσμα τη ροπή που ασκείται στο δρομέα.

Οι *ασύγχρονες γεννήτριες* μπορεί να είναι:
• **βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel cage)**
• **δακτυλιοφόρου δρομέα (wound rotor)**

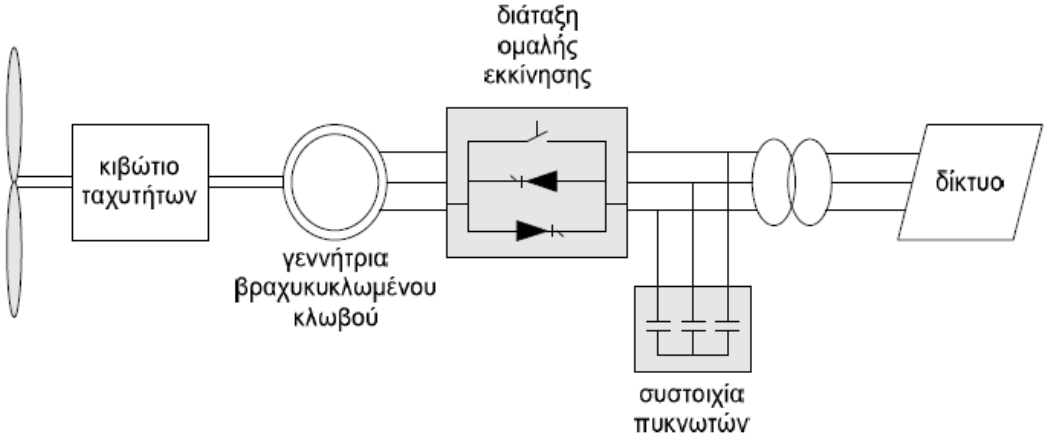
Α. Ασύγχρονες Γεννήτριες Βραχυκυκλωμένου Κλωβού

Οι γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού επιλέγονται συχνά για αιολικές εφαρμογές, λόγω της μηχανικής τους απλότητας, της υψηλής τους απόδοσης και των μικρών απαιτήσεων σε συντήρηση. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διατάξεις είτε σταθερών είτε μεταβλητών στροφών. Όταν χρησιμοποιούνται σε διατάξεις σταθερών στροφών συνδέονται κατευθείαν στο δίκτυο, Σχήμα 2.5. Σε αυτήν την περίπτωση η ταχύτητά τους αλλάζει μόνο κατά ένα μικρό ποσοστό στις αλλαγές του ανέμου. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι διακυμάνσεις στην ταχύτητα του ανέμου μεταδίδονται κατευθείαν στο δίκτυο. Αυτές οι διακυμάνσεις είναι ιδιαίτερα κρίσιμες κατά τη διάρκεια της σύνδεσης της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο, όπου το ρεύμα εκκίνησης είναι περίπου 7-8 φορές μεγαλύτερο του ονομαστικού. Σε ένα ασθενές δίκτυο το μεγάλο ρεύμα εκκίνησης, μπορεί να προκαλέσει σοβαρές διαταραχές στην τάση. Για το λόγο αυτό η σύνδεση μιας τέτοιας γεννήτριας στο δίκτυο, θα πρέπει να γίνεται σταδιακά ώστε να περιοριστεί το ρεύμα εκκίνησης.

Στις γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού υπάρχει μια μοναδική αναλογία ανάμεσα στην πραγματική ισχύ, την άεργο ισχύ, την τερματική τάση και την ταχύτητα του δρομέα. Αυτό σημαίνει, ότι σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου η ανεμογεννήτρια μπορεί να παράγει παραπάνω πραγματική ισχύ, μόνο αν η γεννήτρια τραβήξει από το δίκτυο παραπάνω άεργο ισχύ. Για τη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού που είναι απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο, η ποσότητα της απορροφούμενης άεργου ισχύος είναι ανεξέλεγκτη, διότι ποικίλει ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Αν δεν υπάρχουν ηλεκτρικά στοιχεία για να παρέχουν την άεργο ισχύ, αυτή θα πρέπει να απορροφηθεί από το δίκτυο. Η άεργος ισχύς που απορροφάται από το δίκτυο, προκαλεί επιπρόσθετες απώλειες μεταφοράς και σε μερικές περιπτώσεις αστάθεια στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή μπορούν να χρησιμοποιηθούν συστοιχίες πυκνωτών και

σύγχρονοι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος για τη μείωση της απορρόφησης αέργου ισχύος από το δίκτυο.

Στην περίπτωση που η γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών, τα εναλλασσόμενα μεγέθη μεταβλητής συχνότητας που παράγονται από τη γεννήτρια, μετατρέπονται στα αντίστοιχα της επιθυμητής σταθερής συχνότητας του δικτύου με τη χρήση μετατροπέων ισχύος.



Σχήμα 2.5: Γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο

Β. Ασύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα

Στην περίπτωση των γεννητριών δακτυλιοφόρου δρομέα τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του δρομέα μπορούν να ελεγχθούν εξωτερικά και με τον τρόπο αυτό να επηρεαστεί η τάση του δρομέα. Τα τυλίγματα του δρομέα μπορούν να συνδεθούν εξωτερικά, μέσω δακτυλίων και ψηκτρών ή μέσω εξοπλισμού ηλεκτρονικών ισχύος, ο οποίος μπορεί να απαιτεί ή όχι δακτυλίους και ψήκτρες. Τα κύρια μειονεκτήματά της είναι ότι είναι πιο ακριβή και όχι τόσο στιβαρή όσο η γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού.

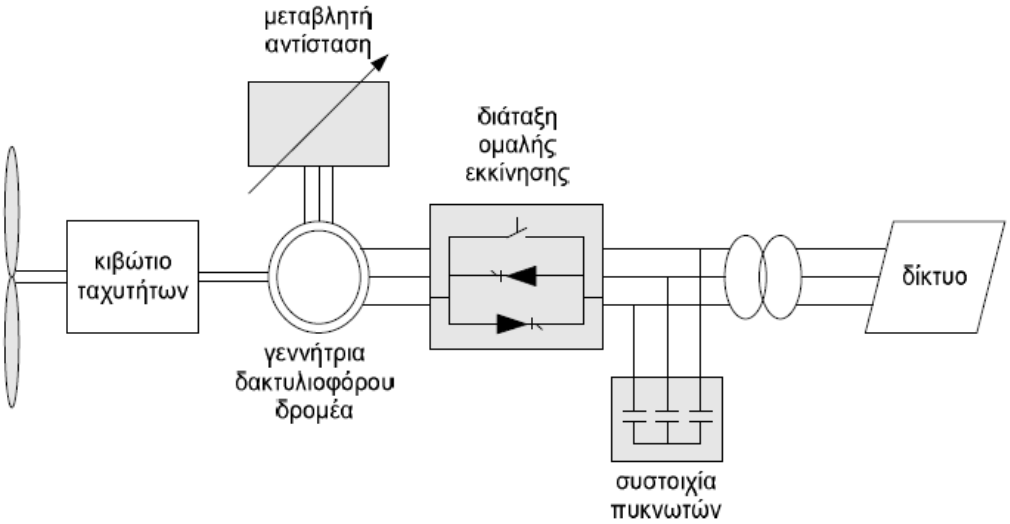
Οι κύριοι *τύποι γεννητριών δακτυλιοφόρου δρομέα* που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι:
• οι γεννήτριες με ***ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα*** (σύστημα optislip)
• οι γεννήτριες ***διπλής τροφοδότησης*** (double fed).

Οι γεννήτριες με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα, εισήχθησαν από την κατασκευαστική εταιρία Vestas με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί το φορτίο στις ανεμογεννήτριες κατά τη διάρκεια ριπών ανέμου. Μέσω αυτού του συστήματος η γεννήτρια έχει τη δυνατότητα να μεταβάλει την ολίσθησή της (σε ένα μικρό εύρος τιμών) και να οδηγηθεί στη βέλτιστη ολίσθηση, εξασφαλίζοντας μικρότερες ταλαντώσεις στη ροπή εισόδου και στην ισχύ εξόδου. Οι γεννήτριες με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα, είναι γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα, με μια μεταβλητή εξωτερική αντίσταση που συνδέεται στα τυλίγματα του δρομέα Σχήμα 2.6. Η ολίσθηση του δρομέα αλλάζει τροποποιώντας την συνολική αντίσταση του δρομέα, μέσω ενός μετατροπέα, ο οποίος συνδέεται στον άξονα του δρομέα. Ο στάτης της γεννήτριας συνδέεται κατευθείαν στο δίκτυο.

Η μεταβλητή ολίσθηση είναι ένας αρκετά απλός, αξιόπιστος και οικονομικός τρόπος, για να επιτευχθούν οι μειώσεις φορτίου στην περίπτωση ριπών ανέμου.

Τα μειονεκτήματά της είναι ότι:

- το εύρος στο οποίο μεταβάλλεται η ταχύτητα, περιορίζεται στο 0-10%, καθώς εξαρτάται από το μέγεθος της μεταβλητής αντίστασης του στάτη
- ο έλεγχος πραγματικής και αέργου ισχύος που επιτυγχάνεται, δεν είναι αρκετά ικανοποιητικός
- ένα ποσοστό ισχύος καταναλώνεται στη μεταβλητή αντίσταση του δρομέα

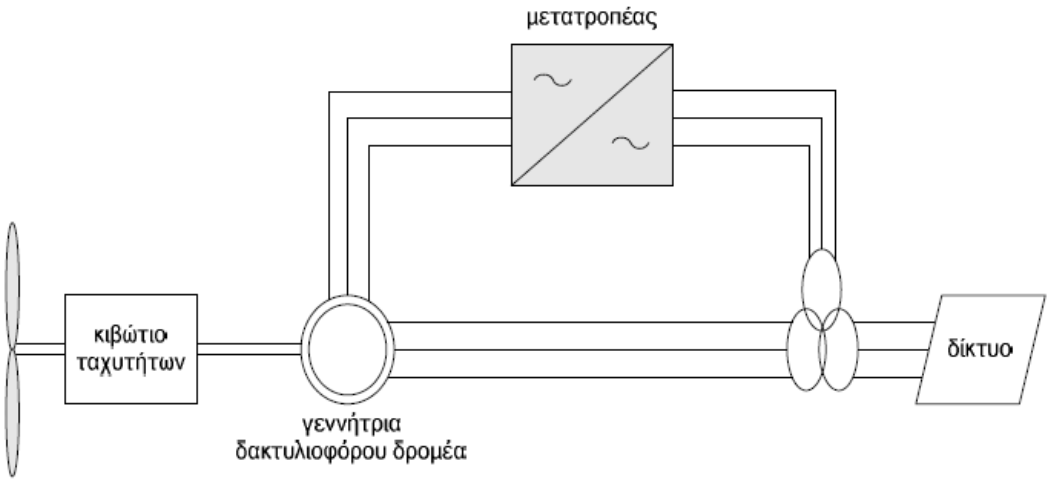


Σχήμα 2.6: Γεννήτρια με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα

Η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης κερδίζει συνεχώς έδαφος στη σημερινή αγορά. Αποτελείται από μια γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα με τα τυλίγματα του στάτη απευθείας συνδεδεμένα στο δίκτυο ΕΡ και τα τυλίγματα του δρομέα συνδεδεμένα σε μια διάταξη διασύνδεσης Εναλλασσόμενου Ρεύματος /Συνεχούς Ρεύματος /Εναλλασσόμενου Ρεύματος (ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ) με μετατροπείς πηγής τάσης, Σχήμα 2.7. Ο όρος «διπλή τροφοδότηση» αναφέρεται στο γεγονός, ότι η τάση στο στάτη εφαρμόζεται από το δίκτυο και η τάση στο δρομέα εφαρμόζεται από τον μετατροπέα ισχύος. Ο μετατροπέας αντισταθμίζει τη διαφορά ανάμεσα στη μηχανική και την ηλεκτρική συχνότητα, παρέχοντας στο δρομέα ένα ρεύμα με μεταβλητή συχνότητα. Έτσι κατά την κανονική λειτουργία αλλά και κατά τη διάρκεια σφαλμάτων, η συμπεριφορά της γεννήτριας ελέγχεται από τον μετατροπέα ισχύος και τους ελεγκτές του.

Η διάταξη των μετατροπέων αποτελείται από δύο μετατροπείς πηγής τάσης, ο ένας στην πλευρά του δρομέα και ο άλλος στην πλευρά του δικτύου, οι οποίοι ελέγχονται ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο. Ο μετατροπέας που βρίσκεται στην πλευρά του δρομέα ελέγχει την πραγματική και την άεργο ισχύ ελέγχοντας τις συνιστώσες του ρεύματος του δρομέα, ενώ ο μετατροπέας από την πλευρά του δικτύου ελέγχει την τάση ΣΡ, ώστε η άεργος ισχύς που απορροφάται από το δίκτυο να είναι ίση με μηδέν.

Ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας στο σύστημα οδήγησης, η ισχύς τροφοδοτείται στο δρομέα ή απορροφάται από αυτόν. Σε μια υπερ-σύγχρονη κατάσταση λειτουργίας, η ισχύς οδηγείται από το δρομέα μέσω του μετατροπέα στο δίκτυο, ενώ στην υπο-σύγχρονη κατάσταση λειτουργίας η κατεύθυνση της ισχύος είναι από το δίκτυο προς το δρομέα. Και στις δύο καταστάσεις ο στάτης τροφοδοτεί με ενέργεια το δίκτυο. [2.9]



Σχήμα 2.7 : Γεννήτρια διπλής τροφοδότησης

Η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Έχει την ιδιότητα να ελέγχει ανεξάρτητα την πραγματική από την άεργο ισχύ μέσω του ρεύματος στο δρομέα. Δεν είναι αναγκαίο να μαγνητιστεί από το δίκτυο, καθώς μπορεί να μαγνητιστεί και από το δίκτυο του δρομέα. Έχει επίσης την ικανότητα να παράγει άεργο ισχύ, η οποία τροφοδοτείται στο δίκτυο μέσω του μετατροπέα που βρίσκεται προς την πλευρά του δικτύου. Παρόλα αυτά ο μετατροπέας αυτός υπό κανονικές συνθήκες λειτουργεί υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και δεν εμπλέκεται σε ανταλλαγή αέργου ισχύος, ανάμεσα στην ανεμογεννήτρια και το δίκτυο. Στην περίπτωση που το δίκτυο είναι ασθενές με διακυμάνσεις στην τάση, η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης μπορεί να ρυθμιστεί, ώστε να παράγει ή να καταναλώνει ένα ποσό αέργου ισχύος με σκοπό τον έλεγχο της τάσης.

Το μέγεθος του μετατροπέα δεν σχετίζεται με τη συνολική ισχύ της γεννήτριας, αλλά με το επιλεγμένο εύρος ταχυτήτων και άρα με την ολίσθηση. Η επιλογή του εύρους ταχυτήτων βασίζεται στην οικονομική βελτιστοποίηση και στην αυξημένη απόδοση.

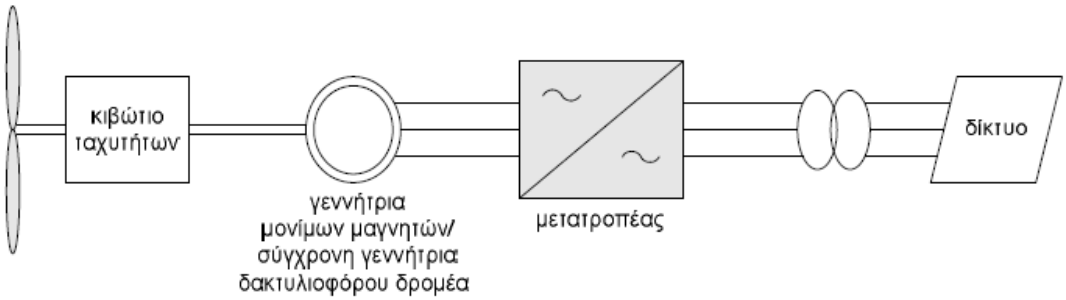
Όσον αφορά στη σύγχρονη γεννήτρια, αυτή είναι πιο πολύπλοκη και ακριβότερη σε σχέση με μια αντίστοιχη επαγωγική. Εμφανίζει όμως ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι της επαγωγικής: δεν απαιτεί άεργο ρεύμα μαγνήτισης. Το μαγνητικό πεδίο στη σύγχρονη μηχανή δημιουργείται μέσω μόνιμων μαγνητών ή με ένα συμβατικό τύλιγμα πεδίου.

Δύο *τύποι σύγχρονων μηχανών* χρησιμοποιούνται σήμερα στις ανεμογεννήτριες:
• **σύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα**
• **σύγχρονες γεννήτριες μονίμων μαγνητών**

Α. Σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα

Τα τυλίγματα του στάτη της σύγχρονης γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα συνδέονται κατευθείαν στο δίκτυο κι έτσι η ταχύτητα περιστροφής της ορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου. Το τύλιγμα του δρομέα διεγείρεται με συνεχές ρεύμα. Αντίθετα με την επαγωγική γεννήτρια, η σύγχρονη γεννήτρια δεν χρειάζεται επιπλέον αντιστάθμιση αέργου ισχύος. Το τύλιγμα του δρομέα, μέσα από το οποίο ρέει το συνεχές ρεύμα, παράγει το πεδίο διέγερσης, το οποίο στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Η ταχύτητα της σύγχρονης γεννήτριας καθορίζεται από τη συχνότητα του στρεφόμενου πεδίου και από το πλήθος των ζευγών πόλων στο δρομέα.

Οι κατασκευάστριες εταιρείες Enercon και Lagerwey χρησιμοποιούν σύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα με πολλαπλούς πόλους και χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων, οι οποίες συνδέονται στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Μέσω του μετατροπέα επιτυγχάνεται λειτουργία με μεταβλητές στροφές και ομαλότερη σύνδεση με το δίκτυο. Το κύριο μειονέκτημά της είναι το αυξημένο κόστος λόγω της κατασκευαστικής πολυπλοκότητας και του μεγάλου μετατροπέα ισχύος.



Σχήμα 2.8 : Σύνδεση σύγχρονης γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα ή γεννήτριας μονίμων μαγνητών με το δίκτυο.

Β. Σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών

Πολλά επιστημονικά άρθρα υποστηρίζουν τη χρήση σύγχρονων γεννητριών μονίμων μαγνητών στις ανεμογεννήτριες, λόγω της ιδιότητάς τους να αυτοδιεγείρονται, η οποία επιτρέπει τη λειτουργία υπό υψηλό συντελεστή ισχύος και υψηλή απόδοση [2.10].

Στη σύγχρονη γεννήτρια μονίμων μαγνητών η απόδοση είναι υψηλότερη από αυτήν μιας επαγωγικής γεννήτριας αντίστοιχης ισχύος, καθώς η διέγερση παρέχεται χωρίς τροφοδότηση. Παρόλα αυτά τα υλικά που χρησιμοποιούνται για να κατασκευαστούν αυτές οι μηχανές είναι ακριβά και παρουσιάζουν δυσκολία στην επεξεργασία τους, κατά τη διάρκεια της κατασκευής τους. Επίσης ο μετατροπέας ισχύος που απαιτείται για τη μετατροπή της τάσης και συχνότητας που παράγεται από τη μηχανή στην τάση και συχνότητα του δικτύου, συμμετέχει στην αύξηση του κόστους. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι τα μαγνητικά υλικά της μηχανής είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία. Για το λόγο αυτό, επιβάλλεται η επίβλεψη της θερμοκρασίας του δρομέα και η χρήση ενός συστήματος ψύξης.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί ένας άλλος τύπος γεννήτριας που χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτριες, οι γεννήτριες υψηλής τάσης. Συνήθως, η ονομαστική τάση των ανεμογεννητριών είναι τα 690 V και για το λόγο αυτό απαιτούν ένα μετασχηματιστή στην άτρακτο ή στη βάση του πύργου. Το κύριο κίνητρο για την αύξηση της τάσης της γεννήτριας, είναι η μείωση των ρευμάτων που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στη μείωση του μεγέθους της γεννήτριας και στην αύξηση της απόδοσής της ειδικά σε μεγάλα φορτία. Αν η τάση της μηχανής συμπίπτει με την τάση του δικτύου, η σύνδεση του δικτύου μπορεί να επιτευχθεί χωρίς μετασχηματιστή.

Οι γεννήτριες υψηλής τάσης μπορεί να είναι είτε σύγχρονες είτε ασύγχρονες. Είναι μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση για μεγάλες ανεμογεννήτριες που ξεπερνούν τα 3 MW. Τα κύρια μειονεκτήματά τους είναι το υψηλό κόστος του συνολικού συστήματος, η αβεβαιότητα σχετικά με τη μακροχρόνια επίδοσή τους και οι απαιτήσεις ασφάλειας, οι οποίες είναι πιο σύνθετες από τις απαιτήσεις μηχανών χαμηλότερης τάσης.

Μέχρι σήμερα, μόνο λίγες πρότυπες ανεμογεννήτριες που έχουν σχεδιαστεί από εταιρείες παροχής ενέργειας ή από κατασκευαστές ηλεκτρικού εξοπλισμού χρησιμοποιούν τις γεννήτριες υψηλής τάσης.

Τέλος, ένας ιδιαίτερα διαδεδομένος τρόπος σύνδεσης απομακρυσμένων ανεμογεννητριών στο δίκτυο ΕΡ είναι η διασύνδεση ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ με Μετατροπείς Πηγής Τάσης (ΜΠΤ), γνωστή και ως ελαφρά διασύνδεση ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ (HVDC light ή HVDC PLUS). Τα κύρια δομικά της

στοιχεία είναι δύο ΜΠΤ με διπολικά τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBT) και αντιπαράλληλες διόδους και δύο καλώδια ΣΡ. Τα κύρια πλεονεκτήματά της είναι, ότι επιτρέπει τη σύνδεση ακόμα και ασθενών δικτύων με τις ανεμογεννήτριες και ότι προσφέρει βελτιωμένη ποιότητα τροφοδοτούμενης ισχύος σε συνδυασμό με ανεξάρτητο έλεγχο της αέργου ισχύος.

2.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[2.1] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi, "*Wind Energy Handbook*", John Wiley & Sons, Ltd, 2001.

[2.2] Siegfried Heier, "Wind Energy Conversion Systems", Wiley, 1996.

[2.3] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, "http://www.cres.gr"

[2.4] D.T. Man., J.P Salivan. and Wasynczuk, "Dynamic Behaviour of a Class of a Wind Turbine Generators During Random Wind Fluctuations", IEEE Trans.-Power Apparatus Systems, vol. 6, pp.2837-2845, 1981.

[2.5] Ι. Κιοσκερίδης, "Ηλεκτρονικά Ισχύος", Τζιόλα, 2008.

[2.6] V. Akhmatov, " Analysis of dynamic behaviour of electric power systems with large amount of wind power", PhD Thesis, Technical University of Denmark, April 2003.

[2.7] W. E. Leithead, S. de la Salle, D. Reardon, "Role and Objectives of Control for Wind Turbines", Generation Transmission and Distribution IEE Proceedings C, vol. 138, pp. 135-148, 1991.

[2.8] J. G. Slooweg, H. Polinder, W.L. Kling, "Dynamic Modelling of a Wind Turbine with Direct Drive Synchronous Generator and back to back Voltage Source Converter and its Controls", European Wind Energy Conference and Exhibition, Copenhagen, Denmark, 2001.

[2.9] Rajib Datta and V. T. Ranganathan, "Variable-speed wind power generation using doubly fed wound rotor induction machine-a comparison with alternative schemes," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 17, no. 3, pp. 414–421, Sept. 2002.

[2.10] M. Alatalo, "Permanent Magnet Machines with Air Gap Windings and Integrated Teeth Windings", Technical Report 288, Chalmers University of Technology, Sweden, May 2002.

[2.11] Γ. Μπεργελές, "Ανεμοκινητήρες", εκδόσεις Συμεών, 2000.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Κίνησης αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα αλλά και πλέον ενδιαφέροντα πεδία στην επιστήμη του Μηχανικού. Ο παραπάνω χαρακτηρισμός γίνεται σαφής, αν αναλογιστεί κανείς τον κεφαλαιώδη ρόλο που διαδραματίζουν τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης στην καθημερινή ζωή όλων μας αλλά και τα πολυεπίπεδα κοινωνικά οφέλη που αυτά συνεπάγονται.

Το φάσμα των εφαρμογών τους είναι ευρύτατο και περιλαμβάνει ηλεκτρικά τρένα, λεωφορεία (τρόλεϊ), πλοία, τελευταία και αυτοκίνητα από σχεδόν όλες τις μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες, εφαρμογές ανύψωσης (γερανοί, ανελκυστήρες κ.α.), μεταφοράς (ταινιόδρομοι, αντλίες κ.α.), περιστροφής (φτερωτές, εργαλειομηχανές, οικιακές συσκευές κ.α.) και ποικίλες άλλες εφαρμογές. Οι απαιτήσεις ισχύος που καλύπτονται από τα συστήματα αυτά, είναι από κάποια κλάσματα του Watt μέχρι χιλιάδες ή και εκατομμύρια Watts. Επομένως, όπως γίνεται άμεσα αντιληπτό από τα παραπάνω, το αντικείμενο της μελέτης των συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης έχει αναρίθμητες πρακτικές εφαρμογές, οι οποίες συνεπάγονται ουσιαστικότατα οικονομικά και σημαντικότατα κοινωνικά οφέλη. Σε αδρές γραμμές ορισμένα από αυτά είναι η βελτίωση των μέσων μεταφοράς ανθρώπων και αντικειμένων, η βελτίωση τόσο της ποσότητας, όσο και της ποιότητας της βιομηχανικής παραγωγής, η μείωση της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος και γενικότερα η άνοδος του τεχνολογικού και βιοτικού επιπέδου των ανθρώπινων κοινωνιών.

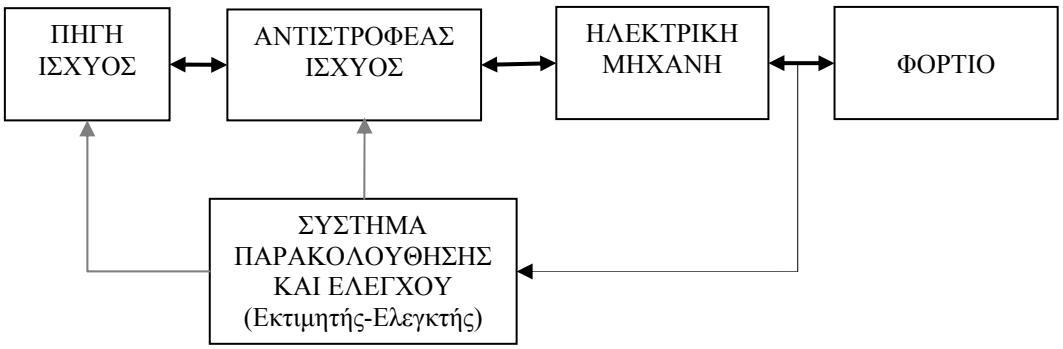
Οι επιστημονικές και τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων δεκαετιών έχουν δώσει νέα ώθηση και νέες δυνατότητες στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης, καθιστώντας τα ακόμα πιο αποδοτικά και αποτελεσματικά στη λειτουργία τους. Ήδη σήμερα θεωρούνται αναντικατάστατα, ενώ η περαιτέρω βελτίωσή τους αναμένεται να επιτρέψει τη χρήση τους σε εφαρμογές που μέχρι σήμερα δεν ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθούν.

3.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Στη γενική τους μορφή τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης συνιστούν ολοκληρωμένα ηλεκτρομηχανικά σύστημα που αποτελούνται από τις παρακάτω κύριες βαθμίδες:

- Πηγή Ισχύος
- Μετατροπέας Ισχύος
- Ηλεκτρική Μηχανή
- Φορτίο
- Σύστημα Παρακολούθησης και Ελέγχου

Η διασύνδεση των παραπάνω αναφερόμενων βαθμίδων εικονίζεται διαγραμματικά στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1 : Απλοποιημένο διάγραμμα τυπικού συστήματος ηλεκτρικής κίνησης

Οι παραπάνω βαθμίδες μπορούν να διαιρεθούν σε δύο επιμέρους υποσύνολα:

- *Το Κύκλωμα Ισχύος*, που περιλαμβάνει τις βαθμίδες της Πηγής Ισχύος, του Μετατροπέα Ισχύος, της Ηλεκτρικής Μηχανής και του Φορτίου.
- *Το Κύκλωμα Ελέγχου*, που περιλαμβάνει τη βαθμίδα του Συστήματος Παρακολούθησης και Ελέγχου.

Στο Σχήμα 3.1 παρατηρείται ότι οι βαθμίδες του κυκλώματος ισχύος διασυνδέονται με αμφίδρομα μαύρα βέλη. Αυτός ο συμβολισμός αντιπροσωπεύει αφ' ενός ότι μέσω του κυκλώματος ισχύος έχουμε ροή μεγάλης ποσότητας ενέργειας (συγκριτικά με αυτή στο κύκλωμα ελέγχου) και αφ' ετέρου ότι η ροή της ενέργειας αυτής είναι δυνατόν να είναι αμφίδρομη. Είναι δηλαδή δυνατόν είτε ηλεκτρική ενέργεια να μετατρέπεται και να μεταφέρεται προς την ηλεκτρική μηχανή, η οποία τώρα λειτουργεί ως ηλεκτρικός κινητήρας, και να αποδίδεται ως μηχανική στο φορτίο είτε περίσσεια μηχανικής ενέργειας που διαθέτει το φορτίο να μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της ηλεκτρικής μηχανής, η οποία τώρα λειτουργεί ως ηλεκτρική γεννήτρια και να επιστρέφει μέσω του μετατροπέα προς την πηγή ηλεκτρικής ισχύος.

Το κύκλωμα ελέγχου περιλαμβάνει όλο το υλικό και το λογισμικό που είναι απαραίτητο για την παρακολούθηση και τις δράσεις ελέγχου της ηλεκτρικής κίνησης. Το κύκλωμα ελέγχου λαμβάνει μετρήσεις (αναδράσεις) από κατάλληλα αισθητήρια (λ.χ. για τα ρεύματα ή τις τάσεις των φάσεων, την ταχύτητα του δρομέα, τη μαγνητική ροή εντός της μηχανής κ.α.), παρατηρεί, συγκρίνει και εκτιμά χαρακτηριστικά και κρίσιμα μεγέθη του συστήματος και μέσω ενός αλγόριθμου ελέγχου τροποποιεί, μέσω κατάλληλης παλμοδότησης των ηλεκτρονικών ισχύος, το πλάτος και τη συχνότητα της τάσης εισόδου της ηλεκτρικής μηχανής, ώστε το σύστημα ηλεκτρικής κίνησης να έχει την επιθυμητή απόκριση. Η κάθε μια από τις παραπάνω βαθμίδες απαιτείται να λειτουργεί με τη μέγιστη δυνατή απόδοση και την καλύτερη δυνατή συνεργασία με τις υπόλοιπες βαθμίδες, έτσι ώστε το συνολικό σύστημα να λειτουργεί βέλτιστα. Η σύγχρονη τάση για συστήματα ηλεκτρικής κίνησης υψηλών απαιτήσεων επιβάλλει το συνολικό σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση του συστήματος μετατροπέα–μηχανής–συστήματος ελέγχου, έτσι ώστε η αλληλεπίδρασή τους να δίνει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη αλλά περιεκτική ανάλυση όλων των επιμέρους βαθμίδων ενός τυπικού συστήματος ηλεκτρικής κίνησης, όπως αυτό που περιγράφηκε παραπάνω.

3.2.1. Πηγή Ισχύος

Η πηγή ηλεκτρικής ισχύος παρέχει ηλεκτρική ισχύ υπό συνεχή ή εναλλασσόμενη τάση. Ως πηγή ισχύος τις περισσότερες φορές έχουμε την τριφασική συμμετρική παροχή εναλλασσόμενης τάσης από το δίκτυο (ΔΕΗ), η οποία παράγεται κατά μείζονα λόγο από σύγχρονες γεννήτριες στους μεγάλους θερμικούς σταθμούς παραγωγής και κατά ελάσσονα, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, από ανανεώσιμες πηγές όπως η αιολική, η ηλιακή ενέργεια κ.α. Από την άλλη πλευρά, ενδέχεται η τάση που παρέχει η πηγή ισχύος να είναι συνεχής και να προέρχεται είτε από ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου είτε από συσσωρευτές (μπαταρίες) είτε από φωτοβολταϊκές συστοιχίες είτε ακόμα και από κυψέλες καυσίμου. Ανάλογα με το είδος της ηλεκτρικής μηχανής (βλέπε αναλυτικά παρακάτω παράγραφο 3.2.3) και της πηγής ισχύος που διαθέτει κανείς, θα πρέπει να επιλέξει τον κατάλληλο μετατροπέα που θα τροφοδοτήσει την μηχανή με την τάση που απαιτείται, ώστε να λειτουργήσει σωστά. Σε πολλές περιπτώσεις όπου η πηγή ισχύος που διαθέτει δεν είναι κατάλληλη για την τροφοδοσία της ηλεκτρικής μηχανής (π.χ. εναλλασσόμενη τροφοδοσία σε μηχανή συνεχούς και αντιστρόφως), ο μετατροπέας που ακολουθεί εκτός από τον έλεγχό της, έχει τον στόχο να μετατρέψει την ισχύ σε μορφή που μπορεί να αξιοποιήσει η μηχανή και υπό αυτή την έννοια είναι απαραίτητος για τη λειτουργία της.

3.2.2. Μετατροπέας Ισχύος

Ο μετατροπέας ισχύος είναι η διάταξη που παρεμβάλλεται ανάμεσα στην πηγή ισχύος και στην ηλεκτρική μηχανή. Σκοπός του είναι είτε απλά να καταστήσει δυνατή τη λειτουργία της ηλεκτρικής μηχανής είτε επιπλέον να ελέγξει τη λειτουργία αυτής. Για το λόγο αυτό υπάρχουν ελεγχόμενοι και μη ελεγχόμενοι μετατροπείς ισχύος. Ο τύπος του μετατροπέα που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από την εφαρμογή. Στον Πίνακα 3.1 φαίνονται οι διάφοροι τύποι μετατροπέων ισχύος. Ακολούθως παρουσιάζονται περιληπτικά η δομή και τα γενικά χαρακτηριστικά αυτών των μετατροπέων.

Πίνακας 3.1 : Είδη μετατροπέων που απαιτούνται ανάλογα με την εφαρμογή

Τάση Πηγή Ισχύος	**Τάση Τροφοδοσίας Ηλεκτρικής Μηχανής**	**Μετατροπέας που απλώς θα καταστήσει δυνατή τη λειτουργία της μηχανής**	**Μετατροπέας που θα ελέγξει τη λειτουργία της μηχανής**
Συνεχής	Συνεχής	(Γενικά δεν απαιτείται) Πιθανώς όμως να απαιτείται ελεγχόμενος μετατροπέας συνεχούς σε συνεχές	Ελεγχόμενος μετατροπέας συνεχούς σε συνεχές
	Εναλλασσόμενη	Αντιστροφέας	Ελεγχόμενος Αντιστροφέας
Εναλλασσόμενη	Συνεχής	Ανορθωτής	Ελεγχόμενος Ανορθωτής
	Εναλλασσόμενη	(Γενικά δεν απαιτείται) Πιθανώς όμως να απαιτείται Μ/Σ ή Αντιστροφέας	Ελεγχόμενος ή μη Ανορθωτής και Ελεγχόμενος Αντιστροφέας

3.2.2.1 Ελεγχόμενος μετατροπέας ισχύος

Ο ελεγχόμενος μετατροπέας συνεχούς σε συνεχές (DC to DC Converter) απαιτείται μόνο στην περίπτωση ελέγχου του πλάτους της συνεχούς τάσης, με την οποία τροφοδοτείται μια ηλεκτρική μηχανή συνεχούς ρεύματος. Αποτελεί ουσιαστικά ένα μετατροπέα του επιπέδου της συνεχούς τάσης.

Κατά την ιστορική του εξέλιξη έχουν παρουσιαστεί πολλές διαφορετικές μέθοδοι μετατροπής από συνεχές σε συνεχές ρεύμα (DC to DC Converter). Αρχικά προτάθηκε η χρήση γραμμικών παθητικών στοιχείων (αντιστατών) σε συνδεσμολογία διαιρέτη τάσεως. Αυτή η απλή τεχνική παρέχει στο φορτίο μικρότερη τάση ή ίση με την τάση της πηγής, η οποία είναι δυνατόν να μεταβάλλεται με τη μεταβολή της τιμής της αντίστασης ενός από τους αντιστάτες του διαιρέτη. Παρά την απλότητά της, η μέθοδος αυτή γρήγορα εγκαταλείφθηκε καθώς παρουσιάζει σοβαρότατα μειονεκτήματα, όπως ότι η λειτουργία του διαιρέτη επηρεάζεται από την τιμή της αντίστασης του φορτίου, η αποδοτικότητά του είναι απαράδεκτα χαμηλή αφού ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας που διέρχεται από αυτόν μετατρέπεται σε θερμότητα στους αντιστάτες (φαινόμενο Joule), χάνεται στο περιβάλλον και δεν είναι δυνατόν να δώσει στην έξοδο τάση μεγαλύτερη από την τάση της πηγής.

Μετά την πρόοδο που συντελέστηκε στα Ηλεκτρονικά Ισχύος χρησιμοποιήθηκε κάτι καινούριο. Οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς συνεχούς σε συνεχές χρησιμοποιούνται σήμερα σχεδόν σε όλες τις εφαρμογές που απαιτούν μια τέτοια μετατροπή κυρίως λόγω της αποδοτικότητάς τους και της ευκολίας με την οποία ελέγχονται, ώστε στην έξοδό τους να έχει κανείς το επιθυμητό επίπεδο συνεχούς τάσης. Η λειτουργία τους στηρίζεται στην εξής αρχή: Ένας ημιαγωγικός διακόπτης κατάλληλος για την εφαρμογή (ανάλογα με την ισχύ και τη συχνότητα) ανοίγει και κλείνει με μεγάλη συχνότητα, τεμαχίζοντας μια συνεχή τάση της πηγής σε παλμούς πολύ μικρής χρονικής διάρκειας (η συχνότητα λειτουργίας του έχει εύρος από 100kHz έως και 5MHz) – διαμορφώνει δηλαδή το εύρος των παλμών (Pulse Width Modulation - PWM), για να ελέγξει τη μέση τιμή της συνεχούς τάσης που θα προκύψει. Οι παλμοί αυτοί εφαρμόζονται σε ένα επαγωγικό στοιχείο (πηνίο), το οποίο λόγω της μεταβολής της τάσης στα άκρα του και σύμφωνα με τους νόμους του Faraday και του Lenz διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα και αναπτύσσει μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του. Για όσο χρόνο ο διακόπτης είναι κλειστός, η τάση της πηγής εφαρμόζεται στο πηνίο, το οποίο λόγω του παραπάνω φαινομένου αποθηκεύει μαγνητική ενέργεια και αυξάνεται το ρεύμα που τροφοδοτεί το φορτίο. Όταν ο διακόπτης ανοίξει, η τάση πηγής δεν εφαρμόζεται πια στα άκρα του πηνίου και η μαγνητική ενέργεια του πηνίου με τον αντίστροφο μηχανισμό μετατρέπεται σε ηλεκτρική (τάση), ενώ το ρεύμα του μειώνεται. Στη φάση αυτή το φορτίο τροφοδοτείται μέσω κατάλληλου αγώγιμου δρόμου (λ.χ. μιας διόδου ελεύθερης διέλευσης) από την αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια του πηνίου που μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Με τον τρόπο αυτό ελέγχοντας τον χρόνο αγωγής του ημιαγωγικού διακόπτη, ελέγχεται άμεσα η μέση τιμή της τάσης εξόδου του μετατροπέα, ακόμα και αν το ρεύμα που απαιτεί το φορτίο μας μεταβάλλεται. Διακρίνονται δύο τρόποι λειτουργίας των μετατροπέων αυτών: η συνεχής και η διακοπτόμενη λειτουργία, ανάλογα αν η μαγνητική ενέργεια που αποθηκεύεται στο πηνίο επαρκεί για την τροφοδοσία του φορτίου καθ' όλη τη διάρκεια που ο ημιαγωγικός διακόπτης παραμένει ανοικτός ή όχι. Για δεδομένη διακοπτική συχνότητα μπορεί κανείς να περάσει από τον ένα τρόπο λειτουργίας στον άλλο, αλλάζοντας κατάλληλα την τιμή της επαγωγής του πηνίου. Συνήθως επιλέγεται η συνεχής λειτουργία λόγω των καλύτερων χαρακτηριστικών που παρουσιάζει (μειωμένη αρμονική παραμόρφωση τάσης εξόδου κλπ.).

Σήμερα οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς συνεχούς σε συνεχές αποτελούν την πιο αποδοτική επιλογή (απόδοση συχνά από 80% έως και 95%) για μετατροπή από συνεχές σε συνεχές. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ευρύτατα. Τα πλεονεκτήματα των μετατροπέων αυτών είναι: η απλότητα, η υψηλή αξιοπιστία, η λειτουργία από σταθερή συχνότητα, ο σχετικά απλός έλεγχος, η διαθεσιμότητα στο εμπόριο ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ελέγχου και η ικανότητα επίτευξης μεγάλων λόγων μετατροπής, τόσο για τους μετατροπείς ανύψωσης, όσο και υποβιβασμού τάσης. Τα μειονεκτήματα που συνεπάγεται η χρήση τους, είναι ότι η τετραγωνική μορφή της τάσης και η μορφή του ρεύματος προκαλούν απώλειες έναυσης και σβέσης στα ημιαγωγικά στοιχεία, που περιορίζουν την πρακτική συχνότητα λειτουργίας τους

σε μερικές εκατοντάδες kHz. Επίσης η μορφή αυτή του ρεύματος προκαλεί ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές σε άλλες συσκευές (Electromagnetic Interference - EMI) κυρίως λόγω των υψίσυχνων αρμονικών συνιστωσών που εισάγονται εξαιτίας της υψηλής διακοπτικής συχνότητας. Για το λόγο αυτό οι υψίσυχνες αυτές αρμονικές είναι αναγκαίο συχνά να φιλτράρονται με χρήση ενεργών ή παθητικών φίλτρων.

Πολλές διαφορετικές τοπολογίες ελεγχόμενων μετατροπέων συνεχούς σε συνεχές έχουν προταθεί, οι κυριότερες από τις οποίες είναι:

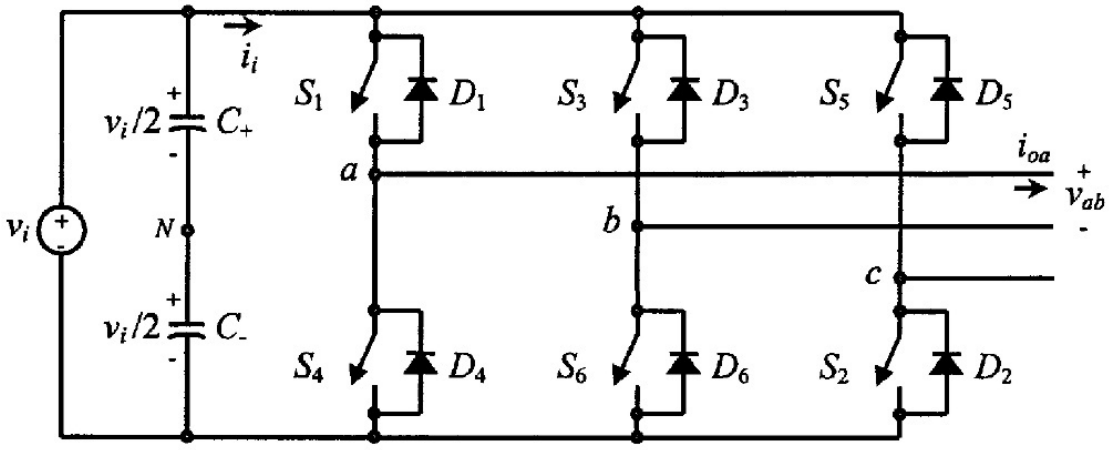
- DC Chopper (Τεμαχιστής).
- Μετατροπέας Υποβιβασμού (Step-down DC to DC Converter ή Buck Converter).
- Μετατροπέας Ανύψωσης (Step-up DC to DC Converter ή Boost Converter).
- Μετατροπέας Υποβιβασμού-Ανύψωσης (Buck-Boost Converter).
- Μετατροπέας Αντιστροφής (Inverting Converter).
- Μετατροπέας Forward.
- Μετατροπέας Flyback.
- Μετατροπέας Push-Pull.
- Μετατροπέας ημίσεως γέφυρας (Half Bridge Converter).
- Μετατροπέας πλήρους γέφυρας (Full Bridge Converter).
- Μετατροπέας Ćuk.
- Μετατροπέας SEPIC.

Περισσότερες πληροφορίες πάνω στους μετατροπείς συνεχούς σε συνεχές αναφέρονται: [3.1]- [3.6]

3.2.2.2 Αντιστροφέας

Ο αντιστροφέας ισχύος είναι μια ηλεκτρονική διάταξη ισχύος που επιτρέπει τη μετατροπή της συνεχούς τάσης ή του συνεχούς ρεύματος εισόδου σε εναλλασσόμενη τάση και ρεύμα αντιστοίχως, με το επιθυμητό πλάτος και την επιθυμητή συχνότητα. Επομένως διακρίνονται οι αντιστροφείς, σε αντιστροφείς τροφοδοτούμενους από πηγή τάσης (Votage-Fed Inverters) και σε αντιστροφείς τροφοδοτούμενους από πηγή ρεύματος (Current-Fed Inverters). Τα ημιαγωγικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην πρώτη κατηγορία αντιστροφέων (Voltage-Fed Inverters) παραμένουν πάντοτε ορθά πολωμένα, λόγω της τάσης της πηγής συνεχούς και μπορεί να είναι Gate Turn-off Thyristors (GTOs), Bipolar Junction Transistors (BJTs), Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs), Power Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (Power MOSFETs) ή και Integrated Gate Commutated Thyristors (IGCTs), ενώ πάντα συνδέονται από μια δίοδο ελεύθερης διέλευσης που συνδέεται αντιπαράλληλα με αυτά, για να επιτρέπει ελεύθερα την ενδεχόμενη ροή ρεύματος προς την πηγή. Στη δεύτερη κατηγορία αντιστροφέων (Current-Fed Inverters) τα ημιαγωγικά στοιχεία πρέπει να αντέχουν σε ανάστροφη πόλωση και για αυτό και μόνο GTOs και Thyristors μπορούν να χρησιμοποιηθούν (υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν και τα παραπάνω στοιχεία που απαιτούν ορθή πόλωση, όμως θα πρέπει να συνδεθούν κατάλληλα σε σειρά με αυτά, δίοδοι ελεύθερης διέλευσης). Παρατηρείται λοιπόν ότι οι αντιστροφείς που τροφοδοτούνται από πηγή ρεύματος αποτελούν το δυϊκό ανάλογο των αντιστροφέων που τροφοδοτούνται από πηγή τάσης. Επειδή στην πράξη χρησιμοποιούνται κατά κόρον οι αντιστροφείς πηγής τάσης και παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον, στη συνέχεια θα αναλυθεί η λειτουργία των αντιστροφέων πηγής τάσης, ενώ το δυϊκό ανάλογο θα ισχύει για τους αντιστροφείς πηγής ρεύματος. Οι τοπολογίες αντιστροφέων πηγής τάσης που έχουν προταθεί είναι πολλές και διαφορετικές και σε κάθε εφαρμογή θα πρέπει να επιλέγεται η κατάλληλη. Η απλούστερη και τυπική τοπολογία αντιστροφέα που αφορά τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης, είναι ο διβάθμιος τριφασικός αντιστροφέας σε συνδεσμολογία γέφυρας που παράγει έξι επίπεδα (πέντε διακριτά) τάσης εξόδου. Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται η συνδεσμολογία ενός τέτοιου αντιστροφέα. Με S_i, i=1,2,…,6 συμβολίζονται οι ημιαγωγικοί διακόπτες, ενώ αντιπαράλληλα

με αυτούς φαίνονται αντίστοιχες δίοδοι ελεύθερης διέλευσης. Παρατηρείται ότι στην είσοδο παράλληλα με την πηγή συνεχούς τάσης υπάρχει ένας χωρητικός καταμεριστής τάσης που αποτελείται από δύο όμοιους πυκνωτές. Στα άκρα του κάθε πυκνωτή υπάρχει τάση ίση με το μισό της τάσης πηγής. Σκοπός του καταμεριστή είναι να δημιουργηθεί ένας κόμβος αναφοράς ανάμεσα στους δύο πυκνωτές (συμβολίζεται με N). Στην έξοδο του αντιστροφέα λαμβάνεται τριφασική εναλλασσόμενη τάση, η μορφή της οποίας εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο χειρίζεται κανείς (ανοίγει και κλείνει) τους ημιαγωγικούς διακόπτες. Ο χειρισμός των ημιαγωγικών διακοπτών γίνεται μέσω κατάλληλης παλμοδότησης στην πύλη τους (για τους περισσότερους τύπους των χρησιμοποιούμενων διακοπτών όπως λ.χ. IGBTs). Ο αντιστροφέας του Σχήματος 3.2 διαθέτει οκτώ διαφορετικούς επιτρεπτούς συνδυασμούς έναυσης των διακοπτικών στοιχείων του (πρέπει να έχουμε υπόψη μας κατά τη μέτρηση των επιτρεπτών συνδυασμών ότι δεν είναι δυνατόν να είναι κλειστοί ταυτοχρόνως οι διακόπτες ενός κλάδου της γέφυρας (π.χ. ο S_1 και ο S_4) καθώς τότε θα έχουμε βραχυκύκλωμα στα άκρα της πηγής συνεχούς τάσης). Η αρχή λειτουργίας του αντιστροφέα στηρίζεται στην ιδέα ότι επιλέγεται κάθε φορά και για κατάλληλο χρόνο εκείνο το διάνυσμα τάσης (μέσω του χειρισμού των κατάλληλων διακοπτών) που θα επιτρέψει στην τάση εξόδου του αντιστροφέα να προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο την επιθυμητή. Ο χειρισμός αυτός των διακοπτών για την επιλογή του κατάλληλου διανύσματος τάσης γίνεται με κατάλληλο αλγόριθμο ελέγχου.
[3.1] - [3.5]



Σχήμα 3.2 : Τυπική τοπολογία διβάθμιου τριφασικού αντιστροφέα σε τοπολογία γέφυρας

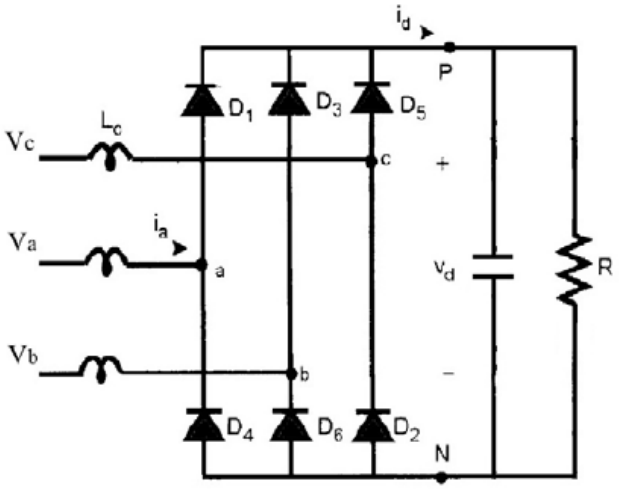
3.2.2.3 Ανορθωτής

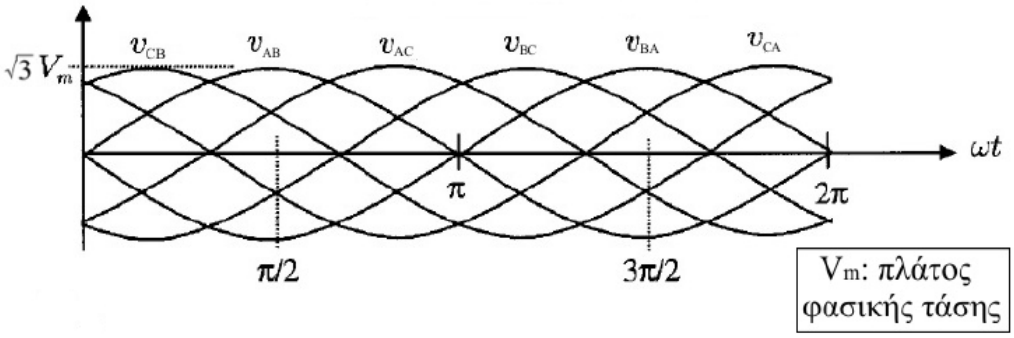
Ο ανορθωτής είναι μια ηλεκτρονική διάταξη ισχύος που επιτρέπει τη μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης ή του εναλλασσόμενου ρεύματος εισόδου σε συνεχή τάση και ρεύμα αντιστοίχως. Από την αντιπαραβολή των ορισμών ανορθωτή και αντιστροφέα παρατηρείται, ότι ο ανορθωτής αποτελεί το δυϊκό ανάλογο του αντιστροφέα. Στην πραγματικότητα η ίδια διάταξη που δόθηκε παραπάνω ως αντιστροφέας, μπορεί να λειτουργήσει και αντίστροφα ως ανορθωτής.

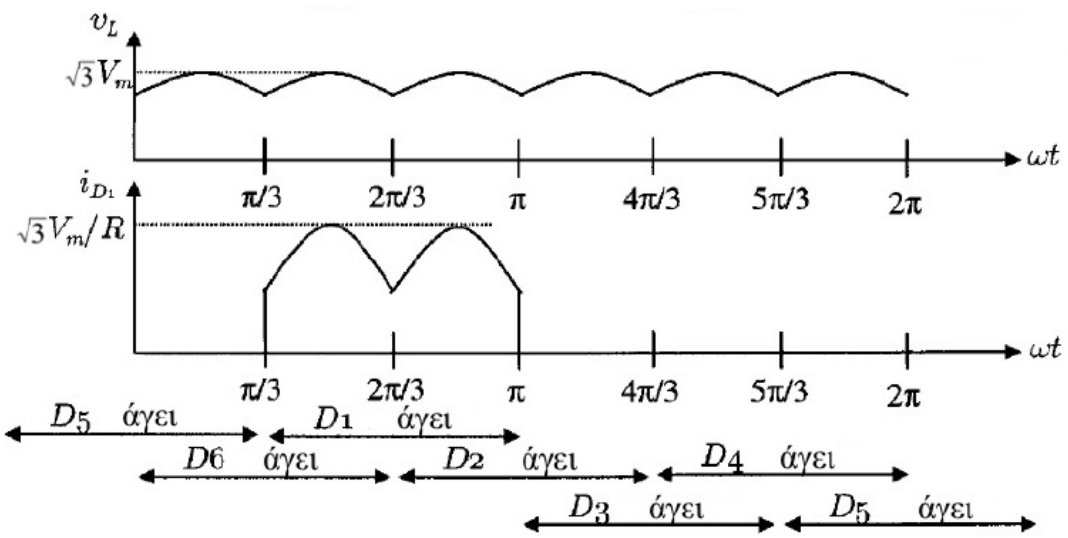
Ο ανορθωτής μπορεί να είναι ελεγχόμενος ή μη. Αυτό σημαίνει, ότι το πλάτος της συνεχούς τάσης εξόδου, μπορεί να μην ελέγχεται και να παραμένει σταθερό (για σταθερού πλάτους εναλλασσόμενη τάση εισόδου) ή να ελέγχεται και να μεταβάλλεται ανάλογα με τις απαιτήσεις οδήγησης ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Ένας μη ελεγχόμενος ανορθωτής χρησιμοποιείται συνήθως για να επιτρέψει απλά την τροφοδοσία ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος από μια πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, ενώ ένας ελεγχόμενος ανορθωτής χρησιμοποιείται όταν είναι αναγκαίος και ο έλεγχος του κινητήρα συνεχούς που τροφοδοτεί.

Υπάρχει και η τελευταία περίπτωση όπου ο ανορθωτής (ελεγχόμενος ή όχι) χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει έναν ελεγχόμενο αντιστροφέα, όταν υπάρχει εναλλασσόμενη τροφοδοσία και ένας κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος, ο οποίος ελέγχεται με τον αντιστροφέα.

Ο τριφασικός μη ελεγχόμενος ανορθωτής σε συνδεσμολογία γέφυρας που φαίνεται στο Σχήμα 3.3, είναι μια τυπική περίπτωση μη ελεγχόμενου ανορθωτή. Τα ημιαγωγικά στοιχεία που χρησιμοποιεί είναι έξι δίοδοι σε συνδεσμολογία γέφυρας. Η αρχή λειτουργίας του στηρίζεται στο ότι η τριφασική εναλλασσόμενη τάση εισόδου πολώνει ορθά διαδοχικά ζεύγη διόδων που δεν βρίσκονται στον ίδιο κλάδο, τα οποία άγουν αυθόρμητα (χωρίς έλεγχο) μεταφέροντας την τάση στην έξοδο. Από μια ανάλυση του κυκλώματος σε διάστημα μιας περιόδου παρατηρείται, ότι τελικά η τάση εξόδου είναι πάντα θετική και η μορφή της εξαπαλμική, αφού αποτελεί κομμάτια (από τη λειτουργία των διόδων) της εναλλασσόμενης τάσης εισόδου. Αυτό μπορεί κανείς να το παρατηρήσει και από τις κυματομορφές λειτουργίας στο Σχήμα 3.3. Επειδή η τάση εξόδου δεν είναι σταθερή, αλλά έχει έξι παλμούς, συνήθως συνδέεται ένας πυκνωτής εξομάλυνσης κατάλληλης χωρητικότητας παράλληλα με το φορτίο, ο οποίος εξομαλύνει (σταθεροποιεί) την τάση εξόδου. Επειδή οι δίοδοι είναι αυτοελεγχόμενες (άγουν αυθόρμητα μόλις πολωθούν ορθά), δεν υπάρχει κανένας έλεγχος ούτε της τάσης εξόδου ούτε του ρεύματος εισόδου.







Σχήμα 3.3: Τοπολογία μη ελεγχόμενου ανορθωτή σε συνδεσμολογία γέφυρας με ωμικό φορτίο και οι σχετικές κυματομορφές λειτουργίας του (με τη σειρά από πάνω προς τα κάτω: τάση εισόδου, τάση εξόδου και ρεύμα μέσω της διόδου D_1)

3.2.3. Ηλεκτρική Μηχανή

Ως ηλεκτρική μηχανή ορίζεται κάθε συσκευή που πραγματοποιεί ηλεκτρομαγνητική μετατροπή, δηλαδή μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική και αντιστρόφως. Η ηλεκτρική μηχανή είναι η καρδιά ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης. Οι μετατροπείς και ο έλεγχος που εφαρμόζεται σε αυτούς έχουν ένα και μοναδικό σκοπό: Την επίτευξη της επιθυμητής λειτουργίας της ηλεκτρικής μηχανής, έτσι ώστε να λάβουμε το ζητούμενο αποτέλεσμα στο φορτίο.

Ανάλογα με το είδος του φορτίου, την πηγή ισχύος, την ύπαρξη ή μη μετατροπέα και διάφορα άλλα οικονομοτεχνικά κριτήρια που άπτονται της εκάστοτε εφαρμογής, επιλέγεται το είδος του κινητήρα που θα χρησιμοποιηθεί στο συγκεκριμένο σύστημα ηλεκτρικής κίνησης. Οι κινητήρες που απαντώνται στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης διακρίνονται ανάλογα με την τροφοδοσία τους σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τους Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος και τους Κινητήρες Εναλλασσόμενου Ρεύματος. Η κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες περικλείει όμως πολλές υποκατηγορίες με σημαντικές διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά και στη λειτουργία τους.

3.2.3.1. Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος

Οι ηλεκτρικές μηχανές συνεχούς ρεύματος ιστορικά προηγούνται των μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος. Η δυνατότητα που παρέχουν για εύκολο έλεγχο ταχύτητας και ροπής τις είχε καταστήσει για δεκαετίες τη μοναδική επιλογή για συστήματα ηλεκτρικής κίνησης, που απαιτούσαν μεταβλητή ταχύτητα λειτουργίας. Η ευκολία του ελέγχου έγκειται στο ότι γενικά σε μια μηχανή συνεχούς ρεύματος η ταχύτητα περιστροφής είναι ανάλογη της εφαρμοζόμενης τάσης στο τύμπανο και η αναπτυσσόμενη ροπή είναι ανάλογη του ρεύματος τυμπάνου (αυτό ισχύει επακριβώς μόνο για τους κινητήρες συνεχούς ξένης διέγερσης). Άρα, όπως είναι φανερό, είναι αρκετά απλός ο έλεγχος ενός τέτοιου κινητήρα (π.χ. μέσω ενός μετατροπέα συνεχούς σε συνεχές – DC to DC Converter). Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος έχουν χρησιμοποιηθεί για πάρα πολλά χρόνια σε συστήματα ηλεκτρικής κίνησης και θεωρούνταν αναντικατάστατοι σε εφαρμογές μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής. Μόνο τα

τελευταία είκοσι χρόνια δόθηκε η δυνατότητα αντικατάστασης τους από τους ασύγχρονους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (κινητήρες επαγωγής), που οδηγούνται με προηγμένες τεχνικές ελέγχου.

Η λειτουργία του κλασσικού ηλεκτρικού κινητήρα συνεχούς ρεύματος βασίζεται στην αλληλεπίδραση δύο μαγνητικών πεδίων. Το πρώτο πεδίο δημιουργείται από μόνιμους μαγνήτες (διέγερση) που βρίσκονται συνήθως σταθερά προσαρμοσμένοι στον στάτη της μηχανής. Το δεύτερο πεδίο δημιουργείται στο δρομέα της μηχανής από το περιστρεφόμενο τύλιγμα τυμπάνου, που συνιστά έναν ηλεκτρομαγνήτη. Βασικό ρόλο στη λειτουργία της μηχανής συνεχούς ρεύματος παίζει ο συλλέκτης. Ο ρόλος του συλλέκτη είναι να αντιστρέφει τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος τυμπάνου δύο φορές σε κάθε κύκλο, έτσι ώστε να αντιστρέφεται η πολικότητα του ηλεκτρομαγνήτη τυμπάνου την κατάλληλη χρονική στιγμή (όταν οι δύο αντίθετοι μαγνητικοί πόλοι βρίσκονται απέναντι) και τελικά να αλληλεπιδρούν μαγνητικά τα δύο πεδία. Αυτό είναι αναγκαίο, αφού το τύλιγμα τυμπάνου είναι περιστρεφόμενο και χωρίς το συλλέκτη η μηχανή θα σταματούσε άμεσα την πρώτη φορά που δύο αντίθετοι πόλοι θα βρίσκονταν απέναντι.

Υπάρχει επίσης η δυνατότητα η μηχανή συνεχούς ρεύματος να μη διαθέτει μόνιμους μαγνήτες στο στάτη αλλά τύλιγμα ηλεκτρομαγνήτη (ως διέγερση), που αποτελεί και τη συνηθέστερη πρακτική. Η μηχανή αυτή ονομάζεται μηχανή συνεχούς ρεύματος με τύλιγμα του πεδίου. Έτσι μεταβάλλοντας το ρεύμα που διέρχεται από τον ηλεκτρομαγνήτη (που ονομάζεται εναλλακτικά τύλιγμα πεδίου ή τύλιγμα διεγέρσεως), μπορεί να μεταβάλλεται η χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής του κινητήρα. Υπάρχουν οι εξής κατηγορίες μηχανών συνεχούς ρεύματος με τύλιγμα πεδίου ανάλογα με τον τρόπο τροφοδοσίας του τυλίγματος διέγερσης:

• ***Ξένης Διέγερσης:*** Το τύλιγμα πεδίου τροφοδοτείται από ανεξάρτητη πηγή τάσης/ρεύματος δίνοντας τη δυνατότητα για πολύ εύκολο έλεγχο του πεδίου διέγερσης.
• ***Διέγερσης σε Σειρά:*** Το τύλιγμα πεδίου τροφοδοτείται σε σειρά με το τύλιγμα τυμπάνου δίνοντας τη δυνατότητα για κατασκευή κινητήρων υψηλής ροπής σε μικρές ταχύτητες.
• ***Παράλληλης Διέγερσης:*** Το τύλιγμα πεδίου τροφοδοτείται παράλληλα με το τύλιγμα τυμπάνου δίνοντας τη δυνατότητα για κατασκευή κινητήρων υψηλών ταχυτήτων.
• ***Σύνθετης Διέγερσης:*** Το τύλιγμα πεδίου τροφοδοτείται εν μέρει σε σειρά και εν μέρει παράλληλα με το τύλιγμα τυμπάνου δίνοντας τη δυνατότητα για κατασκευή κινητήρων περίπου σταθερής ταχύτητας, παρά τις μεταβολές της ροπής .

Τέλος υπάρχει η δυνατότητα να μειώσει κανείς το ρεύμα του τυλίγματος πεδίου, άρα και την ένταση του μαγνητικού πεδίου που αυτό προκαλεί, έτσι ώστε να περάσει σε λειτουργία «εξασθένησης πεδίου». Η κατάσταση αυτή επιτρέπει την επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων από την ονομαστική με ανάλογη μείωση της ικανότητας ανάπτυξης ροπής. Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος παρουσιάζουν και αρκετά σημαντικά μειονεκτήματα, όπως η ανάγκη τακτικής συντήρησης του συλλέκτη, σχετικά μεγάλο βάρος του δρομέα, σχετικά χαμηλή μέγιστη ταχύτητα λόγω μηχανικής καταπόνησης του συλλέκτη και υψηλό κόστος κατασκευής. Γι' αυτούς τους λόγους είναι επιθυμητή η αντικατάστασή τους, όπου αυτό είναι φυσικά δυνατόν, με τους πιο αξιόπιστους και εύρωστους ασύγχρονους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος.

3.2.3.2. Κινητήρες Εναλλασσομένου Ρεύματος

Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες στην πράξη, καλύπτοντας ένα ευρύτατο φάσμα εφαρμογών. Υπάρχουν πολλά είδη μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος με διαφορετικά χαρακτηριστικά και τρόπους λειτουργίας. Διακρίνονται σε μονοφασικές, διφασικές, τριφασικές και πολυφασικές, ανάλογα με τον αριθμό των εναλλασσόμενων ημιτονοειδών τάσεων τροφοδοσίας. Επίσης διακρίνονται σε σύγχρονες και ασύγχρονες, αναλόγως με την ταχύτητα περιστροφής τους κατά την κανονική λειτουργία. Στην πλειοψηφία των πρακτικών εφαρμογών μεγάλης ισχύος χρησιμοποιούνται

τριφασικές μηχανές που δέχονται συμμετρική τριφασική ημιτονοειδή τροφοδοσία. Όπως είναι ευνόητο η διαφορά φάσεως των τάσεων τροφοδοσίας στην περίπτωση αυτή είναι 120º μοίρες.

• ***Σύγχρονες Μηχανές:*** Οι σύγχρονες μηχανές όπως φανερώνει και το όνομά τους περιστρέφονται με τη σύγχρονη ταχύτητα στην ονομαστική τους λειτουργία. Η λειτουργία τους στηρίζεται στην αλληλεπίδραση δύο πεδίων: του πεδίου διεγέρσεως και του πεδίου τυμπάνου. Το πεδίο τυμπάνου δημιουργείται συνήθως από τριφασικά σταθερά τυλίγματα που βρίσκονται στο στάτη και δημιουργούν ένα ομοιόμορφα στρεφόμενο και ημιτονοειδώς κατανεμημένο στο στάτη μαγνητικό πεδίο. Το πεδίο διεγέρσεως βρίσκεται συνήθως στο δρομέα, χωρίς όμως αυτό να είναι απαραίτητο. Συνήθως είναι ένας ηλεκτρομαγνήτης (τύλιγμα διεγέρσεως ή τύλιγμα πεδίου), ο οποίος τροφοδοτείται με συνεχή τάση μέσω ψηκτρών. Με τη μεγάλη έρευνα και τις τελευταίες προόδους που έχουν συντελεστεί στην τεχνολογία των υλικών, έχουν προκύψει μόνιμοι μαγνήτες με μεγάλη παραμένουσα μαγνήτιση και υψηλή συνεχή δύναμη (μέχρι 1000kA/m), όπως π.χ. τα κράματα Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου που τοποθετούνται επιφανειακά στο δρομέα. Τα υλικά αυτά έδωσαν τη δυνατότητα αντικατάστασης του ηλεκτρομαγνήτη που συνήθως απαιτούσε τροφοδοσία με ψήκτρες από κάποιο μόνιμο μαγνήτη, ο οποίος δεν έχει ανάγκη ηλεκτρικής τροφοδοσίας. Οι κινητήρες αυτοί ονομάζονται σύγχρονοι κινητήρες μόνιμων μαγνητών και έχουν συγκεντρώσει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον, ενώ ήδη χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές με πολύ καλά αποτελέσματα. Είναι πιο απλοί και αξιόπιστοι και εμφανίζουν μικρότερες απώλειες (άρα και καλύτερη απόδοση), από τους αντίστοιχους σύγχρονους κινητήρες τυλιγμένου δρομέα. Ένα άλλο είδος σύγχρονων κινητήρων που παρουσιάζει ενδιαφέρον για ειδικές εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης, είναι οι σύγχρονοι κινητήρες μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Στο στάτη τους υπάρχουν και πάλι τα τριφασικά τυλίγματα των σύγχρονων κινητήρων που περιγράφηκαν παραπάνω. Ο δρομέας τους όμως που αποτελείται είτε από μόνιμους μαγνήτες είτε από ηλεκτρομαγνήτες, κατασκευάζεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να παρουσιάζει μικρό διάκενο κατά τον ευθύ άξονα (d) και μεγάλο κατά τον εγκάρσιο άξονα (q) (δηλαδή μικρή και μεγάλη μαγνητική αντίσταση αντίστοιχα). Η ύπαρξη του μεταβλητού διακένου και συνακόλουθα της μεταβλητής μαγνητικής επαγωγής οδηγεί στην ανάπτυξη δυνάμεων, που στρέφουν το δρομέα προς τη θέση ελάχιστης μαγνητικής ενέργειας. Αυτή είναι η αρχή λειτουργίας των κινητήρων αυτών.

• Α***σύγχρονες Μηχανές:*** Οι ασύγχρονες μηχανές ή μηχανές επαγωγής, όπως φανερώνει και το όνομά τους, στρέφονται γενικά με ταχύτητα διαφορετική από τη σύγχρονη στην ονομαστική τους λειτουργία. Ο στάτης των μηχανών αυτών είναι ίδιος με τον στάτη των σύγχρονων μηχανών και διαθέτει τριφασικά σταθερά τυλίγματα που δημιουργούν ένα μαγνητικό πεδίο στο στάτη, ομοιόμορφα στρεφόμενο και ημιτονοειδώς κατανεμημένο. Το πεδίο αυτό στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα.

Για τη διαμόρφωση του δρομέα των ασύγχρονων μηχανών υπάρχουν δύο δυνατότητες. Είτε ο τυλιγμένος δρομέας, ο οποίος διαθέτει τριφασικό τύλιγμα όμοιο με του στάτη και δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης με κάποιο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα μέσω ψηκτρών είτε ο δρομέας τύπου κλωβού που είναι και η συνηθέστερη επιλογή. Ο δρομέας τύπου κλωβού αποτελείται από έναν κλωβό από αγώγιμο υλικό, ο οποίος συνίσταται από διαμήκεις ράβδους, που ενώνονται με δύο μεταλλικούς δακτυλίους στα άκρα τους. Δεν απαιτεί καμία εξωτερική τροφοδοσία, ενώ στις ράβδους του αναπτύσσονται ρεύματα εξ επαγωγής με πολύ μικρή συχνότητα (εξ' ου και η ονομασία κινητήρας επαγωγής). Και τα δύο παραπάνω είδη κινητήρων, όπως αναφέραμε εμφανίζουν γενικά ασύγχρονη λειτουργία. Αν παρατηρήσουμε το δρομέα μιας ασύγχρονης μηχανής, σε σχέση με το σύγχρονα στρεφόμενο πεδίο, θα δούμε ότι ο δρομέας ολισθαίνει ελαφρώς ως προς αυτό, λόγω της διαφοράς στην ταχύτητα περιστροφής.

Οι ασύγχρονοι κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος ή κινητήρες επαγωγής παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως υψηλή αξιοπιστία και απόδοση, μεγάλη διάρκεια ζωής χωρίς ιδιαίτερες ανάγκες συντήρησης και μικρό βάρος και όγκο. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά σε συνδυασμό με τους μοντέρνους αντιστροφείς και τις προηγμένες τεχνικές

ελέγχου τους καθιστούν την ιδανική επιλογή για τα περισσότερα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης. Ήδη υπάρχει η τάση αντικατάστασης των κινητήρων συνεχούς ρεύματος σε βιομηχανικό επίπεδο από τους πιο οικονομικούς και αξιόπιστους κινητήρες επαγωγής ενώ το ενδιαφέρον και για νέες εφαρμογές είναι αυξημένο.

3.2.4. Φορτίο

Φορτίο σε ένα σύστημα ηλεκτρικής κίνησης ονομάζεται το μηχανικό συνήθως σύστημα, που είναι συνδεδεμένο στον άξονα της ηλεκτρικής μηχανής και ανταλλάσσει με αυτήν μηχανική ενέργεια (είτε λαμβάνει, οπότε έχουμε λειτουργία κινητήρα είτε προσφέρει, οπότε έχουμε λειτουργία γεννήτριας). Το φορτίο είναι το πρωταρχικό στοιχείο ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης και ο όλος σχεδιασμός του συστήματος γίνεται πάνω σε αυτό. Έτσι σκοπός κάθε συστήματος ηλεκτρικής κίνησης είναι να δώσει την κατάλληλη ενέργεια και με τον κατάλληλο τρόπο στο φορτίο του, ώστε αυτό να αποκτήσει την επιθυμητή συμπεριφορά.

Συνεπώς ο σχεδιασμός ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης ξεκινάει με την εξέταση του φορτίου που διαθέτει κανείς. Για το λόγο αυτό πριν προχωρήσει κανείς σε οποιοδήποτε άλλο βήμα στο σχεδιασμό θα πρέπει απαραιτήτως να γνωρίζει τις χαρακτηριστικές ροπής–ταχύτητας και ισχύος–ταχύτητας του φορτίου.

Με τη διαδικασία αυτή αποφεύγονται δυσάρεστα φαινόμενα, όπως υπερφόρτιση του κινητήρα, αστάθεια του συστήματος, αργή απόκριση, υπερθέρμανση και υπερβολική κατανάλωση ενέργειας που μπορεί να προκληθούν από λανθασμένη εκτίμηση του τύπου φορτίου.

3.2.5. Σύστημα Παρακολούθησης και Ελέγχου

Το σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου έχει ως κύριο ρόλο την παρακολούθηση της λειτουργίας όλου του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης και την ανάληψη εκείνων των δράσεων ελέγχου, που θα δώσουν στην έξοδο την επιθυμητή απόκριση.

Το σύστημα παρακολούθησης όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1 λαμβάνει κάποια δεδομένα από τον κινητήρα. Τα δεδομένα αυτά μπορεί να προέρχονται από αισθητήρες και μετρητικές διατάξεις. Σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον όμως, όπου τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης λειτουργούν υπό αντίξοες συνθήκες (σκόνη, υγρασία κλπ.), η λειτουργία των αισθητήρων επηρεάζεται αρνητικά. Επίσης η ανάγκη για ύπαρξη αισθητήρων αυξάνει σημαντικά, τόσο το κόστος προμήθειας και συντήρησης, όσο και την πολυπλοκότητα της εγκατάστασης, μειώνοντας έτσι την αξιοπιστία της. Για το λόγο αυτό στα σύγχρονα συστήματα ελέγχου για συστήματα ηλεκτρικής κίνησης υπάρχει συνήθως μια διάταξη που καλείται παρατηρητής (observer) ή εκτιμητής (estimator) και σκοπός του είναι να υποκαταστήσει τους περισσότερους αισθητήρες. Η λειτουργία συνίσταται στη μαθηματική εκτίμηση των κρίσιμων μεγεθών του κινητήρα με χρήση των εξισώσεων που περιγράφουν τη λειτουργία του και ως μοναδικές εισόδους τις τάσεις τροφοδοσίας και τα ρεύματα γραμμής ή τα ρεύματα γραμμής και την ταχύτητα του δρομέα. Ένα τέτοιο σύστημα ελέγχου παρατηρητή - εκτιμητή ονομάζεται σύστημα χωρίς αισθητήρες ανάδρασης (sensorless). Ο παρατηρητής - εκτιμητής είναι ένα πολύ σημαντικό υποσύστημα του συστήματος ελέγχου, καθώς παρέχει στο σύστημα ελέγχου όλα εκείνα τα δεδομένα για την παρούσα κατάσταση του κινητήρα, όπως η ταχύτητα περιστροφής, μαγνητική ροή, αναπτυσσόμενη ροπή, ισχύς κ.α., που είναι απαραίτητα για τη σωστή εκτέλεση του αλγόριθμου ελέγχου.

Το σύστημα ελέγχου είναι το σύστημα εκείνο που ως είσοδο λαμβάνει την παρούσα και επιθυμητή κατάσταση της ηλεκτρικής μηχανής και βάσει ενός αλγορίθμου ελέγχου δίνει τις κατάλληλες εντολές στον μετατροπέα ισχύος, ώστε η μηχανή να μεταβεί στην επιθυμητή κατάσταση λειτουργίας. Οι εντολές αυτές για τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος είναι η κατάλληλη παλμοδότηση συγκεκριμένων κάθε φορά διακοπτικών στοιχείων, που προκύπτουν από τον αλγόριθμο ελέγχου, για τον έλεγχο της έναυσης ή της σβέσης τους. Η μονάδα ελέγχου απαιτεί μια μονάδα επεξεργασίας που ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί είτε να είναι ένας μικροεπεξεργαστής είτε ένας αναλογικός υπολογιστής είτε ένας ψηφιακός

επεξεργαστής σήματος (DSP) μαζί με τα απαραίτητα περιφερειακά του είτε ακόμη και ένας προσωπικός υπολογιστής (PC), εφοδιασμένος με κατάλληλη κάρτα εισόδου-εξόδου. Το σύστημα ελέγχου εφαρμόζει με τη βοήθεια της μονάδας επεξεργασίας που διαθέτει τον εκάστοτε επιλεγμένο αλγόριθμο ελέγχου. Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές και αλγόριθμοι ελέγχου.

3.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[3.1] Σ. Ν. Μανιάς, "Ηλεκτρονικά Ισχύος", Συμεών, 2000.

[3.2] Σ. Ν. Μανιάς, Αθ. Καλετσάνος, "Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά", Συμεών, 2001.

[3.3] Bimal K. Bose, "Modern Power Electronics and AC Drives", Prentice Hall PTR, 2002.

[3.4] Muhammad H. Rashid, "Power Electronics Handbook", Academic Press, 2001.

[3.5] Ned Mohan, "First Course on Power Electronics and Drives", Ned Mohan, 2003.

[3.6] Paul C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill, 1987.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τα διάφορα είδη ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος ο τριφασικός ασύγχρονος ή επαγωγικός κινητήρας (induction motor), χρησιμοποιείται ευρύτατα στις βιομηχανικές εφαρμογές. Ενδεικτικό της καθολικής χρήσης της μηχανής αυτής είναι, ότι οι επαγωγικοί κινητήρες απορροφούν το 60% περίπου της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η αρχή λειτουργίας των ασύγχρονων κινητήρων διατυπώθηκε από τον N. Tesla στα τέλη της δεκαετίας του 1880. Επαγωγικοί κινητήρες με μορφή αντίστοιχη της σημερινής, ήταν εμπορικά διαθέσιμοι από το 1896. Από τότε έως το 1970 οι βελτιώσεις στην ποιότητα των υλικών κατασκευής, στις τεχνικές χύτευσης και στη μόνωση των τυλιγμάτων, επέτρεψε τη δραστική μείωση του μεγέθους και του κόστους κατασκευής των επαγωγικών κινητήρων. Η μείωση στις διαστάσεις των επαγωγικών κινητήρων δεν είχε συνοδευτεί από ουσιαστική βελτίωση του βαθμού απόδοσης, έως την πετρελαϊκή κρίση του 1973, εξαιτίας του μικρού κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια όμως όλοι οι κατασκευαστές ανέπτυξαν επαγωγικούς κινητήρες με το χαρακτηρισμό υψηλής απόδοσης (high efficiency induction motors). Οι κινητήρες αυτοί, αν και έχουν μεγαλύτερο κόστος από τους τυπικούς επαγωγικούς κινητήρες, αποκτούν όλο και μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς.

Οι λόγοι που ο ασύγχρονος κινητήρας χρησιμοποιείται σε όλο και περισσότερες εφαρμογές, είναι οι ακόλουθοι :

- Χαμηλό κόστος κατασκευής
- Απλή και στιβαρή κατασκευή
- Υψηλή αξιοπιστία
- Μεγάλη διαθεσιμότητα λόγω μειωμένων απαιτήσεων συντήρησης
- Κατασκευάζεται από μερικά κλάσματα του HP ή KW μέχρι πολλές χιλιάδες HP ή KW.
- Παρουσιάζει αντίστοιχη δυνατότητα ελέγχου με τους άλλους τύπους κινητήρων, χρησιμοποιώντας τριφασικό αντιστροφέα.

4.2 ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Η ηλεκτρική γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Ως γεννήτριες χρησιμοποιούνται συνήθως οι τριφασικές επαγωγικές μηχανές με βραχυκυκλωμένο κλωβό ή με δακτυλιοφόρο δρομέα σε μεγαλύτερη ισχύ. Σε ορισμένες εφαρμογές προτιμώνται οι τριφασικές σύγχρονες γεννήτριες με dc διέγερση στο δρομέα ή με μονίμους μαγνήτες. Οι γεννήτριες διαθέτουν συνήθως τέσσερις πόλους ή έξι πόλους, όταν χρησιμοποιείται το σύστημα γραναζιών για τον πολλαπλασιασμό της ταχύτητας του δρομέα. Οι επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού, χρησιμοποιούνται κυρίως σε ανεμογεννήτριες με σταθερή ταχύτητα. Οι σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη και οι επαγωγικές δακτυλιοφόρου δρομέα προτιμώνται στις ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας. Οι επαγωγικές γεννήτριες παράγουν μόνο ενεργό ισχύ, ενώ απαιτούν άεργο ισχύ για την ανάπτυξη του μαγνητικού τους πεδίου. Οι επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού

σε σχέση με τις σύγχρονες γεννήτριες, έχουν σημαντικά μικρότερο κόστος, μικρότερο όγκο και βάρος, μεγαλύτερη αξιοπιστία και δεν απαιτούν συντήρηση.

4.3 ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

Εισαγωγή

Η επαγωγική γεννήτρια είναι ένας τύπος ηλεκτρικής γεννήτριας, η οποία μοιάζει μηχανικά και ηλεκτρικά με έναν πολυφασικό κινητήρα. Οι επαγωγικές γεννήτριες παράγουν ηλεκτρική ισχύ, όταν ο άξονας τους περιστρέφεται ταχύτερα από τη σύγχρονη συχνότητα του αντίστοιχου επαγωγικού κινητήρα. Επαγωγικές γεννήτριες χρησιμοποιούνται συχνά σε ανεμογεννήτριες και σε ορισμένες μικροϋδραυλικές εγκαταστάσεις, λόγω της ικανότητάς τους να παράγουν πραγματική ισχύ, σε διάφορες ταχύτητες του δρομέα. Η κατασκευή τους είναι μηχανικά και ηλεκτρικά απλούστερη από άλλους τύπους γεννητριών .

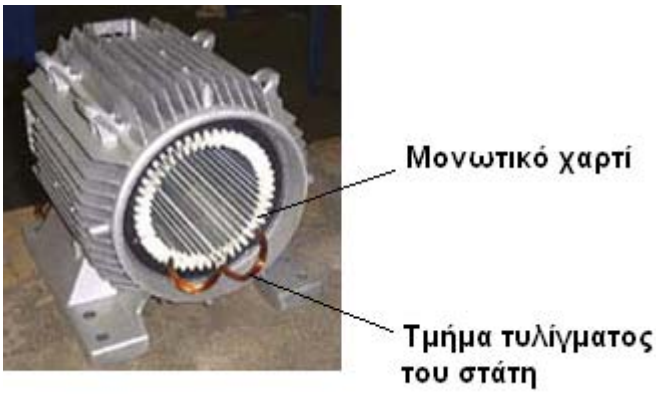
Οι γεννήτριες επαγωγής δεν αυτοδιεγείρονται, δηλαδή χρειάζονται μια εξωτερική πηγή, για να παράγουν το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο μπορεί να προέλθει είτε από το δίκτυο είτε από την ίδια τη γεννήτρια, όταν αρχίσει αυτή να παράγει ισχύ. Σε περίπτωση απομονωμένου συστήματος η αρχική διέγερση γίνεται από πυκνωτή. Η ειδοποιός διαφορά από τους άλλους κινητήρες, είναι το γεγονός, ότι για κινηθεί, δεν είναι απαραίτητο να τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα διέργεσης. Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη προκαλεί ρεύμα στο δρομέα, το οποίο επίσης προκαλεί ένα μαγνητικό πεδίο. **Αν ο δρομέας περιστρέφεται με μικρότερη ταχύτητα, από ότι η περιστροφή του μαγνητικού πεδίου, τότε η μηχανή συμπεριφέρεται ως επαγωγικός κινητήρας. Διαφορετικά αν ο δρομέας περιστρέφεται με μεγαλύτερη ταχύτητα, τότε συμπεριφέρεται ως γεννήτρια, παράγοντας ισχύ σε σύγχρονη συχνότητα.**

4.4 ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΤΗΡΩΝ

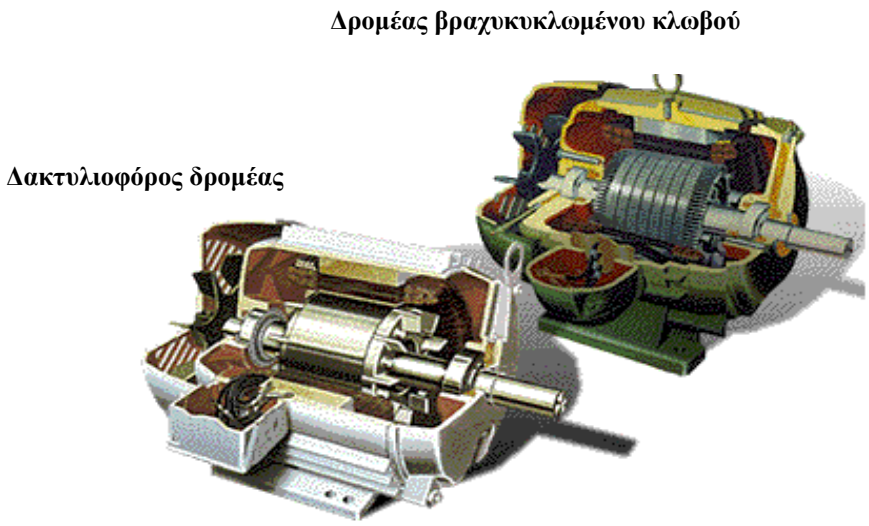
Η γεννήτρια επαγωγής αποτελείται από δύο κύρια συγκροτήματα:

- το στάτη και
- το δρομέα

Ένας επαγωγικός κινητήρας έχει τον ίδιο στάτη με μια σύγχρονη μηχανή, ενώ ο δρομέας του έχει διαφορετική δομή. Ένας τυπικός στάτης φαίνεται στο Σχήμα 4.1**.** Οι τύποι των δρομέων είναι: **ο δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού** (squirrel-cage rotor) και **ο δακτυλιοφόρος δρομέας** (wound rotor).

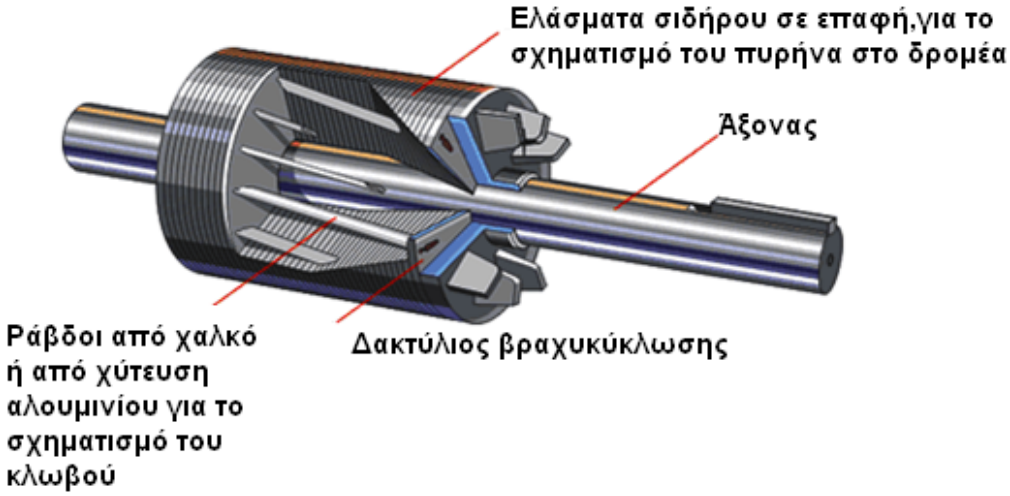


Σχήμα 4.1: Ο στάτης ενός τυπικού επαγωγικού κινητήρα, όπου φαίνονται τα τυλίγματα του στάτη.

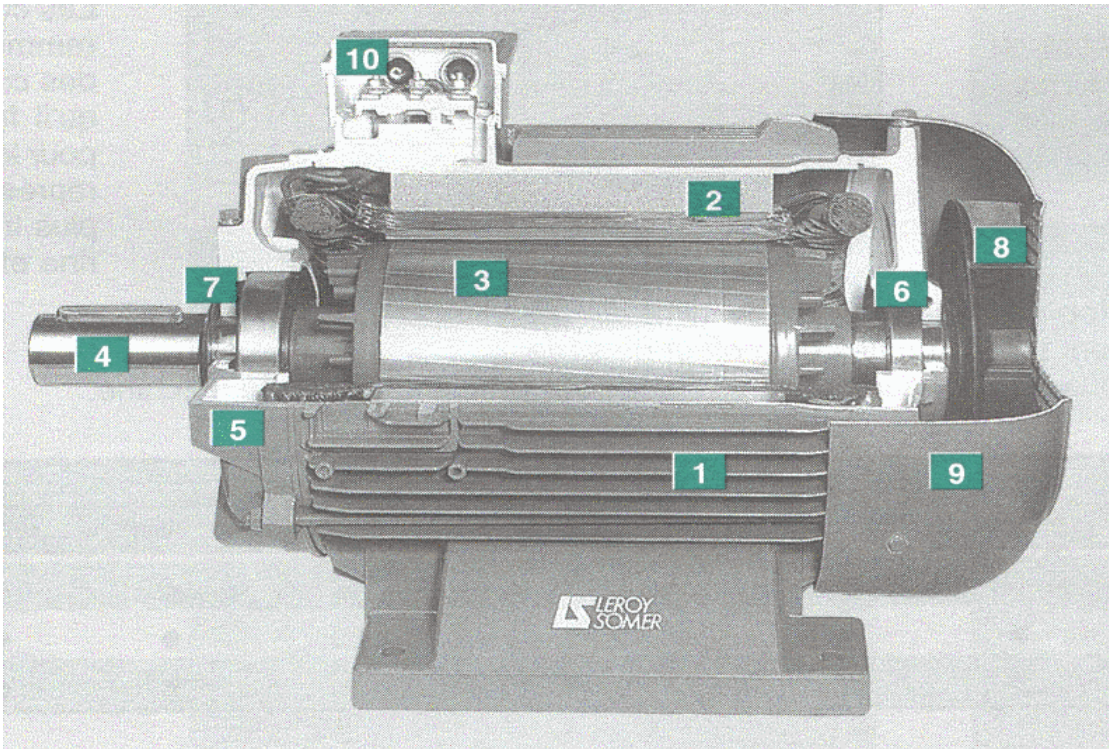


Σχήμα 4.2 Τυπικός δακτυλιοφόρος δρομέας και δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού

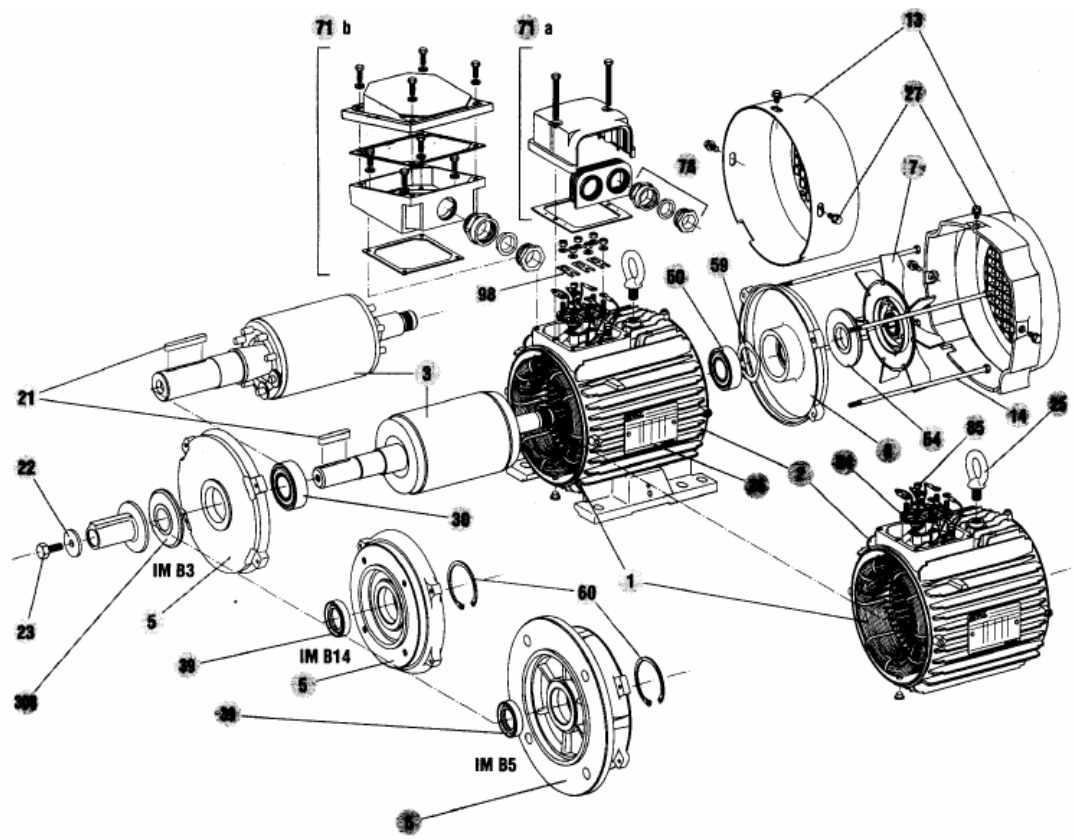
Ο δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού αποτελείται από μια σειρά αγώγιμων ράβδων, που είναι τοποθετημένες σε αυλάκια της επιφάνειας του δρομέα και βραχυκυκλωμένες στα δύο άκρα τους, μέσω μεγάλων δακτυλίων (shorting rings). Ο δακτυλιοφόρος δρομέας διαθέτει ολοκληρωμένο τριφασικό τύλιγμα, το οποίο είναι τοποθετημένο, ώστε να αποτελεί το κατοπτρικό είδωλο του τυλίγματος του στάτη. Οι τρεις φάσεις ενός τέτοιου τυλίγματος συνδέονται συνήθως σε αστέρα, ενώ τα άκρα των αγωγών συνδέονται σε δακτυλίους. Οι αγωγοί του δρομέα βραχυκυκλώνονται μέσω ψηκτρών, που εφάπτονται στους δακτυλίους. Έτσι τα ρεύματα στο δακτυλιοφόρο δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα μπορούν να μετρηθούν στις ψήκτρες και ακόμη είναι δυνατή η σύνδεση εξωτερικών αντιστάσεων στο κύκλωμα της διέγερσης. Η τελευταία δυνατότητα δίνει το πλεονέκτημα επεξεργασίας της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα.



Σχήμα 4.3 : Δρομέας με τύλιγμα κλωβού


10
2
8
7
3
6
4
5
1
9
LEROY SOMER

(α)


71 b
71 a
13
27
74
7
98
50
59
21
3
14
25
22
30
IM B3
60
1
23
5
39
IM B14
5
IM B5

(β)

Σχήμα 4.4:Τριφασικός επαγωγικός κινητήρας με βραχυκυκλωμένο κλωβό. (α) Διακρίνονται τα παρακάτω μέρη: 1–Πτερύγια ψύξης του στάτη, 2–Ελάσματα του στάτη και το τύλιγμα, 3–Δρομέας, 4–Άξονας,5–9–Κέλυφος, 6–7– Ρουλεμάν, 8–Ανεμιστήρας, 10–Κιβώτιο ηλεκτρικής σύνδεσης. (β) Λεπτομερής σχεδιαστική καταγραφή των επιμέρους τμημάτων του κινητήρα

4.5 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

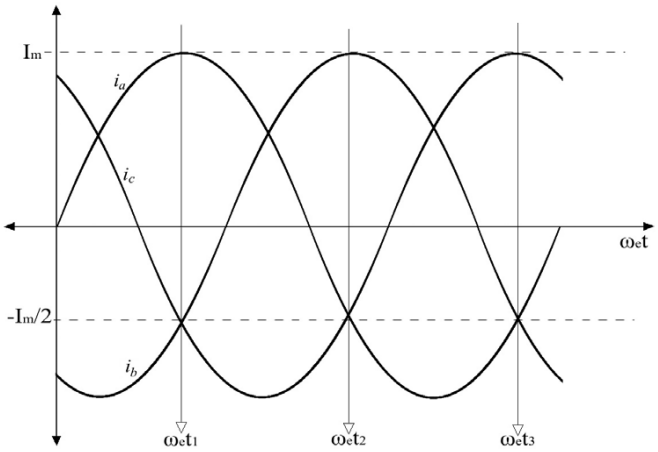
4.5.1 Αρχή Λειτουργίας

Ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας επαγωγής, όπως και κάθε κινητήρας, αποτελεί μια συσκευή ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 4.4, υπάρχουν δύο είδη ασύγχρονων κινητήρων επαγωγής, ανάλογα με τη διαμόρφωση του δρομέα τους: τους κινητήρες τυλιγμένου δρομέα και τους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα (τύπου κλωβού), με τους τελευταίους να είναι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενοι σε βιομηχανικές εφαρμογές. Αυτό που θα πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο είναι, ότι η αρχή λειτουργίας και των δύο παραπάνω τύπων ασύγχρονων κινητήρων επαγωγής, είναι ακριβώς η ίδια.

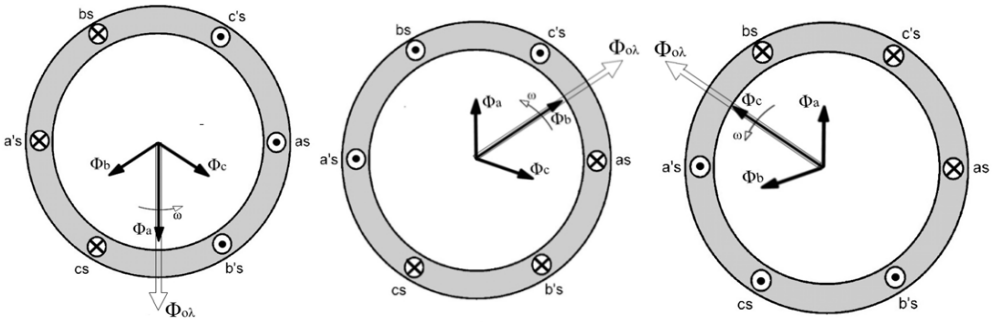
Η αρχή λειτουργίας της μηχανής επαγωγής είναι η ακόλουθη :

Προκειμένου να παραχθεί το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, τα τυλίγματα του στάτη θα πρέπει να είναι κατάλληλα τοποθετημένα (χωρική διαφορά τάσης 120°) και να διαρρέονται με ρεύματα μετατοπισμένα μεταξύ τους στο χρόνο κατά 120°. Για την εύκολη κατανόηση της διαδικασίας έχει θεωρηθεί πως τα τυλίγματα των τριών φάσεων του στάτη είναι συγκεντρωμένα και απεικονίζονται από ένα πηνίο για την κάθε φάση με N σπείρες, ενώ τροφοδοτούνται από συμμετρικά ρεύματα i_a, i_b, i_c με διαφορά φάσης 120°. Με Φ_α, Φ_b, Φ_c, απεικονίζονται οι μαγνητικές ροές που αναπτύσσονται από το κάθε πηνίο. Η συνισταμένη ροή Φ_s περιστρέφεται στο χρόνο δεξιόστροφα για τη συγκεκριμένη διαδοχή φάσεων των ρευμάτων. Στο Σχήμα 4.5 γίνεται μια σχηματική αναπαράσταση για το πώς αναπτύσσεται το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο σε έναν τριφασικό κινητήρα επαγωγής. Με την αντίστοιχη διαδικασία όπως αυτή φαίνεται στο Σχήμα 4.5 και εναλλαγή της διαδοχής των δύο από τα τρία ρεύματα, η συνισταμένη ροή θα περιστρέφεται αριστερόστροφα. Έτσι το μαγνητικό πεδίο μπορεί να περιστρέφεται είτε αριστερόστροφα είτε δεξιόστροφα και συνεπώς ο δρομέας του κινητήρα επαγωγής να μπορεί να αλλάξει φορά περιστροφής με την εναλλαγή των δύο εκ των τριών συνδέσεων τροφοδοσίας των τυλιγμάτων του στάτη.

Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται από τα ρεύματα που διαρρέουν τα τυλίγματα του στάτη, επάγει τάσεις και κατά συνέπεια ρεύματα στις μπάρες του δρομέα τύπου κλωβού ή στα τυλίγματα στην περίπτωση που ο δρομέας είναι τυλιγμένος. Τα επαγόμενα ρεύματα στο δρομέα δημιουργούν μια μαγνητική ροή Φ_r στο δρομέα, η οποία ακολουθεί τη ροή του στάτη με μια υστέρηση ως προς αυτή κατά μία γωνία 90°+α (α= διαφορά φάσης τάσης-ρεύματος). Η αλληλεπίδραση των δύο μαγνητικών πεδίων και η διαφορά φάσης τους έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας ροπής, η οποία προκαλεί την περιστροφική κίνηση του δρομέα με φορά την φορά περιστροφής του πεδίου του στάτη.



(α)



(β)

Σχήμα 4.5 : Μαγνητικό πεδίο τριφασικής ασύγχρονης μηχανής :
(α) Φασικά Ρεύματα τυλιγμάτων στάτη
(β) Στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στάτη

4.5.2 Ταχύτητα επαγωγικών κινητήρων

Η ηλεκτρική συχνότητα είναι ο αριθμός των φορών ανά δευτερόλεπτο, που ο πόλος ενός δρομέα περνάει μπροστά από τον πόλο του στάτη. Η σύγχρονη ταχύτητα, που είναι αντίθετη με τη φορά του ρολογιού, ορίζεται από τον τύπο:

$$n_s = \frac{120 \quad f_p}{p} \tag{4.1}$$

όπου n_s : η σύγχρονη μηχανική ταχύτητα σε rpm
f_s : η συχνότητα του συστήματος σε Hz και p ο αριθμός των πόλων της μηχανής

Υπάρχει κάποιο πεπερασμένο άνω όριο για την ταχύτητα του δρομέα. Αν η ταχύτητα του δρομέα, ήταν ίση με την σύγχρονη ταχύτητα, δεν θα υπήρχε σχετική κίνηση των αγωγών του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη και δεν θα αναπτυσσόταν τάση εξ επαγωγής στα άκρα τους. Ένας επαγωγικός κινητήρας, μπορεί να περιστρέφεται με ταχύτητα πολύ κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα, αλλά δεν είναι ποτέ δυνατό να περιστρέφεται με ταχύτητα ακριβώς ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα.

4.5.3 Η έννοια της ολίσθησης του δρομέα

Η τάση που επάγεται σε κάποιον από τους αγωγούς του δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα, εξαρτάται από τη σχετική κίνηση του δρομέα, ως προς τα μαγνητικά πεδία. Επειδή η συμπεριφορά ενός επαγωγικού κινητήρα εξαρτάται βασικά από τις τάσεις και τα ρεύματα στο δρομέα, γίνεται συχνά λόγος για τη σχετική ταχύτητα. Δύο είναι συνήθως τα μεγέθη που περιγράφουν τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς τα μαγνητικά πεδία. Το πρώτο από αυτά είναι η ταχύτητα ολίσθησης (slip speed) που ορίζεται ως η διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από τη σύγχρονη ταχύτητα:

$$n_{slip} = n_{sync} - n_m \tag{4.2}$$

όπου n_{slip} : η ταχύτητα ολίσθησης της μηχανής
n_{sync} : η ταχύτητα των μαγνητικών πεδίων
n_m : η μηχανική ταχύτητα του άξονα μηχανής

Το δεύτερο μέγεθος με το οποίο εκφράζεται η σχετική ταχύτητα, είναι η ολίσθηση (slip) και ουσιαστικά πρόκειται για τη σχετική ταχύτητα εκφρασμένη σε ποσοστά. Έτσι η ολίσθηση

ορίζεται από τη σχέση: $$s = \frac{(n_{sync} - n_m)}{n_{sync}} \tag{4.3}$$

Σημειώνεται, ότι αν ο δρομέας της μηχανής περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, είναι s=0, ενώ αν ο δρομέας είναι ακίνητος, είναι s=1. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση η τιμή της ολίσθησης μεταβάλλεται μεταξύ αυτών των δύο αυτών ορίων .

Η συχνότητα του δρομέα συνδέεται με την ηλεκτρική συχνότητα μέσω της σχέσης:

$$f_r = s \cdot f_e \tag{4.4}$$

Όπου με αντικατάσταση των σχέσεων (4.3) και (4.1) γίνεται :

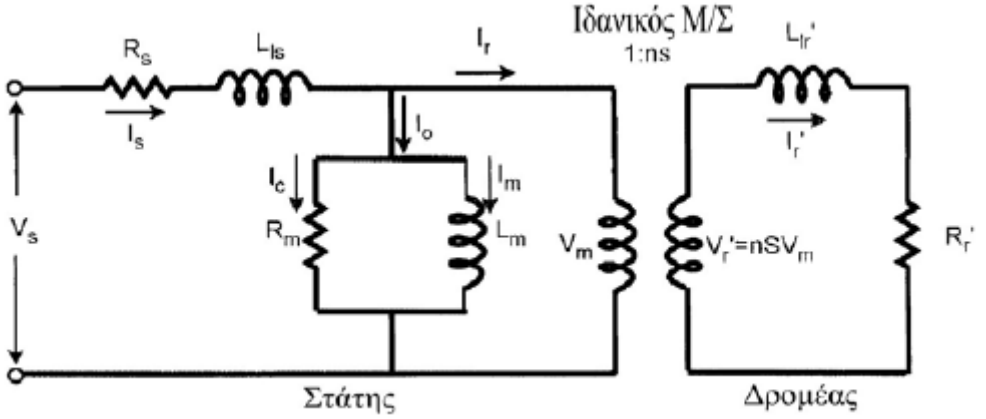
$$f_r = \frac{p}{120}(n_{sync} - n_m) \tag{4.5}$$

4.6 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

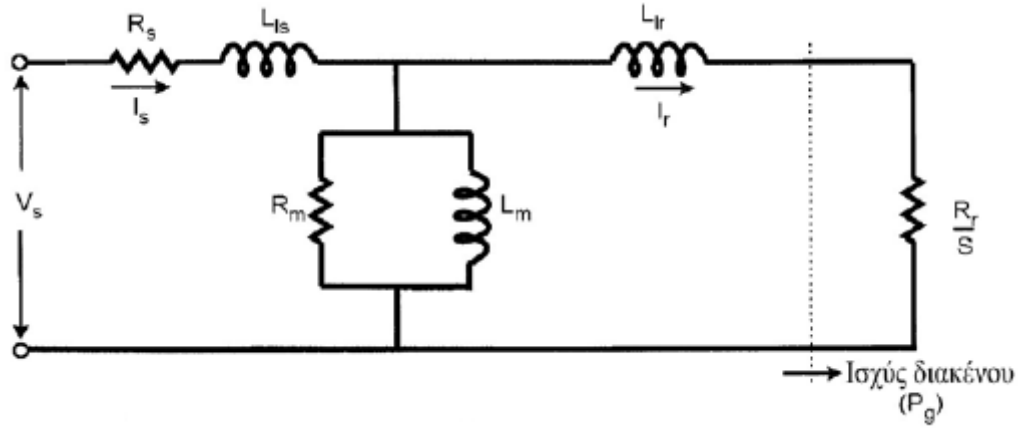
Για την ακριβή μελέτη της λειτουργίας της ασύγχρονης τριφασικής ηλεκτρικής μηχανής επαγωγής, θα πρέπει να βασιστεί κανείς στα περίπλοκα και συχνά δυσνόητα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα, που συνδέονται με τη λειτουργία της. Επειδή κάτι τέτοιο είναι ιδιαίτερα δύσκολο και καθόλου πρακτικό, έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα της μηχανής, για να προσομοιώσουν και να προσεγγίσουν τη λειτουργία της, στην εκάστοτε λειτουργική κατάσταση. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο μοντέλο της ασύγχρονης ηλεκτρικής μηχανής επαγωγής, το οποίο αφορά την ανάλυση και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της μηχανής, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, καθώς και τα σχετικά ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα.

Για τη μοντελοποίηση της μηχανής, χρήσιμο είναι να θεωρηθεί , ως ένας περιστρεφόμενος μετασχηματιστής. Θεωρείται ότι ο μετασχηματιστής είναι μια στατική ηλεκτρική μηχανή, που διαθέτει δύο τυλίγματα, τα οποία εμπλέκονται μαγνητικά και αυτεπάγουν και αλληλεπάγουν ρεύματα, δηλαδή η λειτουργία του στηρίζεται επίσης στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Επομένως το μοντέλο της ασύγχρονης ηλεκτρικής μηχανής επαγωγής, θα μοιάζει στο μοντέλο ενός μετασχηματιστή. Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται το ανά

φάση ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα της ασύγχρονης τριφασικής ηλεκτρικής μηχανής επαγωγής, που προκύπτει από το μοντέλο λειτουργίας της, μόνο κατά τη μόνιμη κατάσταση. Στη συνέχεια αναλύεται το ισοδύναμο αυτό κύκλωμα και αναφέρεται σύντομα στο πραγματικό φυσικό φαινόμενο, που μοντελοποιεί το κάθε στοιχείο του ισοδυνάμου κυκλώματος.



(α) : Ισοδύναμο κύκλωμα με μετασχηματιστή



(β) : Ισοδύναμο κύκλωμα με μεγέθη ανηγμένα στον στάτη

Σχήμα 4.6 : Ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα της ασύγχρονης τριφασικής μηχανής επαγωγής στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

Στο κύκλωμα :

- R_s και R_r είναι οι αντιστάσεις του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα
- L_m είναι η αλληλεπαγωγή των τυλιγμάτων στάτη-δρομέα ή επαγωγή μαγνήτισης (magnetizing inductance)
- L_{ls} και L_{lr} είναι οι αυτεπαγωγές σκεδάσεως του τυλίγματος του στάτη (stator leakage inductance) και του δρομέα (rotor leakage inductance) αντίστοιχα.
- V_s τάση στάτη ή της πηγής (δίκτυο)
- S η ολίσθηση

Στο στάτη της μηχανής εφαρμόζεται η τάση V_s της πηγής (δίκτυο). Ανάλογα με το αν τα τριφασικά τυλίγματα της μηχανής είναι συνδεδεμένα σε αστέρα ή σε τρίγωνο, η τάση αυτή είναι η φασική ή η πολική τάση του δικτύου αντίστοιχα. Το ανά φάση τύλιγμα του στάτη, παρίσταται από μια ωμική αντίσταση R_s και μια επαγωγή L_{ls} (πηνίο). Η αντίσταση προσομοιώνει τις απώλειες σε Joule (θερμότητα) στο τύλιγμα λόγω της κυκλοφορίας ρεύματος σε αυτό, ενώ η επαγωγή προσομοιώνει τη σκέδαση (ροή που δημιουργείται από το τύλιγμα και εμπλέκει το ίδιο το τύλιγμα χωρίς να εμπλέκει άλλα τυλίγματα της μηχανής) του μαγνητικού πεδίου του τυλίγματος.

Η επαγωγή L_{ls} ονομάζεται και αυτεπαγωγή του τυλίγματος του στάτη (stator leakage inductance). Ο εγκάρσιος κλάδος που ακολουθεί και αποτελείται από μια ωμική αντίσταση παράλληλα με μια επαγωγή, καλείται κλάδος μαγνήτισης. Ο κλάδος μαγνήτισης διαρρέεται από το ρεύμα πυρήνα (I_o), το οποίο αποτελείται από δύο συνιστώσες: το ρεύμα απωλειών πυρήνα (I_c) και από το ρεύμα μαγνήτισης (I_m). Το ρεύμα απωλειών πυρήνα (I_c) διαρρέει την αντίσταση R_m, η οποία συμβολίζει τις θερμικές απώλειες του σιδηρομαγνητικού πυρήνα από το συνεχή επαναπροσανατολισμό των στοιχειωδών μαγνητικών δίπολων του μαγνητικού υλικού (υστέρηση) και από τα δινορεύματα. Το ρεύμα μαγνήτισης (I_m) διαρρέει την επαγωγή L_m, η οποία μοντελοποιεί το μαγνητικό πεδίο εντός της μηχανής, που εμπλέκει τα τυλίγματα στάτη και δρομέα. Η επαγωγή L_m ονομάζεται και αλληλεπαγωγή τυλιγμάτων στάτη-δρομέα ή επαγωγή μαγνήτισης (magnetizing inductance).

Επιπλέον στο ισοδύναμο αυτό κύκλωμα όλες οι μεταβλητές και οι παράμετροι του δρομέα, δεν είναι οι πραγματικές τους τιμές, αλλά οι ποσότητες που είναι ανηγμένες στο στάτη.

Είναι επίσης γνωστό, ότι οι μηχανές επαγωγής δεν στρέφονται σύγχρονα με την συχνότητα διέγερσης. Σε ονομαστικό φορτίο η ταχύτητα της μηχανής επαγωγής είναι ελαφρώς μικρότερη κατά 2-7% από τη σύγχρονη ταχύτητα.

Η επαγωγή του στάτη L_s και του δρομέα L_r *ορίζονται ως εξής:*

$$L_s = L_{ls} + L_m \tag{4.6}$$

$$L_r = L_{lr} + L_m \tag{4.7}$$

Όπου L_{ls} *και* L_{lr} είναι η αυτεπαγωγή του τυλίγματος του στάτη (stator leakage inductance) και του δρομέα (rotor leakage inductance) αντίστοιχα.

Η παραγόμενη ροπή δίνεται από τον τύπο :

$$T_e = \frac{P}{2\omega_e} \cdot i_r^2 \cdot \frac{R_r}{s} \tag{4.8}$$

Παρόλο που το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα είναι χρήσιμο στην ανάλυση και στην πρόβλεψη της μόνιμης κατάστασης, δεν είναι ικανό να εξηγήσει τη δυναμική απόδοση της μηχανής επαγωγής.

4.7 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

Σ'έναν πραγματικό κινητήρα τα τυλίγματα του δρομέα (rotor) διαφέρουν από τα τυλίγματα του στάτη (stator), δηλαδή ο αριθμός των σπειρών-ελιγμάτων των ανά φάση τυλιγμάτων του δρομέα N_r, δεν είναι ίσος με τον αριθμό N_s των ελιγμάτων των τυλιγμάτων του στάτη.

Οι εξισώσεις τάσης που περιγράφουν το κύκλωμα του στάτη και του δρομέα μπορούν να γραφούν στην παρακάτω μορφή πίνακα:

$$\begin{bmatrix} v_{abcs} = r_s i_{abcs} + p\lambda_{abcs} \\ v_{abcr} = r_r i_{abcr} + p\lambda_{abcr} \end{bmatrix} \tag{4.9}$$

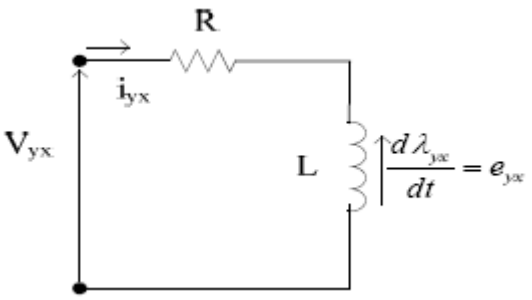
Όπου :

- p αναπαριστά το διαφορικό $\frac{d}{dt}$ και

- τα διανύσματα v_{abcx} , i_{abcx} και λ_{abcx} (x= r ή s) ορίζονται ως εξής :

$$v_{abcx} = \begin{pmatrix} v_{ax} \\ v_{bx} \\ v_{cx} \end{pmatrix} \quad i_{abcx} = \begin{pmatrix} i_{ax} \\ i_{bx} \\ i_{cx} \end{pmatrix} \quad \lambda_{abcx} = \begin{pmatrix} \lambda_{ax} \\ \lambda_{bx} \\ \lambda_{cx} \end{pmatrix} \tag{4.10}$$

Οι παραπάνω εξισώσεις τάσης προκύπτουν από την αναπαράσταση των ελιγμάτων του στάτη ή του δρομέα ως ένα απλό RL κύκλωμα, όπου ο νόμος Faraday χρησιμοποιείται, για να καθορίσει μια ηλεκτρεγερτική δύναμη e_{yx} , επαγόμενη σ'ένα πηνίο από μια χρονομεταβλητή ροή λ_{xy} . [4.1]



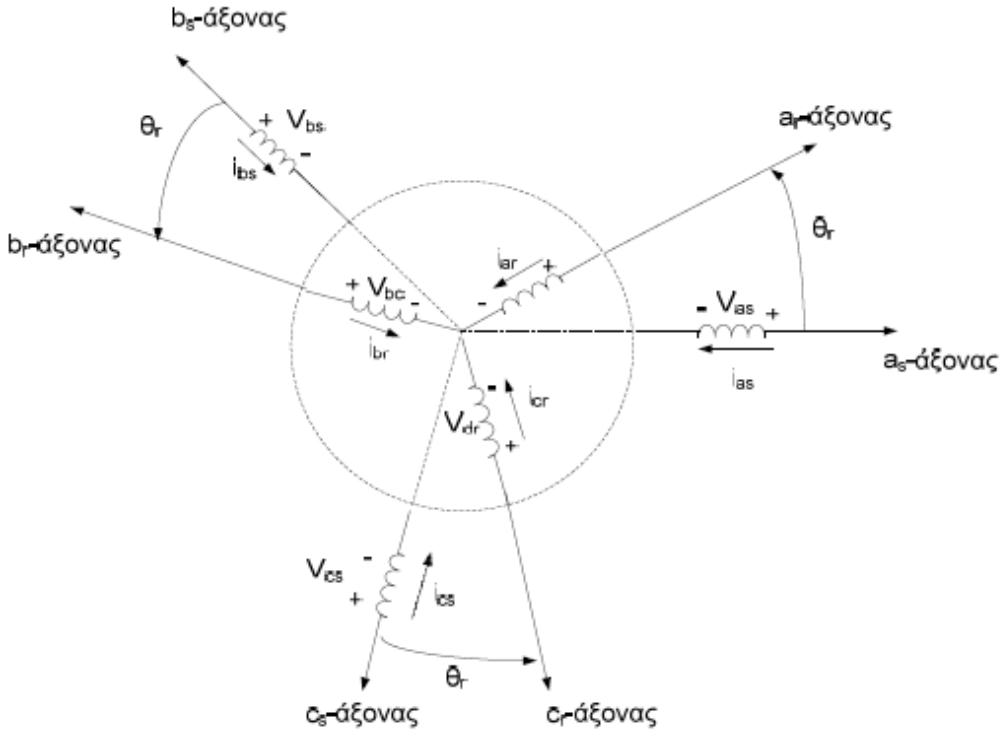
Σχήμα 4.7 : R-L Κύκλωμα

Στο παραπάνω σχήμα ο δείκτης y αναφέρεται στα ελίγματα a, b ή c και ο δείκτης x χρησιμοποιείται για να καθορίσει τα ελίγματα του στάτη ή του δρομέα x = s ή x = r.

Γενικά υπάρχει σύζευξη μεταξύ όλων των φάσεων του στάτη και του δρομέα, όπως εξηγείται παρακάτω. [4.5]

Με το σχηματισμό των μαγνητικών αξόνων μιας τριφασικής επαγωγικής μηχανής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8 και με τα τυλίγματα του στάτη να έχουν τον ίδιο αριθμό ελιγμάτων, N_s και να είναι συμμετρικά τοποθετημένα ανά 120°, η αυτεπαγωγή των φάσεων του στάτη προκύπτει ως το άθροισμα της αυτεπαγωγής μαγνήτισης της κάθε μιας φάσης L_{ym} (y = a , b , c) και της αυτεπαγωγής σκεδάσεως του τυλίγματος του στάτη L_{ls} .

$$\begin{aligned} L_{as} &= L_{ls} + L_{am} \\ L_{bs} &= L_{ls} + L_{bm} \\ L_{cs} &= L_{ls} + L_{cm} \end{aligned} \tag{4.11}$$



Σχήμα 4.8: Μαγνητικοί άξονες τριφασικής μηχανής επαγωγής

Λόγω συμμετρίας των τυλιγμάτων των φάσεων *as* ,*bs* και *cs,* είναι φανερό, ότι οι αυτεπαγωγές μαγνήτισης αυτών των τυλιγμάτων είναι ίδιες, κάνοντας με αυτόν τον τρόπο τις αυτεπαγωγές των φάσεων του στάτη ίσες:

$$L_{as} = L_{bs} = L_{cs} \tag{4.12}$$

όπου,

$$L_{ms} = L_{am} = L_{bm} = L_{cm} \tag{4.13}$$

Οι αλληλεπαγωγές μεταξύ των τυλιγμάτων των τριών φάσεων $as - bs$, $bs - cs$ και $cs - as$ δίνονται από:

$$L_{abs} = L_{bcs} = L_{cas} = -\frac{L_{ms}}{2} \tag{4.14}$$

Οι πεπλεγμένες ροές των φάσεων *as* ,*bs* και *cs* που προκύπτουν από τα ρεύματα που διαρρέουν τα τυλίγματα του στάτη, μπορούν να εκφρασθούν ως εξής:

$$\lambda_{abc_s(s)} = L_{s(s)} i_{abc_s} = \begin{bmatrix} L_{l_s} + L_{m_s} & -\frac{L_{m_s}}{2} & -\frac{L_{m_s}}{2} \\ -\frac{L_{m_s}}{2} & L_{l_s} + L_{m_s} & -\frac{L_{m_s}}{2} \\ -\frac{L_{m_s}}{2} & -\frac{L_{m_s}}{2} & L_{l_s} + L_{m_s} \end{bmatrix} \cdot i_{abc_s} \tag{4.15}$$

Από την άλλη πλευρά οι πεπλεγμένες ροές των φάσεων του στάτη, εξαιτίας των ρευμάτων στο κύκλωμα του δρομέα, μπορούν να εκφρασθούν ως :

$$\lambda_{abc_{s(r)}} = N \cdot L_{s(r)} \cdot i_{abc_r} = N \cdot L_{m_s} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \cdot i_{abc_r} \tag{4.16}$$

όπου $N = \frac{N_r}{N_s}$ είναι ο λόγος του αριθμού των ελιγμάτων του δρομέα προς τον αριθμό των ελιγμάτων του στάτη.

Η ολική πεπλεγμένη ροή στα τυλίγματα του στάτη εξαιτίας και των δύο ρευμάτων, του στάτη και του δρομέα, δίνεται από:

$$\lambda_{abc_s} = \lambda_{abc_{s(s)}} + \lambda_{abc_{s(r)}} \tag{4.17}$$

Εντελώς ανάλογες εκφράσεις ορίζονται και για το τριφασικό τύλιγμα του δρομέα, με μόνη διαφορά τον αριθμό των ελιγμάτων N_r και προκύπτει ότι:
Η πεπλεγμένη ροή στο κύκλωμα του δρομέα εξαιτίας των ρευμάτων του δρομέα, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\lambda_{abc_{r(r)}} = L_{r(r)} \cdot i_{abc_r} = \begin{bmatrix} L_{l_r} + N^2 L_{ms} & -\frac{1}{2} N^2 L_{ms} & -\frac{1}{2} N^2 L_{ms} \\ -\frac{1}{2} N^2 L_{ms} & L_l + N^2 L_{ms} & -\frac{1}{2} N^2 L_{ms} \\ -\frac{1}{2} N^2 L_{ms} & -\frac{1}{2} N^2 L_{ms} & L_{l_r} + N^2 L_{ms} \end{bmatrix} \cdot i_{abc_r} \tag{4.18}$$

όπου L_{lr} είναι η αυτεπαγωγή σκεδάσεως του τυλίγματος του δρομέα.

Από την άλλη πλευρά η πεπλεγμένη ροή στα τυλίγματα του δρομέα εξαιτίας των ρευμάτων στο κύκλωμα του στάτη, μπορεί να εκφρασθεί :

$$\lambda_{abc_{r(s)}} = N \cdot L_{r(s)} \cdot i_{abc_s} = N \cdot L_{m_s} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \cdot i_{abc_s} \tag{4.19}$$

Η συνολική πεπλεγμένη ροή του δρομέα στα τυλίγματα του δρομέα εξαιτίας και των δύο ρευμάτων, του στάτη και του δρομέα, δίνεται από την σχέση:

$$\lambda_{abc_r} = \lambda_{abc_{r(r)}} + \lambda_{abc_{r(s)}} \tag{4.20}$$

Ο λόγος των ελιγμάτων $N = \frac{N_r}{N_s}$ εμφανίζεται καθώς ο επαγωγικός κινητήρας είναι απλά ένα είδος συζευγμένου μαγνητικού κυκλώματος. Για να αποφευχθεί η εξάρτηση των παραπάνω σχέσεων από τον λόγο των ελιγμάτων N, ανάγεται το κύκλωμα του δρομέα στο κύκλωμα του στάτη με τον ίδιο ακριβώς τρόπο σαν να χρησιμοποιείται μετασχηματιστής, σύμφωνα με τις σχέσεις :

$$\begin{aligned} &i'_{abcr} = N \cdot i_{abcr} \qquad v'_{abcr} = \frac{1}{N} \cdot v_{abcr} \qquad \lambda'_{abcr} = \frac{1}{N} \cdot \lambda_{abcr} \\ &r'_r = \frac{1}{N^2} \cdot r_r \qquad L'_{lr} = \frac{1}{N^2} \cdot L_{lr} L'_{s(r)} = \frac{1}{N} \cdot L_{s(r)} L'_{r(s)} = \frac{1}{N} \cdot L_{r(s)} \end{aligned} \tag{4.21}$$

Σαν αποτέλεσμα του παραπάνω μετασχηματισμού το πραγματικό τύλιγμα του δρομέα αντικαθίσταται από ένα ισοδύναμο τύλιγμα, με τον ίδιο αριθμό ελιγμάτων με το τύλιγμα του στάτη, ενώ παράλληλα διατηρούνται οι απώλειες στο τύλιγμα, η ηλεκτρική ισχύς εισόδου στο δρομέα και η αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια στις αυτεπαγωγές σκεδάσεως.

Η εξίσωση τάσης του δρομέα γίνεται :

$$v'_{abcr} = r'_r i'_{abcr} + p\lambda'_{abcr} \tag{4.22}$$

Η συνολική πεπλεγμένη ροή στα τυλίγματα του στάτη γίνεται :

$$\lambda_{abcs} = L_{s(s)} \cdot i_{abcs} + L'_{s(r)} \cdot i'_{abcr} \tag{4.23}$$

Η συνολική πεπλεγμένη ροή στα τυλίγματα του δρομέα γίνεται :

$$\lambda_{abcr} = L_{r(r)} \cdot i_{abcr} + L'_{r(s)} \cdot i'_{abcs} \tag{4.24}$$

Όπου

$$L'_{r(r)} = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} & L'_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \tag{4.25}$$

Οι πεπλεγμένες ροές μπορούν τώρα να εκφρασθούν ως :

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{s(s)} & L'_{s(r)} \\ L'_{r(s)} & L'_{r(r)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \tag{4.26}$$

Και οι εξισώσεις τάσης εκφρασμένες με όρους μεταβλητών της μηχανής αναφερόμενες σε σταθερά τυλίγματα μπορούν να γραφούν :

$$\begin{bmatrix} v_{abcs} \\ v'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_{s(s)} & p \cdot L'_{s(r)} \\ p \cdot L'_{r(s)} & r'_r + p \cdot L'_{r(r)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \tag{4.27}$$

4.8 ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΣΕ ΧΩΡΙΚΑ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ

4.8.1 Εισαγωγή

Η έννοια του διανυσματικού ελέγχου έχει δώσει τη δυνατότητα να ελέγχονται οι μηχανές επαγωγής, έτσι ώστε να επιτυγχάνουν καλή δυναμική απόδοση, όπως μια μηχανή συνεχούς ρεύματος.

Παρόλο που το κλασσικό ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα έχει κυρίως χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση μόνιμης κατάστασης (steady state analysis) και στο σχεδιασμό των μηχανών επαγωγής, δεν είναι το κατάλληλο, για να προβλέψει τη δυναμική απόδοση της μηχανής. Για να γίνει κατανοητός και να αναλυθεί ο διανυσματικός έλεγχος των μηχανών επαγωγής, είναι απαραίτητο το δυναμικό μοντέλο της μηχανής. Έχει αποδειχθεί ότι οι δυναμικές εξισώσεις του μοντέλου που αναπτύσσονται σε ένα περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς περιγράφουν καλυτέρα τα χαρακτηριστικά των μηχανών επαγωγής.

Σκοπός του κεφαλαίου είναι να δείξει και να αναλύσει το μοντέλο της μηχανής επαγωγής, χρησιμοποιώντας την έννοια των χωρικών διανυσμάτων και των d-q μεταβλητών. Οι εξισώσεις του δυναμικού μοντέλου είναι σύνθετες και σε ορισμένες περιπτώσεις εξαρτώνται από το σύστημα αναφοράς. Έχει όμως αποδειχθεί, ότι όταν επιλεγούμε ένα σύγχρονο σύστημα αναφοράς με τη ροή του δρομέα ευθυγραμμισμένη με τον d-άξονα, οι δυναμικές εξισώσεις απλοποιούνται και ο διανυσματικός έλεγχος γίνεται εφικτός.

Οι εξισώσεις τάσεως που περιγράφουν τη λειτουργία των ασύγχρονων τριφασικών μηχανών επαγωγής, είναι διαφορικές εξισώσεις με συντελεστές που μεταβάλλονται στο χρόνο (χρονομεταβλητές), καθώς ο δρομέας της μηχανής περιστρέφεται. Επειδή η αναλυτική τους επίλυση είναι δύσκολη, συνήθως επιχειρείται μια απλοποίηση της επίλυσής τους, μέσω κατάλληλων αλγεβρικών μετασχηματισμών (αλλαγή μεταβλητών), οι οποίοι τελικά θα τις μετατρέψουν σε συνήθεις διαφορικές εξισώσεις με σταθερούς στο χρόνο συντελεστές.

Γενικά, έχουν χρησιμοποιηθεί διάφοροι αλγεβρικοί μετασχηματισμοί, οι οποίοι αποτελούσαν ειδικές περιπτώσεις ενός γενικού αλγεβρικού μετασχηματισμού, που αναφέρεται στην αναγωγή όλων των μεταβλητών της μηχανής, σε ένα πλαίσιο αναφοράς που περιστρέφεται με αυθαίρετη γωνιακή ταχύτητα (arbitrary reference frame). Όλες οι υπόλοιπες περιπτώσεις μετασχηματισμών που έχουν παρουσιαστεί, εμπίπτουν στο γενικό αυτό μετασχηματισμό. Η μοναδική παράμετρος που τις διαφοροποιεί είναι η «αυθαίρετη» ταχύτητα περιστροφής του πλαισίου αναφοράς, η οποία για παράδειγμα μπορεί να είναι η σύγχρονη ταχύτητα, η μηδενική ταχύτητα –στατό πλαίσιο αναφοράς κτλ.

Στα τέλη του 1920, ο R.H. Park εισήγαγε μια νέα προσέγγιση στην ανάλυση των ηλεκτρικών μηχανών. Αντικατέστησε τις μεταβλητές (ρεύματα, τάσεις και πεπλεγμένες ροές) που σχετίζονταν με τα τυλίγματα του στάτη μιας σύγχρονης μηχανής, σε μεταβλητές φανταστικών τυλιγμάτων που περιστρέφονταν μαζί με το δρομέα, εξαλείφοντας με αυτόν τον τρόπο όλες τις χρονομεταβλητές επαγωγές από τις εξισώσεις τάσης.

Στα τέλη του 1930, ο H.C. Stanley έδειξε ότι οι χρονομεταβλητές επαγωγές στις εξισώσεις τάσης μιας επαγωγικής μηχανής, μπορούν να εξαλειφθούν, εάν οι μεταβλητές του δρομέα μετασχηματιστούν σε μεταβλητές σε ένα σύστημα αναφοράς, που περιστρέφεται μαζί με το στατη (μηδενική ταχύτητα).

Ο G. Kron πρότεινε μια αλλαγή μεταβλητών, όπου εξάλειφε τις χρονομεταβλητές αμοιβαίες επαγωγές μιας επαγωγικής μηχανής, εάν μετασχηματίζονταν και οι μεταβλητές του δρομέα και του στάτη μαζί σε ένα σύστημα αναφοράς περιστρεφόμενο με τη σύγχρονη ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

Τέλος, ο D.S Brereton, πρότεινε και πάλι για τις συμμετρικές ασύγχρονες μηχανές επαγωγής την αναγωγή όλων των μεταβλητών, σε ένα πλαίσιο αναφοράς που περιστρέφεται με την ταχύτητα του δρομέα.

Όλοι οι παραπάνω μετασχηματισμοί, αν και φαίνονται εντελώς διαφορετικοί μεταξύ τους, αποτελούν, ειδικές περιπτώσεις ενός γενικού αλγεβρικού μετασχηματισμού μεταβλητών, ο οποίος απαλείφει όλες τις χρονομεταβλητές επαγωγές με την αναγωγή όλων των μεταβλητών

στάτη και δρομέα σε ένα κοινό πλαίσιο αναφοράς, το οποίο μπορεί να περιστρέφεται με οποιαδήποτε αυθαίρετη ταχύτητα ή να παραμένει ακίνητο.

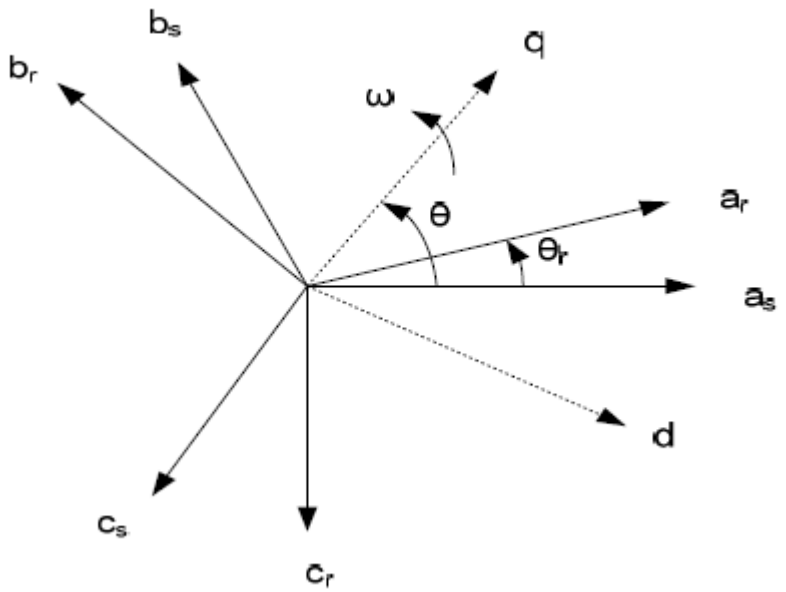
4.8.2 Θεωρία συστήματος αναφοράς

Για να εξαλειφθούν οι χρονομεταβλητές επαγωγές, οι μεταβλητές όλων των στοιχειών ενός γενικού ηλεκτρικού συστήματος, μπορούν να αλλάξουν κάτω από ένα γενικό μετασχηματισμό που χρησιμοποιείται για τις μεταβλητές του δρομέα και του στάτη μιας επαγωγικής μηχανής.

Σε αυτό το σημείο είναι προτιμότερο να θεωρηθούν μόνο οι μεταβλητές του στάτη και στη συνέχεια να τροποποιηθεί η ανάλυση για τις μεταβλητές του δρομέα. [4.4]

Οι άξονες d και q είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους και περιστρέφονται με μια αυθαίρετη γωνιακή ταχύτητα ω, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9. Οι άξονες αναφοράς ανταποκρίνονται στους μαγνητικούς άξονες των τριφασικών κυκλωμάτων του στάτη και του δρομέα.

Η γωνιακή ταχύτητα ω και η γωνιακή μετατόπιση θ του συστήματος αναφοράς σχετίζονται ως εξής: $\omega = \dfrac{d\theta}{dt}$



Σχήμα 4.9 : Σχηματική αναπαράσταση των αξόνων d και q πλαισίου αναφοράς με αυθαίρετη ταχύτητα περιστροφής

Θεωρώντας αρχικά μόνο τις μεταβλητές κατά μήκος των a, b και c αξόνων του στάτη, μπορούν να αναχθούν στους άξονες d-q μέσω των σχέσεων :

$$\begin{aligned} f_{qs} &= \frac{2}{3}\left(f_{as}\cos\theta + f_{bs}\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + f_{cs}\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right) \\ f_{ds} &= \frac{2}{3}\left(f_{as}\sin\theta + f_{bs}\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + f_{cs}\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right) \end{aligned} \tag{4.28}$$

Όπου το σύμβολο f αναπαριστά μεταβλητές όπως τάση, ρεύμα ή πεπλεγμένη ροή και ο συντελεστής 2/3 έχει επιλεγεί, έτσι ώστε να διατηρεί την ίδια τιμή της τάσης και του ρεύματος για ημιτονοειδή μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Για να γίνει ένας μοναδικός μετασχηματισμός, είναι απαραίτητο να οριστεί μια τρίτη νέα μεταβλητή κάθετη στο επίπεδο d-q, η οποία ορίζεται ως συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας:

$$f_{0s} = \frac{1}{3}\left(f_{as} + f_{bs} + f_{cs}\right) \tag{4.29}$$

Σημειώνουμε ότι σε πρακτικές εφαρμογές η μηχανή είναι συνδεδεμένη είτε σε δέλτα είτε σε αστέρα χωρίς ουδέτερο μονοπάτι και οι μεταβλητές των τριών φάσεων έχουν άθροισμα μηδέν.

Ο μετασχηματισμός των μεταβλητών του στάτη των τριών φάσεων σε ένα αυθαίρετο σύστημα αναφοράς, μπορεί να γραφεί σε μορφή πίνακα ως:

$$f_{qd0s} = K_s f_{abcs} \tag{4.30}$$

όπου,

$$(f_{qd0s})^T = \begin{bmatrix} f_{qs} & f_{ds} & f_{0s} \end{bmatrix} \tag{4.31}$$

$$(f_{abcs})^T = \begin{bmatrix} f_{as} & f_{bs} & f_{cs} \end{bmatrix} \tag{4.32}$$

Με μήτρα μετασχηματισμού :

$$K_s = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin\theta & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \tag{4.33}$$

Μπορεί να αποδειχθεί ότι για τον αντίστροφο μετασχηματισμό ισχύει:

$$K_s^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \tag{4.34}$$

Οι μεταβλητές f_{0s} δεν συσχετίζονται με το αυθαίρετο σύστημα αναφοράς, αλλά συσχετίζονται αριθμητικά με τις μεταβλητές a, b, c.

Εάν η κατεύθυνση των f_{as} f_{bs} f_{cs} θεωρηθεί ίδια με την κατεύθυνση των μαγνητικών αξόνων των τυλιγμάτων του στάτη, τότε η κατεύθυνση των μεταβλητών f_{qs} και f_{ds} μπορεί να θεωρηθεί και αυτή ίδια με την κατεύθυνση των μαγνητικών αξόνων των νέων τυλιγμάτων που προκύπτουν από την αλλαγή των μεταβλητών.

Εάν πολλαπλασιαστεί με j η εξίσωση του παράγοντα f_{ds} και το αποτέλεσμα αφαιρεθεί από το f_{qs} τότε γίνεται:

$$\underline{f}_{qds} = f_{qs} - j \cdot f_{ds} = \frac{2}{3}\left(f_{as} \cdot e^{-j\theta} + f_{bs} \cdot e^{-j\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)} + f_{cs} \cdot e^{-j\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)} \right) \tag{4.35}$$

Όπου έχει χρησιμοποιηθεί η εξίσωση του Euler : $e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$

Ορίζοντας $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$

Η εξίσωση παίρνει τη μορφή : $\underline{f}_{qds} = \frac{2}{3} e^{-j\theta}\left(f_{as} + a \cdot f_{bs} + a^2 f_{cs}\right)$ (4.36)

Εάν οριστεί : $\underline{f}_{abcs} = \frac{2}{3}\left(f_{as} + a \cdot f_{bs} + a^2 f_{cs}\right)$ (4.37)

Η εξίσωση γίνεται : $\underline{f}_{qds} = e^{-j\theta} \cdot \underline{f}_{abcs}$ (4.38)

Οι ποσότητες $\underline{f}_{abcs}$ που ορίστηκαν παραπάνω, ονομάζονται χωρικά διανύσματα και όταν η συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας είναι μηδέν, η εν λόγω ποσότητα περιγράφει απόλυτα το μετασχηματισμό.

Στην ανάλυση των μηχανών επαγωγής είναι επίσης επιθυμητό, να μετασχηματιστούν οι μεταβλητές που σχετίζονται με τα συμμετρικά ελίγματα του δρομέα στο αυθαίρετο σύστημα αναφοράς. Σε αυτή την περίπτωση ωστόσο που ο δρομέας περιστρέφεται ήδη, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια σχετική γωνία περιστροφής αντί της γωνίας θ. Ο μετασχηματισμός μπορεί να γραφτεί σε μορφή πίνακα ως εξής:

$$f_{qd0r} = K_r f_{abcr} \tag{4.39}$$

$$(f_{qd0r})^T = \begin{bmatrix} f_{qr} & f_{dr} & f_{0r} \end{bmatrix} \tag{4.40}$$

$$(f_{abcr})^T = \begin{bmatrix} f_{ar} & f_{br} & f_{cr} \end{bmatrix} \tag{4.41}$$

$$K_r = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos(\theta-\theta_r) & \cos(\theta-\theta_r-2\pi/3) & \cos(\theta-\theta_r+2\pi/3) \\ \sin(\theta-\theta_r) & \sin(\theta-\theta_r-2\pi/3) & \sin(\theta-\theta_r+2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \tag{4.42}$$

Μπορεί να αποδειχθεί ότι για τον αντίστροφο μετασχηματισμό ισχύει:

$$K_s^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta-\theta_r) & \sin(\theta-\theta_r) & 1 \\ \cos(\theta-\theta_r+2\pi/3) & \sin(\theta-\theta_r-2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta-\theta_r+2\pi/3) & \sin(\theta-\theta_r+2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \tag{4.43}$$

Εάν οριστεί :

$$\underline{f}_{abcr} = \frac{2}{3}\left(f_{ar} + a \cdot f_{br} + a^2 f_{cr}\right) \tag{4.44}$$

Προκύπτει : $\underline{f}_{qdr} = e^{-j(\theta-\theta_r)} \cdot \underline{f}_{abcr}$ (4.45)

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός για να βρεθούν οι φυσικές μεταβλητές του στάτη και του δρομέα από τα χωρικά διανύσματα, μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\begin{aligned}\underline{f}_{qds} &= \frac{2}{3}e^{-j\theta}(f_{as} + a\cdot f_{bs} + a^2\cdot f_{cs}) \\ &= \frac{2}{3}e^{-j\theta}\left(f_{as} - \frac{1}{3}\cdot(f_{as}+f_{bs}+f_{cs}) + j\frac{1}{\sqrt{3}}(f_{bs}-f_{cs})\right) \\ &= \frac{2}{3}e^{-j\theta}\left(f_{as} - \frac{1}{2}\cdot f_{bs} - \frac{1}{2}f_{cs} + j\left(\frac{\sqrt{3}}{2}f_{bs} - \frac{\sqrt{3}}{2}f_{cs}\right)\right)\end{aligned} \tag{4.46}$$

Με τον ίδιο τρόπο οι μεταβλητές του δρομέα γίνονται:

$$\underline{f}_{qdr} = e^{-j(\theta-\theta_r)}\cdot\left(f_{ar} - \frac{1}{3}\cdot(f_{ar}+f_{br}+f_{cr}) + j\frac{1}{\sqrt{3}}\left(f_{br}-f_{cr}\right)\right) \tag{4.47}$$

Θεωρώντας ότι οι συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας f_{0r} και f_{0s} είναι ίσες με το μηδέν, δίνεται ότι :

$$f_{ax} = \mathrm{Re}\left[\underline{f}_{abcx}\right] f_{bx} = \mathrm{Re}\left[a^2\cdot\underline{f}_{abcx}\right] f_{cx} = \mathrm{Re}\left[a\cdot\underline{f}_{abcx}\right] \quad \text{με x=r ή s} \tag{4.48}$$

4.8.3 Δυναμικό μοντέλο μηχανών επαγωγής με χωρικά διανύσματα

Ο μετασχηματισμός του συστήματος εξισώσεων (4.9) των κυκλωμάτων του στάτη και του δρομέα της μηχανής επαγωγής με χωρικά διανύσματα οδηγεί στο παρακάτω σύστημα εξισώσεων [4.2] [4.3] [4.4]:

$$\begin{bmatrix}\underline{v}_{abcs} = r_s\underline{i}_{abcs} + p\underline{\lambda}_{abcs} \\ \underline{v}'_{abcr} = r_r\underline{i}'_{abcr} + p\underline{\lambda}'_{abcr}\end{bmatrix} \tag{4.49}$$

Από την άλλη πλευρά το χωρικό διάνυσμα της πεπλεγμένης ροής των φάσεων του στάτη, εξαιτίας των ρευμάτων στα κυκλώματα του στάτη και του δρομέα, μπορούν να οριστούν από την πρώτη εξίσωση του συστήματος (4.26) ως εξής:

$$\underline{\lambda}_{abcs} = (L_{ls}+L_m)\cdot\underline{i}_{abcs} + L_m\cdot\underline{i}'_{abcr}\cdot e^{j\theta_r} \tag{4.50}$$

Κατά ανάλογο τρόπο το χωρικό διάνυσμα της πεπλεγμένης ροής των φάσεων του δρομέα, εξαιτίας των ρευμάτων στα κυκλώματα του στάτη και του δρομέα, μπορεί να οριστεί από τη δεύτερη εξίσωση του συστήματος (4.26) ως εξής:

$$\underline{\lambda}_{abcr} = (L_{ls}+L_m)\cdot\underline{i}_{abcr} + L_m\cdot\underline{i}_{abcs}\cdot e^{-j\theta_r} \tag{4.51}$$

Στην παραπάνω διαδικασία εύρεσης των εξισώσεων (4.43) και (4.44) έχει οριστεί η μαγνητική επαγωγή $L_m = \frac{3}{2}L_{ms}$

Από την αντικατάσταση των εξισώσεων (4.43) και (4.44) στο σύστημα εξισώσεων (4.42) και την εφαρμογή κανόνων παραγώγισης, οι εξισώσεις της μηχανής επαγωγής παίρνουν την μορφή :

$$\underline{v}_{abcs} = r_s \cdot \underline{i}_{abcs} + (L_{ls} + L_m) \cdot p \cdot \underline{i}_{abcs} + L_m \cdot (p \cdot \underline{i}'_{abcr}) \cdot e^{j\theta_r} + j \cdot \omega_r \cdot L_m \cdot \underline{i}'_{abcr} \cdot e^{j\theta_r} \qquad (4.52)$$

$$\underline{v}'_{abcr} = r'_r \cdot \underline{i}'_{abcr} + (L'_{lr} + L_m) \cdot p \cdot \underline{i}'_{abcr} + L_m \cdot (p \cdot \underline{i}_{abcs}) \cdot e^{-j\theta_r} - j\omega_r \cdot L_m \cdot \underline{i}_{abcs} \cdot e^{-j\theta_r} \qquad (4.53)$$

όπου $\omega_r = p \cdot \theta_r = \dfrac{d\theta_r}{dt}$ (4.54)

Αν οι σχέσεις (4.52) και (4.53) πολλαπλασιαστούν με τις ποσότητες $\frac{2}{3} \cdot e^{-j\theta}$ και $\frac{2}{3} \cdot e^{-j(\theta-\theta_r)}$ αντίστοιχα και κάνοντας χρήση των εξισώσεων (4.37) και (4.44), οι εξισώσεις των κυκλωμάτων του στάτη και του δρομέα της μηχανής επαγωγής σε ένα πλαίσιο αναφοράς d-q το οποίο περιστρέφεται με ταχύτητα ω και με την υπόθεση ότι οι συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας είναι μηδέν, είναι οι εξής:

$$\underline{v}_{qds} = r_s \cdot \underline{i}_{qds} + (L_{ls} + L_m) \cdot p \cdot \underline{i}_{qds} + L_m \cdot (p \cdot \underline{i}'_{qdr}) + j \cdot \omega \cdot [(L_{ls} + L_m) \cdot \underline{i}_{qds} + L_m \cdot p \cdot \underline{i}'_{qdr}] \qquad (4.55)$$

$$\underline{v}'_{qdr} = r'_r \cdot \underline{i}'_{qdr} + (L'_{ls} + L_m) \cdot p \cdot \underline{i}'_{qdr} + L_m \cdot (p \cdot \underline{i}_{qds}) + j \cdot (\omega - \omega_r) \cdot [(L'_{ls} + L_m) \cdot \underline{i}'_{qdr} + L_m \cdot p \cdot \underline{i}_{qds}] \qquad (4.56)$$

Όπου $\omega = p \cdot \theta = \dfrac{d\theta}{dt}$

$$\begin{aligned} \underline{\lambda}_{qds} &= (L_{ls} + L_m) \cdot \underline{i}_{qds} + L_m \cdot \underline{i}'_{qdr} \\ \underline{\lambda}'_{qdr} &= (L'_{lr} + L_m) \cdot \underline{i}'_{qdr} + L_m \cdot \underline{i}_{qds} \end{aligned} \qquad (4.57)$$

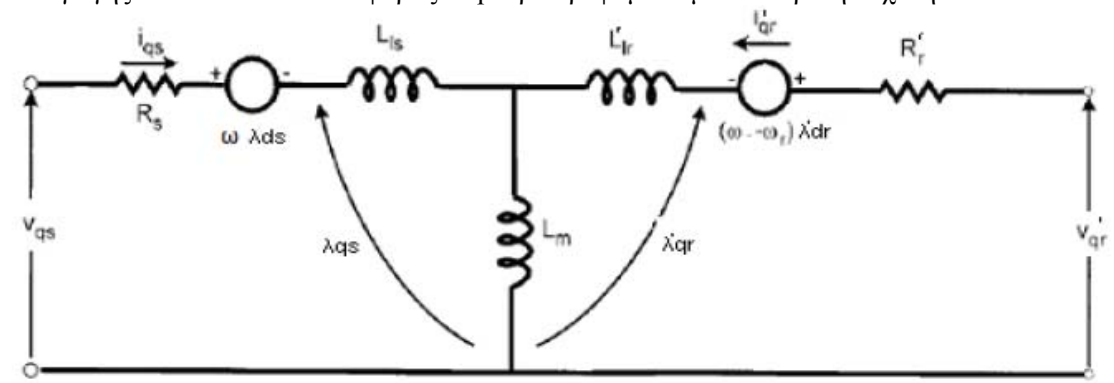
Αντικαθιστώντας με p το $\dfrac{d}{dt}$ και αναλύοντας στους d και q άξονες, οι τελικές δυναμικές εξισώσεις περιγραφής μιας μηχανής επαγωγής σε ένα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς είναι οι εξής :

$v_{ds} = r_s \cdot i_{ds} + \dfrac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega \cdot \lambda_{qs}$	$\lambda_{ds} = L_{ls} \cdot i_{ds} + L_m \cdot (i_{ds} + i'_{dr})$
$v_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + \dfrac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega \cdot \lambda_{ds}$	$\lambda_{qs} = L_{ls} \cdot i_{qs} + L_m \cdot (i_{qs} + i'_{qr})$
$v'_{dr} = r'_r \cdot i'_{dr} + \dfrac{d\lambda'_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r) \cdot \lambda'_{qr}$	$\lambda'_{dr} = L'_{lr} \cdot i'_{dr} + L_m \cdot (i_{ds} + i'_{dr})$
$v'_{qr} = r'_r \cdot i'_{qr} + \dfrac{d\lambda'_{qr}}{dt} - (\omega - \omega_r) \cdot \lambda'_{dr}$	$\lambda'_{qr} = L'_{lr} \cdot i'_{qr} + L_m \cdot (i_{qs} + i'_{qr})$

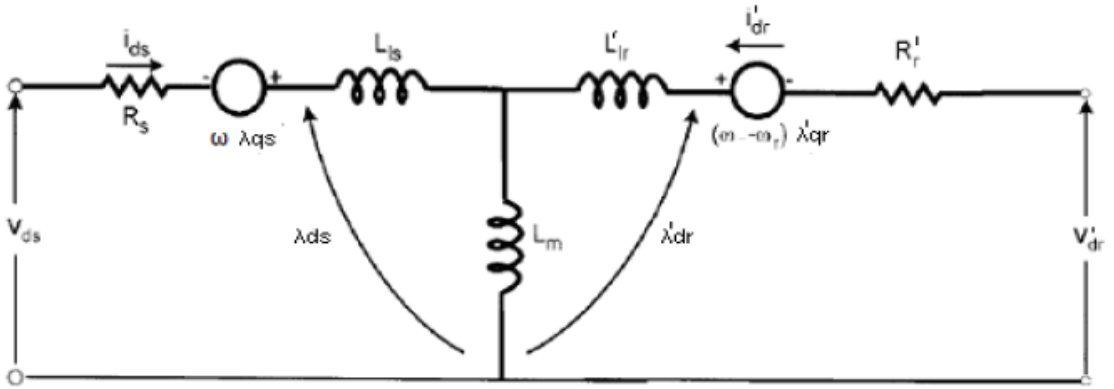
Και σε μορφή πίνακα:

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v'_{qr} \\ v'_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & \omega \cdot L_s & pL_m & \omega L_m \\ -\omega \cdot L_s & R_s + pL_s & -\omega \cdot L_m & pL_m \\ p \cdot L_m & (\omega - \omega_r) \cdot L_m & R'_r + pL'_r & (\omega - \omega_r) \cdot L'_r \\ -(\omega - \omega_r) \cdot L_m & pL_m & -(\omega_e - \omega_r) \cdot L'_r & R'_r + pL'_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix}$$

Στο Σχήμα 4.10 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του δυναμικού μοντέλου της μηχανής επαγωγής σε ένα πλαίσιο αναφοράς d-q περιστρεφόμενο με αυθαίρετη ταχύτητα ω.



(α)



(β)

Σχήμα 4.10 : Ισοδύναμο κύκλωμα για το δυναμικό μοντέλο της μηχανής σε περιστρεφόμενο πλαίσιο με αυθαίρετη ταχύτητα. Στο Σχήμα φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα: (α) εγκάρσιου άξονα q και (β) ευθέως άξονα d.

4.8.3.1 Δυναμικό μοντέλο σε στατό πλαίσιο αναφοράς (εξισώσεις Stanley)

Για να περιγραφεί το δυναμικό μοντέλο της μηχανής επαγωγής, θα πρέπει να αναχθούν οι μεταβλητές του δρομέα και του στάτη σε ένα στατό πλαίσιο αναφοράς, που περιστρέφεται δηλαδή με μηδενική ταχύτητα ω = 0. [4.2] [4.4] [4.5]

Εξισώσεις για τις τάσεις του στάτη:
Οι εξισώσεις για τις τάσεις του στάτη σε στατό πλαίσιο αναφοράς δίνονται από τη σχέση:

$$v_{qs}^{s} = R_s i_{qs}^{s} + \frac{d\lambda_{qs}^{s}}{dt}$$
$$v_{ds}^{s} = R_s i_{ds}^{s} + \frac{d\lambda_{ds}^{s}}{dt} \tag{4.58}$$

Εξισώσεις για τις τάσεις του δρομέα:
Εάν αναχθούν οι μεταβλητές του δρομέα σε στατό πλαίσιο (μηδενική ταχύτητα περιστροφής), οι εξισώσεις που προκύπτουν είναι οι εξής:

$$v_{qr}^{s} = R_r i_{qr}^{s} + \frac{d\lambda_{qr}^{s}}{dt} - \omega_r \lambda_{dr}^{s}$$
$$v_{dr}^{s} = R_r i_{dr}^{s} + \frac{d\lambda_{dr}^{s}}{dt} + \omega_r \lambda_{qr}^{s} \tag{4.59}$$

Στην περίπτωση κινητήρα επαγωγής βραχυκυκλωμένου κλωβού οι τάσεις είναι $v_{qr}^{s} = 0$ και $v_{dr}^{s} = 0$

Τελικά προκύπτει το δυναμικό μοντέλο της μηχανής σε μορφή πίνακα:

$$\begin{bmatrix} v_{qs}^{s} \\ v_{ds}^{s} \\ v_{qr}^{s} \\ v_{dr}^{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & -\omega_e \cdot L_m & pL_m \\ p \cdot L_m & -\omega_r \cdot L_m & R_r + pL_r & \omega_r \cdot L_r^{'} \\ \omega_r \cdot L_m & pL_m & \omega_r \cdot L_r^{'} & R_r + pL_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{qs}^{s} \\ i_{ds}^{s} \\ i_{qr}^{s} \\ i_{dr}^{s} \end{bmatrix}$$

4.8.3.2 Δυναμικό μοντέλο σε σύγχρονα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (εξισώσεις Kron)

Στη συνέχεια, για την παρουσίαση του δυναμικού μοντέλου της μηχανής, θεωρείται ότι οι ποσότητες του δρομέα είναι ανηγμένες στο στάτη και στις παραπάνω εξισώσεις παραλείπεται ο τόνος (‘) στις μεταβλητές του δρομέα. Για να περιγραφεί το δυναμικό αυτό μοντέλο της μηχανής επαγωγής, θα πρέπει να αναχθούν οι μεταβλητές του δρομέα και του στάτη σε ένα πλαίσιο αναφοράς που περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. [4.2] [4.3] [4.5]

Εξισώσεις για τις τάσεις του στάτη:
Οι εξισώσεις για τις τάσεις του στάτη σε στατό πλαίσιο αναφοράς δίνονται από τη σχέση:

$$v_{qs}^{s} = R_s i_{qs}^{s} + \frac{d\lambda_{qs}^{s}}{dt}$$
$$v_{ds}^{s} = R_s i_{ds}^{s} + \frac{d\lambda_{ds}^{s}}{dt} \tag{4.60}$$

όπου λ_{qs}^{s} και λ_{ds}^{s} οι πεπλεγμένες μαγνητικές ροές του στάτη στους άξονες q και d αντίστοιχα.

Με βάση τους μετασχηματισμούς που έχουν προαναφερθεί, οι μεταβλητές που αναφέρονται στο στατό πλαίσιο αναφοράς, μετασχηματίζονται σε ισοδύναμες μεταβλητές που αναφέρονται σε ένα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς με τη σύγχρονη ταχύτητα.

Οι εξισώσεις των τάσεων του στάτη σε σύγχρονα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς δίνονται:

$$\begin{aligned} v_{qs}^{e} &= R_s i_{qs}^{e} + \frac{d\lambda_{qs}^{e}}{dt} + \omega_e \lambda_{ds}^{e} \\ v_{ds}^{e} &= R_s i_{ds}^{e} + \frac{d\lambda_{ds}^{e}}{dt} - \omega_e \lambda_{qs}^{e} \end{aligned} \tag{4.61}$$

Εξισώσεις για τις τάσεις του δρομέα :

Έστω ότι ο δρομέας της μηχανής κινείται με ταχύτητα ω_r , οι εξισώσεις των τάσεων του δρομέα της μηχανής, θα έχουν ως εξής:

$$\begin{aligned} v_{qr}^{r} &= R_r i_{qr}^{r} + \frac{d\lambda_{qr}^{r}}{dt} \\ v_{dr}^{r} &= R_r i_{dr}^{r} + \frac{d\lambda_{dr}^{r}}{dt} \end{aligned} \tag{4.62}$$

στις οποίες όλες οι μεταβλητές είναι ανηγμένες στον δρομέα.

Με βάση και πάλι τους μετασχηματισμούς που έχουν προαναφερθεί, οι μεταβλητές που αναφέρονται στο πλαίσιο αναφοράς που περιστρέφεται με την ταχύτητα του δρομέα, μετασχηματίζονται σε ισοδύναμες μεταβλητές που αναφέρονται σε ένα περιστρεφόμενο με τη σύγχρονη ταχύτητα πλαίσιο αναφοράς.

Οι εξισώσεις των τάσεων του δρομέα σε σύγχρονα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς δίνονται:

$$\begin{aligned} v_{qr}^{e} &= R_r i_{qr}^{e} + \frac{d\lambda_{qr}^{e}}{dt} + (\omega_e - \omega_r)\lambda_{dr}^{e} \\ v_{dr}^{e} &= R_r i_{dr}^{e} + \frac{d\lambda_{dr}^{e}}{dt} - (\omega_e - \omega_r)\lambda_{qr}^{e} \end{aligned} \tag{4.63}$$

Στην περίπτωση κινητήρα επαγωγής βραχυκυκλωμένου κλωβού, οι τάσεις v_{qr}^{e} και v_{dr}^{e} είναι μηδέν, δηλαδή $v_{qr}^{e} = 0$ και $v_{dr}^{e} = 0$.

Από τα παραπάνω, τελικά προκύπτει το δυναμικό μοντέλο της μηχανής σε σύγχρονα περιστρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς σε μορφή πίνακα:

$$\begin{bmatrix} v_{qs}{}^{e} \\ v_{ds}{}^{e} \\ v_{qr}{}^{e} \\ v_{dr}{}^{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & \omega_e \cdot L_s & pL_m & \omega_e L_m \\ -\omega_e \cdot L_s & R_s + pL_s & -\omega_e \cdot L_m & pL_m \\ p \cdot L_m & (\omega_e - \omega_r) \cdot L_m & R_r + pL_r & (\omega_e - \omega_r) \cdot L_r' \\ -(\omega_e - \omega_r) \cdot L_m & pL_m & -(\omega_e - \omega_r) \cdot L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{qs}{}^{e} \\ i_{ds}{}^{e} \\ i_{qr}{}^{e} \\ i_{dr}{}^{e} \end{bmatrix}$$

Για μηχανή επαγωγής βραχυκυκλωμένου κλωβού οι τάσεις του δρομέα είναι μηδενικές, δηλαδή v_{qr} =0 και v_{dr} =0.

Από τις εξισώσεις φαίνεται ότι:

1. Γνωρίζοντας τις τάσεις του στάτη και τη σύγχρονη ταχύτητα, μπορούν εύκολα να υπολογιστούν τα ρεύματα του δρομέα και του στάτη της μηχανής.
2. Αντιστρόφως γνωρίζοντας τα ρεύματα του στάτη και τη σύγχρονη ταχύτητα, μπορούν να υπολογιστούν οι τάσεις του στάτη και τα ρεύματα του δρομέα.

Η ταχύτητα του δρομέα ω_r δεν είναι σταθερή και προκύπτει από τη σχέση:

$$T_e = T_L + J\frac{d\omega_m}{dt} = T_L + \frac{2}{P}J\frac{d\omega_r}{dt} \tag{4.64}$$

όπου

- T_L Τη ροπή του φορτίου
- J η ροπή αδράνειας του συστήματος δρομέα-φορτίου
- ω_m η μηχανική ταχύτητα περιστροφής του δρομέα που μετατρέπεται σε ηλεκτρική με τη βοήθεια της σχέσης :

$$\deg_{(\eta\lambda\varepsilon\kappa\tau\rho)} = \frac{P}{2}\deg_{(\mu\eta\chi\alpha\nu)} \tag{4.65}$$

4.9 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Ο βαθμός απόδοσης του τριφασικού επαγωγικού κινητήρα, εκφράζει την ικανότητά του να μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια εισόδου σε μηχανική. Κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας, ένα ποσοστό της ισχύος εισόδου καταναλώνεται από τον κινητήρα, με αποτέλεσμα την ανύψωση της θερμοκρασίας του. Αυτό το ποσοστό αντιπροσωπεύει τις απώλειες της μηχανής, οι οποίες πρέπει να είναι οι ελάχιστες δυνατές. Η ισορροπία ισχύος σε έναν επαγωγικό κινητήρα καθώς και σε οποιαδήποτε άλλη μηχανή, μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$P_{out} = P_{in} - P_{losses} \tag{4.66}$$

Η ισχύς εξόδου έχει τη μορφή τριφασικού συστήματος τάσεων και ρευμάτων:

$$P_{out} = \sqrt{3}V_l \cdot I_l \cos\varphi \tag{4.67}$$

Οι ολικές απώλειες των επαγωγικών κινητήρων απαρτίζονται από τις παρακάτω επιμέρους συνιστώσες:

$$P_{losses} = P_{statorCu} + P_{iron} + P_{rotorCu} + P_{friction+air} + P_{stray} \tag{4.68}$$

1.Απώλειες χαλκού ή ωμικές απώλειες *(copper, winding losses).*

Οι απώλειες χαλκού οφείλονται στη ροή των ρευμάτων από τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα. Οι απώλειες χαλκού στο στάτη ορίζονται από τη σχέση:

$$P_{statorCu} = 3I_1^2 \cdot R_1 \tag{4.69}$$

και στο δρομέα από τη σχέση:

$$P_{rotorCu} = 3I_r^2 R_r \tag{4.70}$$

Οι ολικές απώλειες χαλκού είναι ίσες με το άθροισμα των απωλειών στο στάτη και το δρομέα. Οι απώλειες χαλκού εξαρτώνται από το μέγεθος των αντιστάσεων των τυλιγμάτων και το μέγεθος των ρευμάτων στο στάτη I_1 και το δρομέα I_r, τα οποία μεγέθη είναι συνάρτηση της ροπής του φορτίου. Οι απώλειες χαλκού στο στάτη και το δρομέα συμβάλλουν κατά 33–40% και 15–22% αντίστοιχα, στις ολικές απώλειες των συμβατικών επαγωγικών κινητήρων υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας.

2.Απώλειες σιδήρου ή μαγνητικές απώλειες *(core, iron losses)*.

Οι απώλειες σιδήρου προκύπτουν από το άθροισμα των απωλειών υστέρησης και δινορευμάτων στο στάτη και το δρομέα. Οι απώλειες σιδήρου στο δρομέα είναι σημαντικά μικρότερες από εκείνες στο στάτη, εξαιτίας της μικρότερης συχνότητας. Οι απώλειες σιδήρου αποτελούν τη δεύτερη σημαντικότερη συνιστώσα των ολικών απωλειών, με ποσοστό περίπου 20%. Στο ισοδύναμο κύκλωμα οι μαγνητικές απώλειες μοντελοποιούνται με μια αντίσταση R_m σε παράλληλη σύνδεση με την αντίδραση μαγνήτισης. Η τιμή της αντίστασης απωλειών σιδήρου, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{iron} = \frac{3E_1^2}{R_m} \tag{4.71}$$

3.Μηχανικές απώλειες (mechanical losses).

Οι μηχανικές απώλειες $P_{frict+air}$ περιλαμβάνουν τις *απώλειες τριβών (friction),* λόγω της περιστροφής του άξονα και τη συνιστώσα *αερισμού (windage)* από τη λειτουργία του ανεμιστήρα. Οι απώλειες τριβών–αερισμού, μεταβάλλονται προσεγγιστικά ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας.

$$P_{frict+air} = C_{fa} \cdot n_r^2 \tag{4.72}$$

όπου C_{fa} είναι ο συντελεστής μηχανικών απωλειών. Οι μηχανικές απώλειες αποτελούν το 8–10% των ολικών απωλειών στο ονομαστικό φορτίο.

4. ***Κατανεμημένες απώλειες (stray losses)***

Πρόκειται για πρόσθετες απώλειες της μηχανής, οι οποίες οφείλονται στην αύξηση της ροής σκέδασης με το φορτίο και στις υψηλής συχνότητας διακυμάνσεις της ροής αυτής. Ο προσδιορισμός των κατανεμημένων απωλειών P_{stray} είναι εξαιρετικά δύσκολος. Συνήθως λαμβάνονται ίσες με το 1% της ισχύος εξόδου της μηχανής στη λειτουργία με το ονομαστικό φορτίο. Οι κατανεμημένες απώλειες αποτελούν το 8–20% των ολικών απωλειών ανάλογα με την ιπποδύναμη του κινητήρα.

Η τριφασική μεταφερόμενη ισχύς από το δρομέα στο στάτη μέσω του διακένου μπορεί να υπολογιστεί μέσω της εξίσωσης:

$$P_{airgap} = \sqrt{3}V_l \cdot I_l \cdot \cos\varphi + 3I_1^2 R_1 + \frac{3I_1^2}{R_m} \tag{4.73}$$

Όμως το μοναδικό στοιχείο του κυκλώματος όπου είναι δυνατό να καταναλώνεται η ισχύς διακένου είναι η αντίσταση R_2/s . Οπότε η εξίσωση της ισχύς του διακένου γίνεται:

$$P_{airgap} = 3I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s} \tag{4.74}$$

Οι απώλειες χαλκού στο δρομέα είναι ίσες με το γινόμενο της ισχύος διακένου επί την ολίσθηση:

$$P_{r\,otorCu} = s \cdot P_{airgap} \tag{4.75}$$

Μετά την αφαίρεση των απωλειών χαλκού στο στάτη, των απωλειών σιδηρού και των απωλειών χαλκού στο δρομέα από την ισχύ εισόδου του κινητήρα, η ισχύς που απομένει μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική μορφή. Αυτή η ισχύς που μερικές φορές ονομάζεται και αναπτυσσόμενη ισχύς, δίνεται από τη σχέση :

$$P_{converted} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} - 3I_2^2 \tag{4.76}$$

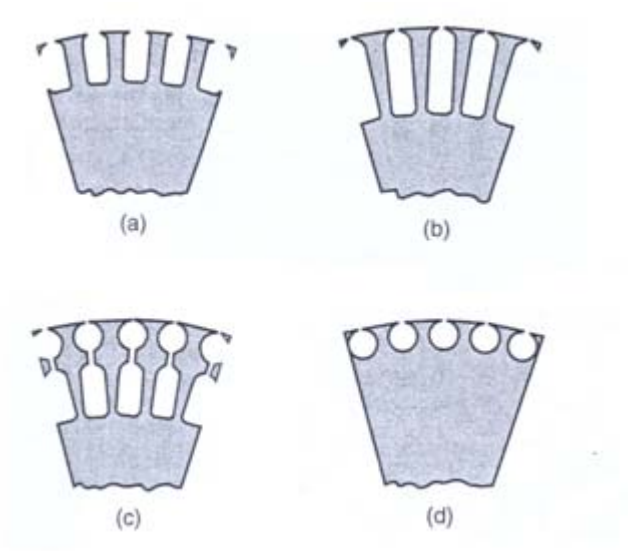
Η οποία απλοποιείται και γίνεται:

$$P_{converted} = P_{mec} = 3I_2^2 \cdot R_2 \frac{1-s}{s} = (1-s) \cdot P_{airgap} \tag{4.77}$$

4.10 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Κλάσεις των Επαγωγικών Κινητήρων

Με τη μεταβολή των χαρακτηριστικών του δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα είναι δυνατή η υλοποίηση μεγάλης ποικιλίας χαρακτηριστικών ροπής-ταχύτητας. Με σκοπό να βοηθήσουν τη βιομηχανία στην επιλογή των κατάλληλων κινητήρων σε διαφορετικές εφαρμογές και για όλο το εύρος ισχύος, η NEMA (**N**ational **E**lectrical **M**anufacturers **A**ssociation) στις ΗΠΑ και η International Electromechanical Commission-ICE) στην Ευρώπη, έχουν θεσπίσει μια σειρά από τυποποιημένες σχεδιάσεις κινητήρων με διαφορετικές χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας. Αυτές οι τυποποιημένες σχεδιάσεις ονομάζονται κλάσεις σχεδίασης (design classes) και ένας συγκεκριμένος κινητήρας συνήθως αναφέρεται ως κινητήρας κλάσης Χ.



Σχήμα 4.10 : Δυναμοελάσματα δρομέα [4.7]

Στο Σχήμα 4.10 φαίνονται τα δυναμοελάσματα ενός δρομέα και μπορεί να παρατηρηθεί η διατομή των ράβδων στο δρομέα.
(α) Εδώ οι ράβδοι είναι αρκετά μεγάλες και τοποθετούνται κοντά στην επιφάνεια του δρομέα. Μια τέτοια σχεδίαση παρουσιάζει μικρή αντίσταση (λόγω της μεγάλης διατομής των ράβδων) και μικρή αντίσταση διαρροής (λόγω της θέσης των ράβδων κοντά στο στάτη). Αφού η αντίσταση του δρομέα είναι μικρή, η ροπή ανατροπής εμφανίζεται σε μια ταχύτητα πολύ κοντά στη σύγχρονη και ο κινητήρας είναι πολύ αποδοτικός. Η ροπή εκκίνησης θα είναι πολύ μικρή και το ρεύμα εκκίνησης πολύ μεγάλο. Αυτή η μέθοδος σχεδιασμού ονομάστηκε από την NEMA κλάση σχεδίασης A.

(β) Στους κινητήρες με *κλάση B*, η μεταβολή της αντίστασης του δρομέα με την ολίσθηση, επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας το δρομέα με *βαθιά αυλάκια*. Στην ονομαστική λειτουργία, όπου η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων στο δρομέα είναι μικρή, το ρεύμα ρέει ομοιόμορφα σ' όλη τη διατομή των ράβδων. Έτσι, η ενεργός διατομή των ράβδων είναι μεγάλη και η αντίσταση του δρομέα μικρή, όπως στους κινητήρες κλάσης A. Κατά την εκκίνηση, όπου η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων είναι μεγάλη, οι αντιδράσεις σκέδασης των ράβδων είναι υψηλές. Το ρεύμα του δρομέα ρέει μόνο από τις περιοχές των ράβδων που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του δρομέα, οι οποίες έχουν μικρές αντιδράσεις. Με τον τρόπο αυτό η ενεργός διατομή των ράβδων μειώνεται και η αντίσταση του δρομέα εμφανίζεται αυξημένη κατά την εκκίνηση, όπως στους κινητήρες κλάσης D.

(γ) Στους κινητήρες *κλάσης C*, η μεταβολή της αντίστασης του δρομέα με την ταχύτητα είναι εντονότερη και επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας το δρομέα με *διπλό κλωβό*. Ο κινητήρας φέρει ένα τύλιγμα κλωβού, το οποίο αποτελείται από ράβδους μεγάλης διατομής τοποθετημένες στο εσωτερικό του δρομέα. Ένας δεύτερος ανεξάρτητος κλωβός από ράβδους μικρής διατομής, βρίσκεται στην επιφάνεια του δρομέα. Στην κανονική λειτουργία του κινητήρα, το ρεύμα του δρομέα ρέει και από τα δύο τυλίγματα κλωβού και ο κινητήρας εμφανίζει μικρή αντίσταση στο δρομέα. Κατά την εκκίνηση, το ρεύμα κυκλοφορεί κυρίως από το εξωτερικά τοποθετημένο τύλιγμα κλωβού, με την υψηλή αντίσταση. Το μειονέκτημα των κινητήρων με διπλό κλωβό είναι το μεγαλύτερο κόστος κατασκευής τους, σε σχέση με τις υπόλοιπους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα.
(δ) Στους κινητήρες *κλάσης D*, οι ράβδοι του κλωβού βρίσκονται και πάλι κοντά στην επιφάνεια του δρομέα αλλά έχουν μικρή διατομή. Επειδή η διατομή των ράβδων είναι μικρή, η αντίσταση του δρομέα είναι σχετικά μεγάλη. Ακόμα, επειδή οι ράβδοι βρίσκονται κοντά

στο στάτη, η αντίσταση διαρροής του δρομέα είναι και πάλι μικρή. Αυτός ο κινητήρας μοιάζει με επαγωγικό κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα που διαθέτει κάποια πρόσθετη εξωτερική αντίσταση. Λόγω της μεγάλης αντίστασης του δρομέα, η ροπή ανατροπής του συγκεκριμένου κινητήρα εμφανίζεται σε κάποιο σημείο με μεγάλη ολίσθηση, ενώ η ροπή εκκίνησης είναι αρκετά υψηλή. Ο κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού που διαθέτει την παραπάνω δομή, ονομάστηκε από την NEMA κινητήρας κλάσης D.

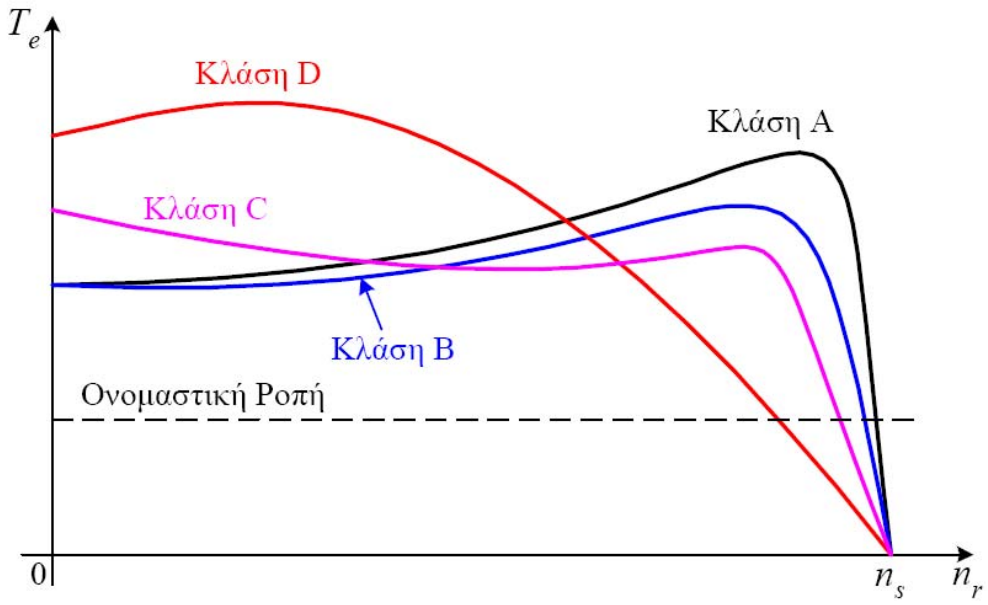
Κλάση σχεδίασης A :Οι κινητήρες κλάσης A είναι κινητήρες με τυποποιημένη σχεδίαση που παρουσιάζουν κανονική ροπή εκκίνησης, κανονικό ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση. Η ολίσθηση του κινητήρα κλάσης A στη λειτουργία με πλήρες φορτίο θα πρέπει να είναι μικρότερη από 5% και μικρότερη από αυτή του κινητήρα κλάσης B που παρουσιάζει τις αντίστοιχες προδιαγραφές. Η ροπή ανατροπής είναι ίση με 200%-300% της ροπής κατά την πλήρη φόρτιση και αντιστοιχεί σε κάποια μικρή τιμή της ολίσθησης (<20%). Η ροπή εκκίνησης είναι τουλάχιστον ίση με την ονομαστική ροπή στους μεγάλους κινητήρες και ίση ή μεγαλύτερη από το 200% της ονομαστικής ροπής στους μικρούς κινητήρες. Το σημαντικότερο πρόβλημα αυτής της κλάσης σχεδίασης, είναι το ιδιαιτέρα υψηλό κρουστικό ρεύμα κατά την εκκίνηση. Τα τυπικά ρεύματα εκκίνησης για τέτοιους κινητήρες είναι 500%-800% του ονομαστικού ρεύματος. Στους κινητήρες τέτοιου είδους με μέγεθος πάνω 7,5hp θα πρέπει να χρησιμοποιείται κάποια μέθοδος μείωσης της τάσης κατά την εκκίνηση, με σκοπό το σύστημα ισχύος στο οποίο συνδέονται, να προστατεύεται από μεγάλες πτώσεις τάσης. Στο παρελθόν οι κινητήρες με σχεδίαση κλάσης A αποτελούσαν την καθιερωμένη σχεδίαση για εφαρμογές κάτω από τους 7,5hp και πάνω από τους 200hp. Όμως στις μέρες μας έχουν αντικατασταθεί από τους κινητήρες κλάσης B.

Κλάση σχεδίασης B :Οι κινητήρες κλάσης B έχουν κανονική ροπή εκκίνησης, μικρότερο ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση. Ένας τέτοιος κινητήρας παράγει σχεδόν την ιδία ροπή με τον κινητήρα κλάσης A, ενώ το ρεύμα εκκίνησης του είναι περίπου 25% μικρότερο. Η ροπή ανατροπής είναι μεγαλύτερη ή ίση με το 200% της ονομαστικής ροπής φορτιού αλλά μικρότερη από αυτή των κινητήρων κλάσης A λόγω της αυξημένης αντίδρασης δρομέα. Και εδώ η ολίσθηση στη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο παραμένει χαμηλή (<5%). Οι εφαρμογές αυτών κινητήρων είναι παρόμοιες με αυτές των κινητήρων κλάσης A, μόνο που οι κινητήρες κλάσης B προτιμώνται εξαιτίας του μικρότερου ρεύματος εκκίνησης. Στις σύγχρονες εφαρμογές οι κινητήρες κλάσης B έχουν πια αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τους κινητήρες κλάσης A.

Κλάση σχεδίασης C : Οι κινητήρες κλάσης C παρουσιάζουν μεγάλη ροπή εκκίνησης, μικρό ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση στη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο (<5%). Η ροπή ανατροπής εδώ είναι ελαφρά μικρότερη από αυτή των κινητήρων κλάσης A, ενώ η ροπή εκκίνησης φτάνει το 250% της ροπής υπό πλήρες φορτίο. Οι κινητήρες αυτού του είδους κατασκευάζονται με διπλό δρομέα και έτσι είναι ακριβότεροι από τους κινητήρες των προηγούμενων κλάσεων. Τέλος αυτοί οι κινητήρες συνήθως χρησιμοποιούνται σε φορτία που απαιτούν υψηλή ροπή εκκίνησης, όπως οι φορτισμένες αντλίες, οι συμπιεστές και οι μεταφορείς.

Κλάση σχεδίασης D : Οι κινητήρες κλάσης D έχουν πάρα πολύ μεγάλη ροπή εκκίνησης (πάνω από 275% της ονομαστικής ροπής) και μικρό ρεύμα εκκίνησης αλλά παρουσιάζουν υψηλή ολίσθηση στη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο. Ουσιαστικά πρόκειται για απλούς επαγωγικούς κινητήρες κλάσης A, που διαθέτουν όμως ράβδους μικρότερης διατομής κατασκευασμένες από υλικό μεγαλύτερης αντίστασης. Η μεγάλη αντίσταση στο δρομέα μετακινεί τη μέγιστη ροπή σε μια πολύ μεγάλη ταχύτητα. Είναι επίσης δυνατή η μετακίνηση της μέγιστης ροπής στη μηδενική ταχύτητα (ολίσθηση 100%). Η ολίσθηση αυτών των κινητήρων στην πλήρη φόρτιση είναι αρκετά υψηλή λόγω της μεγάλης αντίστασης δρομέα που διαθέτουν. Η τυπική τιμή αυτής της ολίσθησης είναι 7%-11%, αλλά μπορεί να φτάσει στο 17% ή και πιο πάνω. Αυτού του είδους οι κινητήρες έχουν εφαρμογή στην επιτάχυνση

φορτίων με εξαιρετικά μεγάλη αδράνεια, όπως η ιδιαίτερα μεγάλοι σφόνδυλοι που χρησιμοποιούνται σε διατρητικές πρέσες ή ψαλίδια.



Σχήμα 4.11 : Διάγραμμα ροπής- στροφών κινητήρων για τις διάφορες κλάσεις σχεδίασης

4.11 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[4.1] M. G Say, "Alternating Current Machines", Longman Scientific and Technical, Fifth Edition, 1983.

[4.2] Bimal K. Bose, "Modern Power Electronics and AC Drives", Prentice Hall PTR, 2002.

[4.3] Paul C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill, 1987.

[4.4] Muhammad H. Rashid, "Power Electronics Handbook", Academic Press, 2001.

[4.5] M. Jagne, I. Ludke, L. Yiqiang, T. Arias, "Evaluation of Vector and Direct Torque Controlled Strategies for Cage Rotor Induction Motor Drives", Power Elecronics and Motion Control Conference PIEMC, 2000, Vol.1, p. 452-457.

[4.6] Chapman, "Electric Machinery Fundamentals", Fourth Edition, McGraw-Hill, 2005.

[4.7] M.Godoy Simoes, Felix A. Farret, "Renewable Energy Systems, Design and Analysis", CRC Press, 2004.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ηλεκτρικές μηχανές επαγωγής αποτελούν την κινητήριο δύναμη στην πλειονότητα των σύγχρονων βιομηχανικών εφαρμογών και συνιστούν την ειδική επιλογή για εφαρμογές μεταβλητής ταχύτητας σε ένα μεγάλο φάσμα ισχύων που ξεκινούν από μερικά κλάσματα του Watt και εκτείνονται μέχρι χιλιάδες ή και εκατομμύρια Watts. Οι εφαρμογές τους λοιπόν είναι πάμπολλες και περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων ηλεκτρικά τρένα, λεωφορεία (τρόλεϊ), πλοία, εσχάτως δε και αυτοκίνητα από σχεδόν όλες τις μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες, εφαρμογές ανύψωσης (γερανοί, ανελκυστήρες κ.α.), μεταφοράς (ταινιόδρομοι κ.α.), περιστροφής (αντλίες, φτερωτές, εργαλειομηχανές, οικιακές συσκευές κ.α.), ρομποτικές διατάξεις, συστήματα ανεμογεννητριών και ποικίλες άλλες εφαρμογές. Επομένως, όπως ίσως θα έχει ήδη διαφανεί, το ενδιαφέρον για τον έλεγχο τέτοιων συστημάτων είναι τεράστιο όχι μόνο λόγω του πλήθους και του μεγέθους των εφαρμογών τους αλλά κυρίως λόγω του ρόλου και της σημασίας αυτών στην καθημερινή ζωή όλων μας. Επιπροσθέτως, το γεγονός ότι τα συστήματα ελέγχου μεταβλητής ταχύτητας παρουσιάζουν κατά το δυνατόν οικονομική λειτουργία με βελτιωμένα χαρακτηριστικά, κερδίζει όλο και περισσότερη προσοχή τα τελευταία χρόνια, λόγω των οικονομικών και περιβαλλοντικών ωφελειών που αυτό συνεπάγεται.

Ο έλεγχος των ηλεκτρικών κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος είναι μια σαφώς πολυπλοκότερη διαδικασία συγκρινόμενη με τον έλεγχο των κινητήρων συνεχούς ρεύματος, ιδιαίτερα μάλιστα όταν απαιτείται υψηλή απόδοση. Οι κυριότεροι λόγοι που αυξάνουν τη δυσκολία του ελέγχου είναι: η ανάγκη για έλεγχο της συχνότητας και του πλάτους της τάσης του αντιστροφέα με την ελάχιστη δυνατή αρμονική παραμόρφωση και τη βέλτιστη δυνατή απόδοση, η πρόβλεψη της πολύπλοκης δυναμικής συμπεριφοράς των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, η μεταβολή κάποιων κρίσιμων παραμέτρων της μηχανής κατά τη λειτουργία, η δυσκολία επεξεργασίας των σημάτων ανάδρασης στα οποία συνυπάρχουν αρμονικές συνιστώσες, θόρυβος κ.α. Συνεπώς ο μηχανικός που επιθυμεί να προχωρήσει στον έλεγχο ενός ηλεκτρικού κινητήρα επαγωγής, θα πρέπει να κατέχει σε βάθος ένα ευρύ φάσμα γνώσεων, που απαραίτητα θα πρέπει να περιλαμβάνουν άρτια γνώση των χαρακτηριστικών και της λειτουργίας του ηλεκτρικού κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος, του αντιστροφέα πηγής τάσης ή και ρεύματος και της θεωρίας των γραμμικών και μη-γραμμικών συστημάτων αυτόματου ελέγχου.

Το παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνει τη θεωρητική παρουσίαση και θεμελίωση των τριών βασικότερων τεχνικών ελέγχου γενικού σκοπού για ηλεκτρικούς κινητήρες επαγωγής, που χρησιμοποιούνται σήμερα. Οι τεχνικές αυτές με την ιστορική σειρά παρουσίασης τους είναι, η τεχνική βαθμωτού ελέγχου (Scalar Control), η τεχνική διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό πεδίου (Vector Control-Field Orientation Control) και η τεχνική άμεσου ελέγχου ροπής και ροής (Direct Torque and Flux Control-DTFC). Οι παραπάνω τεχνικές είναι εξαιρετικά σημαντικές καθώς αποτελούν τον πυρήνα και τη βάση πάνω στην οποία εξελίχθηκαν και στηρίζονται σχεδόν όλες οι σύγχρονες Ευφυείς Τεχνικές ελέγχου όπως για παράδειγμα, ο προσαρμοστικός Έλεγχος (Adaptive Contol), ο έλεγχος με ασαφή λογική (Fuzzy Logic Control) και ο έλεγχος με τη βοήθεια νευρωνικών δικτύων (Neural Networks), οι οποίοι διενεργούνται στις περισσότερες μοντέρνες εφαρμογές με την ελάχιστη δυνατή χρήση αισθητήρων (Sensorless). Στη συνέχεια το κεφαλαίο αυτό ασχολείται με ασύγχρονους

τριφασικούς κινητήρες επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα, που οδηγούνται με τη βοήθεια τριφασικών αντιστροφέων πηγής τάσης, σε συνδεσμολογία γέφυρας και για τον έλεγχό τους χρησιμοποιείται μια από τις παραπάνω αναφερθείσες τεχνικές ελέγχου. Πριν όμως εκτενής ανάλυση όλων αυτών των μεθόδων, θα αναφερθούν συνοπτικά οι τρόποι ρύθμισης της ταχύτητας.

5.2 ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Όταν ο τριφασικός επαγωγικός κινητήρας τροφοδοτείται από μια πηγή συνεχούς τάσης και συχνότητας, στρέφεται με μία ταχύτητα η οποία είναι λίγο μικρότερη από τη σύγχρονη. Η μεταβολή της ταχύτητας ως προς τη σύγχρονη εξαρτάται από το φορτίο και είναι τόσο μεγαλύτερη, όσο υψηλότερη είναι η αντίσταση του δρομέα. Η λειτουργία όμως του κινητήρα με μειωμένη ταχύτητα, σημαίνει αύξηση της ολίσθησης και των απωλειών του χαλκού στο δρομέα, με συνέπεια τη μείωση του βαθμού απόδοσης.

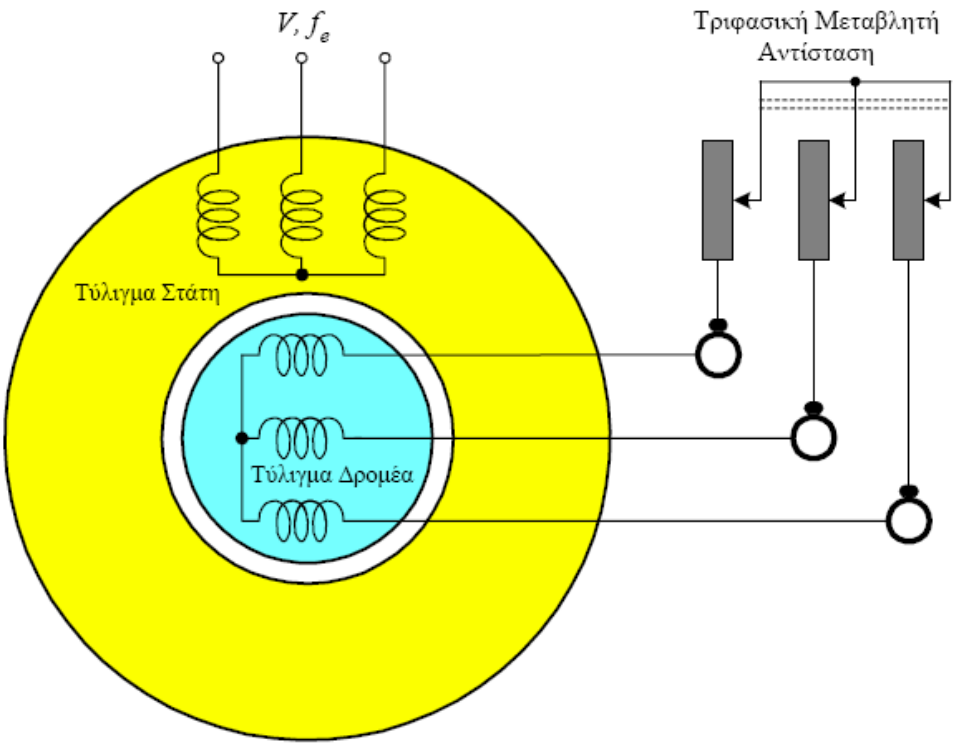
Ο έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

- Με τη ρύθμιση της ολίσθησης
- Με τη ρύθμιση της σύγχρονης ταχύτητας

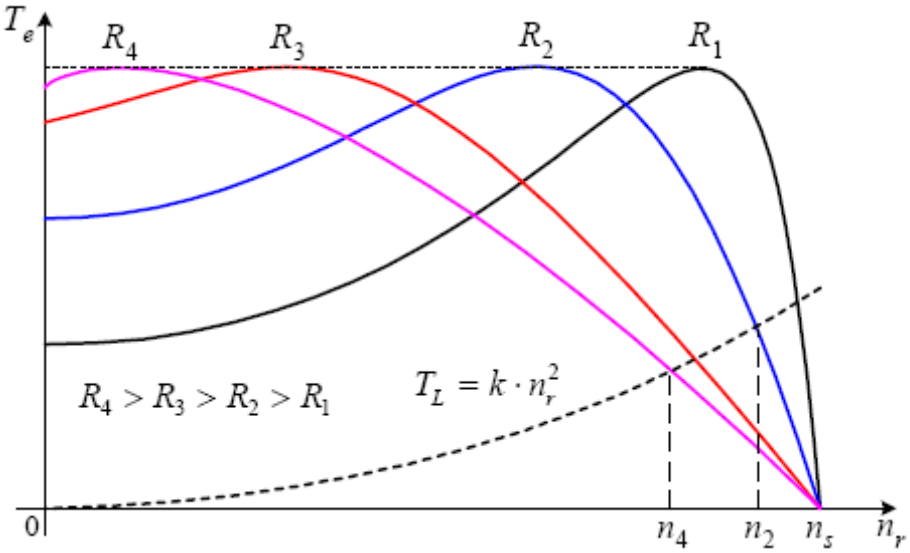
Η ρύθμιση της ολίσθησης, με δεδομένη ροπή φορτίου, επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της αντίστασης του δρομέα, στον κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα και με τον έλεγχο της τάσης τροφοδοσίας στον κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού. Η σύγχρονη ταχύτητα ρυθμίζεται είτε με τη μεταβολή του αριθμού των πόλων είτε με τη μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας, σύμφωνα με τη σχέση: $n_s = {120 f_e}/{P}$ (5.1)

5.2.1 Έλεγχος της ταχύτητας με τη ρύθμιση της αντίστασης του δρομέα

Η ταχύτητα των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα, ρυθμίζεται με την εισαγωγή μεταβλητών αντιστάσεων στο τύλιγμα του δρομέα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1. Με την εισαγωγή των εξωτερικών αντιστάσεων στο δρομέα, μεταβάλλεται η μορφή της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας του κινητήρα. Στο Σχήμα 5.2 εικονίζονται οι χαρακτηριστικές του κινητήρα για τρεις τιμές της αντίστασης του δρομέα, μαζί με τη χαρακτηριστική του φορτίου. Η ροπή του φορτίου μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας, όπως συμβαίνει στις αντλίες και τους ανεμιστήρες. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι, ότι ο βαθμός απόδοσης της διάταξης μειώνεται με τη μείωση της ταχύτητας, εξαιτίας των εξωτερικών αντιστάσεων.



Σχήμα 5.1 : Εισαγωγή μεταβλητών αντιστάσεων στο δρομέα, για τη ρύθμιση της ταχύτητας του κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα

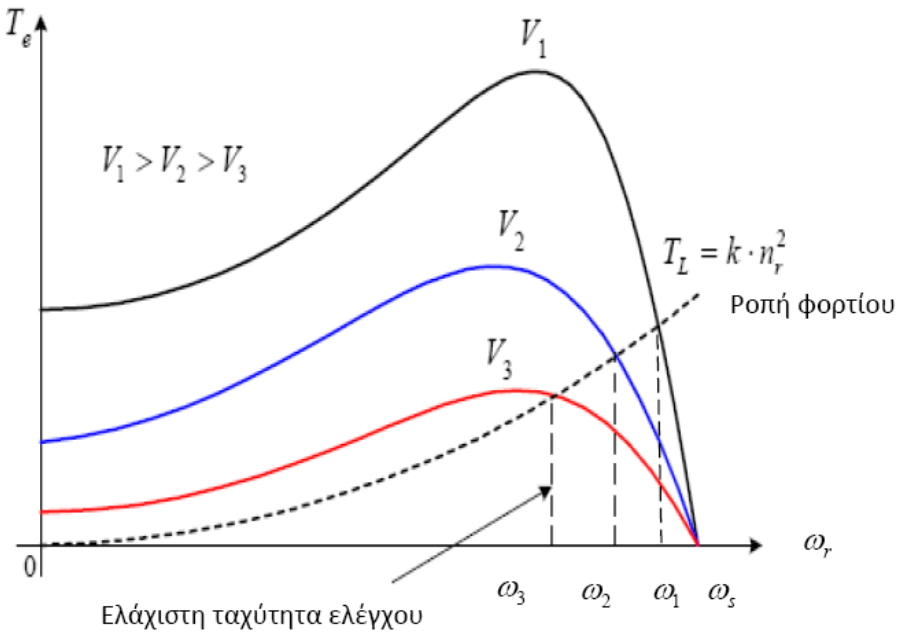


Σχήμα 5.2 : Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα, με τη μεταβολή της αντίστασης του δρομέα

5.2.2 Έλεγχος της ταχύτητας με τη ρύθμιση της τάσης του στάτη

Στους επαγωγικούς κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού, η ρύθμιση της ολίσθησης (ταχύτητας) επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας των τυλιγμάτων του στάτη. Η συχνότητα των τάσεων είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα του δικτύου. Καθώς η ροπή που αναπτύσσει ο επαγωγικός κινητήρας είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης του στάτη, οι χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας μεταβάλλονται όπως στο Σχήμα 5.3 , για διάφορες τιμές της τάσης. Η ροπή του φορτίου είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας. Η ταχύτητα του κινητήρα δεν μπορεί να μειωθεί σημαντικά ως προς τη σύγχρονη. Η ελάχιστη δυνατή ταχύτητα είναι η ω_3, η οποία αντιστοιχεί στη ροπή ανατροπής για την τάση V_3. Καθώς το ρεύμα του κινητήρα είναι ανάλογο της τάσης, ο λόγος ροπής προς ρεύμα, η μέγιστη ροπή, ο συντελεστής ισχύος και ο βαθμός απόδοσης, μειώνονται με τη μείωση της ταχύτητας. Επομένως ο έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων με τη ρύθμιση της τάσης του στάτη δεν είναι αποτελεσματικός.

Ο έλεγχος της τάσης του στάτη στους επαγωγικούς κινητήρες, επιτυγχάνεται με τους ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης (ac voltage controllers). Οι ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης χρησιμοποιούνται συνήθως στον έλεγχο της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων κλάσης D, σε εφαρμογές αντλιών και ανεμιστήρων, χρησιμοποιούνται ευρέως στην εκκίνηση των επαγωγικών κινητήρων όλων των κατηγοριών, οπότε ονομάζονται ομαλοί εκκινητές (soft starters).



Σχήμα 5.3 : Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, με τη μεταβολή της τάσης του στάτη

5.2.3 Έλεγχος της ταχύτητας με τη μεταβολή του αριθμού των πόλων

Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι αλλαγής του αριθμού των πόλων ενός επαγωγικού κινητήρα:

1. Η μέθοδος των διαδοχικών πόλων (consequent poles)
2. Πολλαπλά τυλίγματα στο στατη (multiple stator windings)
3. Διαμόρφωση πλάτους του πόλου (PAM)

Στη μέθοδο των διαδοχικών πόλων, με κάποιες απλές αλλαγές στη σύνδεση των ομάδων τυλίγματος του στάτη, ο αριθμός των πόλων μεταβάλλεται με ένα λόγο δύο προς ένα. Έτσι ο επαγωγικός κινητήρας έχει δύο ή τέσσερεις πόλους και σύγχρονη ταχύτητα 3000 rpm ή 1500 rpm αντίστοιχα.

Όταν ο λόγος δύο προς ένα στην ταχύτητα δεν είναι βολικός, τοποθετούνται στο στάτη περισσότερα από ένα τριφασικά τυλίγματα, με τον επιθυμητό αριθμό των πόλων. Ανάλογα με τη ζητούμενη ταχύτητα, τροφοδοτείται κάθε φορά το κατάλληλο τύλιγμα. Το μειονέκτημα των πολλαπλών τυλιγμάτων είναι, ότι αυξάνουν το κόστος του κινητήρα. Ακόμη, η μέθοδος των πολλαπλών τυλιγμάτων συνδυάζεται με τη μέθοδο των διαδοχικών πόλων, για τη λειτουργία κινητήρα σε περισσότερες ταχύτητες. Ο έλεγχος της ταχύτητας με τη μεταβολή του αριθμού των πόλων, εφαρμόζεται μόνο σε επαγωγικούς κινητήρες με βραχυκυκλωμένο κλωβό. Ο δρομέας των κινητήρων αυτών αναπτύσσει πάντα τόσους πόλους, όσοι είναι οι πόλοι του στάτη. Αυτό δεν ισχύει στους κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα, όπου το τύλιγμα του δρομέα αναπτύσσει ένα καθορισμένο αριθμό πόλων ανάλογα με την κατασκευή του. Η μέθοδος διαμόρφωσης πλάτους του πόλου είναι ένας τρόπος παραγωγής πολλαπλών πόλων με λόγο διαφορετικό από 2 προς 1. Για την κατασκευή ενός κινητήρα που να λειτουργεί σε δύο ταχύτητες κοντινές μεταξύ τους, προτιμάται πάντα η διαμόρφωση πλάτους του πόλου από τη μέθοδο των πολλαπλών τυλιγμάτων, επειδή έχει κόστος σχεδόν ίσο με τα τρία τέταρτα του κόστους δύο ξεχωριστών τυλιγμάτων.

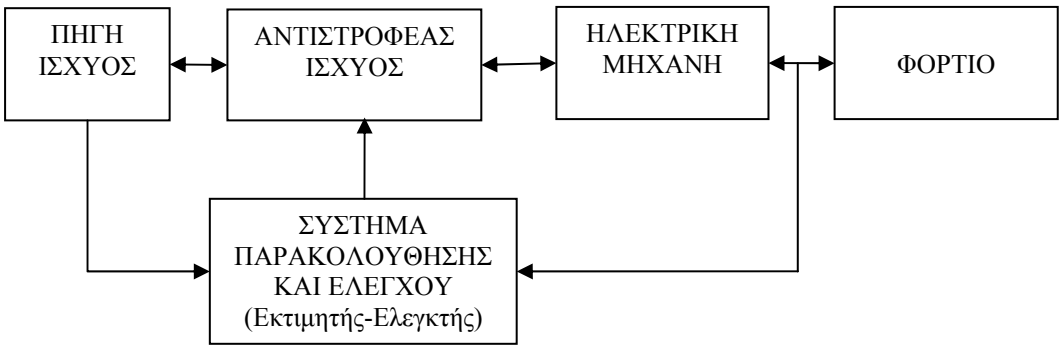
5.2.4 Έλεγχος της ταχύτητας με τη μεταβολή της συχνότητας

Αν η συχνότητα που εφαρμόζεται στο στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα μεταβληθεί, ο ρυθμός περιστροφής των μαγνητικών πεδίων n_{sync} μεταβάλλεται ανάλογα με τη μεταβολή της ηλεκτρικής συχνότητας. Η σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα στις ονομαστικές συνθήκες είναι γνωστή ως *βασική ταχύτητα (base speed)*. Με τον έλεγχο μεταβλητής συχνότητας, η ταχύτητα του κινητήρα είναι δυνατό να ρυθμίζεται πάνω και κάτω από τη βασική ταχύτητα. Μια προσεκτικά σχεδιασμένη συσκευή οδήγησης επαγωγικού κινητήρα με μεταβλητή συχνότητα, μπορεί να είναι ιδιαίτερα ευέλικτη. Η ρύθμιση της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα μπορεί να ξεκινά από ένα μικρό εύρος τιμών, 5% της βασικής ταχύτητας, και να φθάνει σε τιμές διπλάσιες της κανονικής ταχύτητας. Είναι σημαντικό να καθοριστούν κάποια όρια για την τάση και τη ροπή του κινητήρα κατά τη μεταβολή της ταχύτητάς του, ώστε η λειτουργία του να είναι ασφαλής.

Όταν ο κινητήρας περιστρέφεται με ταχύτητες μικρότερες της βασικής, θα πρέπει η τάση που εφαρμόζεται στο στάτη του κινητήρα να περιορίζεται, με σκοπό να είναι ασφαλής η λειτουργία του. Η τάση εισόδου του στάτη θα πρέπει να μειώνεται γραμμικά με τη μείωση της συχνότητας. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται *υποβιβασμός (derating)* της τάσης [5.1].

5.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

Οι τεχνικές ελέγχου των κινητήρων επαγωγής γίνονται ευκολότερα κατανοητές, παρατηρώντας το λειτουργικό διάγραμμα ηλεκτρικής κίνησης που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.4. Επιπλέον στο σχήμα αυτό φαίνονται τα επιμέρους υποσυστήματά του, τα οποία είναι: η πηγή ισχύος συνεχούς τάσης, ο τριφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης, η τριφασική ασύγχρονη ηλεκτρική μηχανή επαγωγής, το φορτίο και το σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου, που περιλαμβάνει τον εκτιμητή και τον ελεγκτή. Από αυτά, τα πρώτα τέσσερα συνιστούν το κύκλωμα ισχύος του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης, το οποίο παραμένει αμετάβλητο κατά τη μελέτη όλων ανεξαιρέτως των τεχνικών ελέγχου. Η βαθμίδα η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με τον χρησιμοποιούμενο αλγόριθμο ελέγχου είναι αυτή του Συστήματος Παρακολούθησης και Ελέγχου.



Σχήμα 5.4: Λειτουργικό Διάγραμμα Συστήματος Ηλεκτρικής

Το πρώτο στάδιο για τη μελέτη αυτού του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης, είναι η ανάπτυξη κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων, τα οποία θα περιγράφουν με επαρκή ακρίβεια τη συμπεριφορά του συστήματος που πρόκειται να ελεγχθεί. Στη συνέχεια με γνωστό το μαθηματικό μοντέλο (βλ. κεφάλαιο 4) του προς έλεγχο συστήματος, δηλαδή του κυκλώματος ισχύος, θα αναπτυχθούν και θα εφαρμοστούν ορισμένες από τις εξεταζόμενες τεχνικές ελέγχου και θα συγκριθούν τα αποτελέσματά τους. Η πηγή ισχύος του πραγματικού συστήματος είναι το τριφασικό σύστημα τάσεων του δικτύου, το οποίο στη συνέχεια ανορθώνεται με τη βοήθεια ενός ελεγχόμενου ανορθωτή και τροφοδοτεί τον αντιστροφέα.

5.3.1 Βαθμωτός Έλεγχος

Παραδοσιακά οι ηλεκτρικοί κινητήρες επαγωγής χρησιμοποιούνταν ευρύτατα σε βιομηχανικές εφαρμογές που απαιτούσαν σταθερή ταχύτητα περιστροφής. Η λειτουργία τους ήταν ιδιαίτερα απλή και απαιτούσε τροφοδοσία από μια πηγή εναλλασσόμενης τάσεως σταθερού πλάτους και συχνότητας. Στις εφαρμογές που απαιτούσαν μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής ο κανόνας ήταν η χρήση κινητήρων συνεχούς ρεύματος, οι οποίοι όμως παρά την απλότητα του ελέγχου τους παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα. Με την εισαγωγή προηγμένων τεχνικών ελέγχου με τη βοήθεια αντιστροφέων, οι κινητήρες επαγωγής επικράτησαν ολοκληρωτικά, τόσο σε εφαρμογές σταθερής όσο και σε εφαρμογές μεταβλητής ταχύτητας, καθώς πλέον τροφοδοτούνταν με τάση ελεγχόμενου πλάτους και συχνότητας.

Η τεχνική ελέγχου ενός κινητήρα επαγωγής, σε ανοιχτό βρόχο, με διατήρηση σταθερού λόγου τάσης τροφοδοσίας προς συχνότητα τροφοδοσίας εμπίπτει στη γενικότερη κατηγορία των βαθμωτών (μονόμετρων) τεχνικών ελέγχου.

Ο μονόμετρος ή βαθμωτός έλεγχος, όπως φανερώνει και η ονομασία του, συνίσταται στον έλεγχο μόνο του μέτρου (πλάτους) των ελεγχόμενων μεταβλητών, αγνοώντας τη συζευγμένη μορφή των εξισώσεων του μοντέλου του ελεγχόμενου συστήματος. Έτσι το μέτρο της τάσης τροφοδοσίας της μηχανής χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της μαγνητικής ροής εντός της μηχανής και η συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας ή ισοδύναμα η ολίσθηση χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ροπής της μηχανής και συνεπώς της ταχύτητάς της.

Αυτό όμως δεν είναι απόλυτα ορθό και ακριβές, αφού τόσο η ροπή όσο και η μαγνητική ροή, είναι αμφότερες συναρτήσεις τόσο της συχνότητας όσο και του πλάτους της τάσης τροφοδοσίας. Συγκεκριμένα αυξάνοντας τη συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας μεταβάλλεται η σύγχρονη ταχύτητα για τη μηχανή, δηλαδή η ταχύτητα περιστροφής του κύματος μαγνητικής ροής εντός της. Αυτό θεωρητικώς θα είχε ως αποτέλεσμα μια ανάλογη μεταβολή στην ταχύτητα του δρομέα της μηχανής. Στην πραγματικότητα όμως, η μεταβολή αυτή δεν

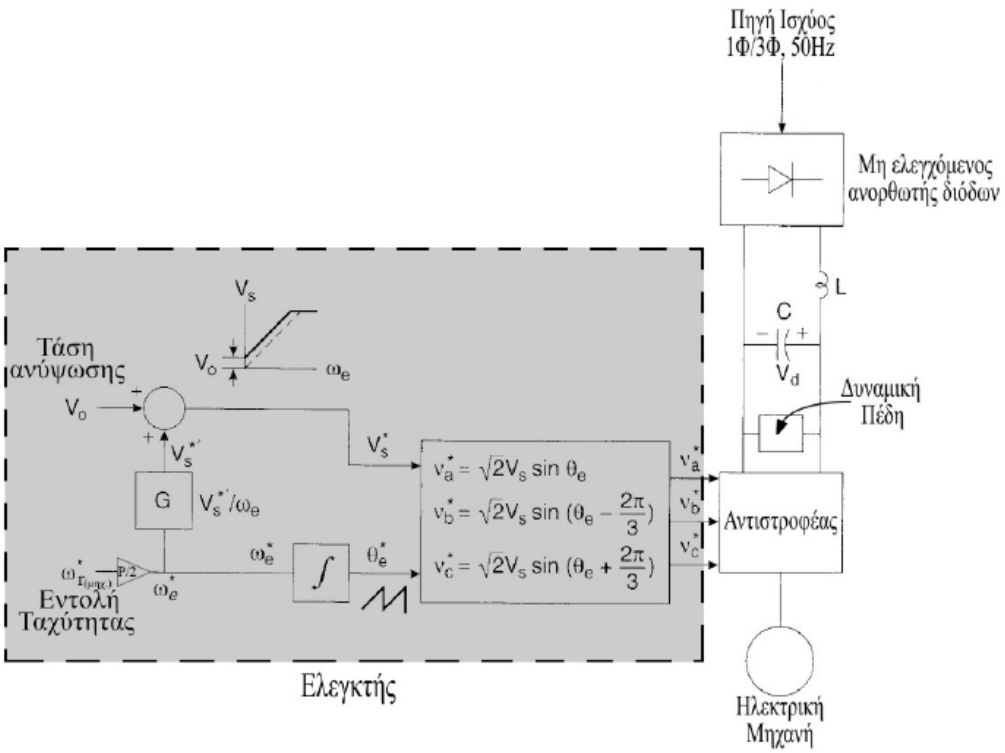
είναι η θεωρητικά αναμενόμενη, καθώς η μεταβολή της συχνότητας μεταβάλλει και τις επαγωγικές αντιδράσεις του στάτη και συνεπακόλουθα τα ρεύματα στάτη, μεταβάλλοντας τελικά και το πλάτος του κύματος της μαγνητικής ροής της μηχανής. Το αποτέλεσμα είναι ο έλεγχος να μην έχει τα αναμενόμενα αποτελέσματα και τα επιθυμητά χαρακτηριστικά, ενώ συχνά το σύστημα οδηγείται σε αστάθεια.

Συνεπώς η συζευγμένη μορφή των εξισώσεων του μοντέλου δεν επιτρέπει τον ταυτόχρονο έλεγχο της μαγνητικής ροής και της ροπής της ηλεκτρικής μηχανής επαγωγής. Για να αντιπαρέλθει τη δυσκολία αυτή ο βαθμωτός έλεγχος επιστρατεύει διάφορες μεθόδους, η σημαντικότερη και συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη από τις οποίες είναι η διατήρηση ενός σταθερού λόγου πλάτους τάσης τροφοδοσίας προς συχνότητα τάσης τροφοδοσίας κατά τον έλεγχο. Με τον τρόπο αυτό το ρεύμα του στάτη διατηρείται περίπου σταθερό (αγνοώντας την επίδραση της αντίστασης του στάτη) και επομένως επιτυγχάνεται, θεωρητικά, σταθερό πλάτος για το κύμα της μαγνητικής ροής εντός της μηχανής. Το γεγονός αυτό αφαιρεί ένα βαθμό ελευθερίας από το σύστημα ελέγχου, αφού ιδανικά το πλάτος της μαγνητικής ροής διατηρείται σταθερό και ίσο με το ονομαστικό. Επομένως είναι πλέον δυνατός ο ανεξάρτητος έλεγχος της ροπής και άρα της ταχύτητας της ηλεκτρικής μηχανής. Τονίζεται ότι τα ανωτέρω αποτελούν μια θεωρητική προσέγγιση του βαθμωτού ελέγχου με σταθερό λόγο τάσης προς συχνότητα τροφοδοσίας, η οποία θα αξιολογηθεί στις παρακάτω δύο περιπτώσεις:

5.3.1.1 Έλεγχος με σταθερό λόγο τάσης προς συχνότητα σε ανοικτό βρόχο

Ο έλεγχος με σταθερό λόγο τάσης προς συχνότητα, είναι αυτός που εκτελείται σε ανοικτό βρόχο. Αυτό σημαίνει ότι ανάλογα με την εντολή επιθυμητής ταχύτητας παράγεται από τον αλγόριθμο ελέγχου μια παλμοδότηση, η οποία έχει υπολογιστεί ότι θα οδηγήσει τη μηχανή στο επιθυμητό σημείο λειτουργίας για μια συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας της. Αν η κατάσταση λειτουργίας της μηχανής για οποιονδήποτε λόγο είναι διαφορετική από την προδιαγεγραμμένη, για την οποία έχει σχεδιαστεί ο έλεγχος, τα αποτελέσματά του δεν θα είναι ικανοποιητικά. Αυτό είναι ένα γενικό χαρακτηριστικό των συστημάτων που εφαρμόζουν έλεγχο σε ανοικτό βρόχο, αφού δεν διαθέτουν πληροφόρηση (ανάδραση) για την παρούσα κατάσταση του συστήματος αλλά τη θεωρούν γνωστή και δεδομένη. Επομένως εφαρμόζουν απλώς τις προσχεδιασμένες δράσεις ελέγχου χωρίς να έχουν μια ανατροφοδότηση του αποτελέσματός τους στην συμπεριφορά του κινητήρα.

Το διάγραμμα του ελέγχου με σταθερό λόγο τάσης τροφοδοσίας προς συχνότητα τροφοδοσίας σε ανοικτό βρόχο, φαίνεται στο Σχήμα 5.5, το οποίο αποτελεί μια ειδική περίπτωση του Σχήματος 5.1. Στο εν λόγω σχήμα παρατηρείται ένα τυπικό σύστημα ηλεκτρικής κίνησης που απαρτίζεται από την πηγή ισχύος, η οποία είναι εναλλασσόμενη, μονοφασική ή τριφασική σταθερής συχνότητας, από έναν μη ελεγχόμενο ανορθωτή με διόδους και με τα κατάλληλα LC φίλτρα εξόδου, από μια δυναμική πέδη (Dynamic Brake) για τον κινητήρα, από έναν τριφασικό αντιστροφέα πηγής τάσης σε συνδεσμολογία γέφυρας και τέλος από μια ασύγχρονη τριφασική μηχανή επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα. Ο μη ελεγχόμενος ανορθωτής απαιτείται για την τροφοδοσία του αντιστροφέα με συνεχή τάση, ενώ η δυναμική πέδη απαιτείται για να καταναλώνεται με τη μορφή θερμότητας η ενέργεια που παρέχει προς την πηγή ισχύος η μηχανή όταν περνάει σε λειτουργία πέδησης ή γεννήτριας, καθώς ο ανορθωτής με διόδους δεν επιτρέπει την αμφίδρομη ροή ισχύος από και προς την πηγή. Το σύστημα ελέγχου (ελεγκτής), που υλοποιεί τον εν λόγω έλεγχο, φαίνεται στα αριστερά.



Σχήμα 5.5 : Έλεγχος τριφασικής μηχανής επαγωγής με την τεχνική ελέγχου σταθερού λόγου τάσης προς συχνότητα τροφοδοσίας και με χρήση τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης σε ανοικτό βρόχο.

Ο έλεγχος της μηχανής μέσω του λόγου τάσης προς συχνότητα τροφοδοσίας σε ανοικτό βρόχο, παρουσιάζει σημαντικά μειονεκτήματα, με κυριότερο να είναι μειωμένη η ακρίβεια του και η «αναισθησία» ως προς τις μεταβολές της ροπής του φορτίου και του πλάτους της τάσης του δικτύου, λόγω της απουσίας πληροφόρησης για την πραγματική έξοδο του συστήματος (ανάδρασης). Αμελώντας επίσης την συζευγμένη μορφή των εξισώσεων της μηχανής υπάρχει απώλεια τόσο σε ακρίβεια όσο και σε ταχύτητα απόκρισης της ηλεκτρικής ροπής, ενώ παρατηρείται ότι οι αποκρίσεις τόσο της ηλεκτρικής ροπής όσο και της μαγνητικής ροής είναι υποκρίσιμες (εμφανίζουν ταλαντώσεις), φαινόμενο που γίνεται ιδιαίτερα έντονο σε χαμηλές συχνότητες. Επίσης εμφανίζονται παρεκκλίσεις της μαγνητικής ροής για μεταβολές της ηλεκτρικής ροπής (δηλαδή μεταβαλλόμενο ρεύμα στο στάτη) από την ονομαστική της τιμή, και πάλι λόγω της συζευγμένης μορφής των εξισώσεων της μηχανής. Υπάρχουν τέλος ορισμένες περιοχές λειτουργίας στις οποίες το σύστημα περνά σε αστάθεια.

Παρά την απλότητα του αλγορίθμου ελέγχου και την ταχύτητα απόκρισης που χαρίζει ο έλεγχος σε ανοιχτό βρόχο, η χρήση αυτής της τεχνικής ελέγχου δεν παρέχει τη δυνατότητα για ιδιαίτερα ακριβή έλεγχο ταχύτητας. Για το λόγο αυτό δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ιδιαίτερα απαιτητικές εφαρμογές, στις οποίες είναι αναγκαίος ο ακριβέστατος έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής. Τα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής είναι η μεγάλη απλότητα, η ικανοποιητική για τις περισσότερες εφαρμογές ακρίβεια και η εξοικονόμηση ενέργειας, που προκύπτει από όλες τις τεχνικές ελέγχου μεταβλητής συχνότητας τροφοδοσίας.

5.3.1.2 Έλεγχος με σταθερό λόγο τάσης προς συχνότητα σε κλειστό βρόχο

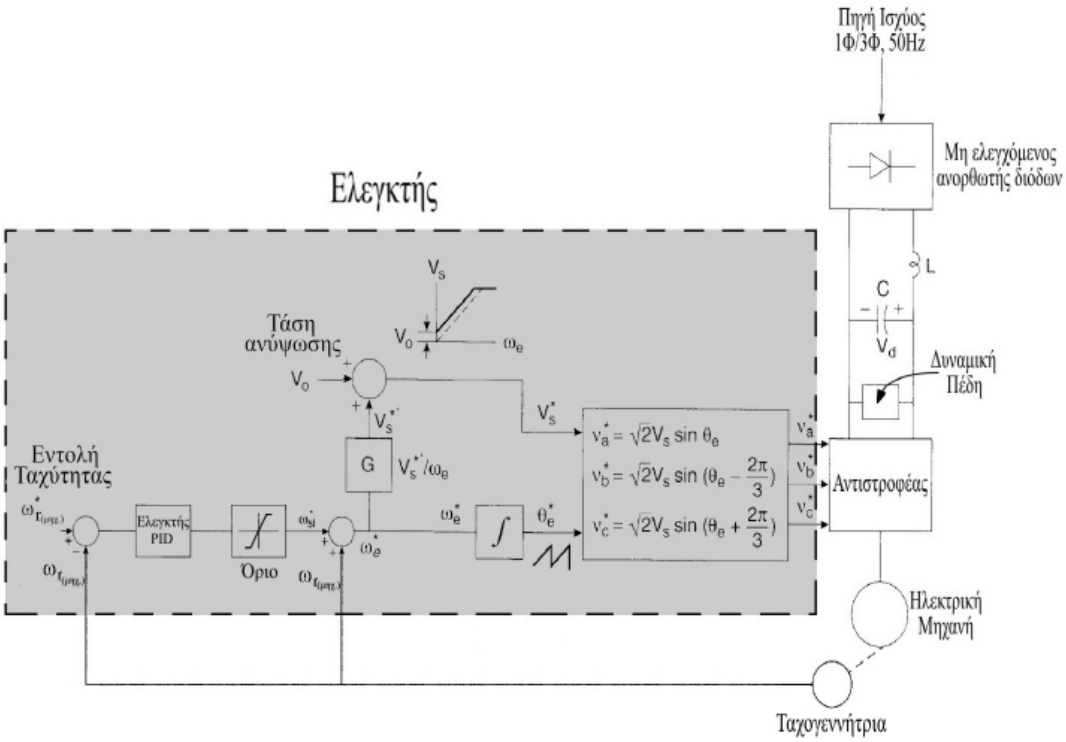
Μια βελτιωμένη, σε σχέση με τον έλεγχο σε ανοικτό βρόχο, τεχνική ελέγχου με σταθερό λόγο τάσης προς συχνότητα τροφοδοσίας, είναι ο έλεγχος σε κλειστό βρόχο (Closed–Loop Control). Η βασική αρχή του ελέγχου σε κλειστό βρόχο είναι η ανατροφοδότηση της εξόδου στην είσοδο, έτσι ώστε να είναι γνωστό το σφάλμα μεταξύ τους και να αναλαμβάνονται οι κατάλληλες δράσεις ελέγχου ώστε το σφάλμα αυτό να μηδενιστεί.

Η τεχνική αυτή εφαρμόζει έλεγχο της ταχύτητας της μηχανής σε κλειστό βρόχο, μέσω ελέγχου της ολίσθησής της. Όπως συμβαίνει με κάθε σύστημα κλειστού βρόχου, ο ελεγκτής λαμβάνει πληροφόρηση για την παρούσα κατάσταση του συστήματος μέσω ανατροφοδότησης της εξόδου του. Στη συνέχεια, βάσει του σφάλματος μεταξύ παρούσας και επιθυμητής εξόδου, αναλαμβάνει τις κατάλληλες δράσεις ελέγχου, ώστε η νέα έξοδος του συστήματος να γίνει ίση με την επιθυμητή. Εξακολουθεί πάντως να υφίσταται το πρόβλημα της συζευγμένης μορφής των εξισώσεων του μοντέλου της μηχανής, το οποίο είναι ένα εγγενές μειονέκτημα του βαθμωτού ελέγχου.

Στο Σχήμα 5.6 φαίνεται το διάγραμμα του ελέγχου της ταχύτητας ενός κινητήρα επαγωγής με σταθερό λόγο τάσης προς συχνότητα τροφοδοσίας σε κλειστό βρόχο. Παρατηρείται ότι η μηχανική ταχύτητα περιστροφής της ηλεκτρικής μηχανής μετατρέπεται σε σήμα ελέγχου, συνήθως μέσω μιας ταχογεννήτριας ή ενός κωδικοποιητή θέσης ή ταχύτητας, και ανατροφοδοτείται στον ελεγκτή.

Στη συνέχεια η ανατροφοδοτούμενη μηχανική ταχύτητα αφαιρείται από την επιθυμητή μηχανική ταχύτητα και έτσι προκύπτει το σφάλμα ταχύτητας της μηχανής. Επιθυμητό είναι ο έλεγχος να δράσει με τέτοιο τρόπο ώστε να μηδενίσει το σφάλμα αυτό. Για να επιτευχθεί καλή μεταβατική απόκριση και εξάλειψη του σφάλματος μόνιμης κατάστασης χρησιμοποιούμε έναν ελεγκτή Αναλόγου – Ολοκληρώματος – Παραγώγου (Proportional – Integral – Differential (PID) Controller) και έναν περιοριστή της εξόδου του (όριο).

Ο ελεγκτής Αναλόγου – Ολοκληρώματος – Παραγώγου (PID) είναι ο πιο γνωστός, απλός και ευρέως διαδεδομένος ελεγκτής για γραμμικά χρονικά αμετάβλητα συστήματα (Linear Time Invariant – LTI). Ο ελεγκτής αναλόγου (P) πολλαπλασιάζει το σφάλμα με κατάλληλη σταθερά (κέρδος), ώστε να δώσει γρήγορη απόκριση και μικρή υπερύψωση. Ο ελεγκτής ολοκληρώματος (I) ολοκληρώνει το σφάλμα και πολλαπλασιάζει το ολοκλήρωμα αυτό επίσης με κατάλληλη σταθερά (κέρδος), έτσι ώστε να μηδενίσει το σφάλμα που τυχόν απομένει στη μόνιμη κατάσταση και να αποσβεστούν ταλαντώσεις χαμηλής συχνότητας. Ο ελεγκτής παραγώγου (D) υπολογίζει την παράγωγο του σφάλματος και την πολλαπλασιάζει με κατάλληλη σταθερά (κέρδος), με αποτέλεσμα να εκτελεί μια πρόβλεψη του σφάλματος και να παράγει μια σημαντική διόρθωση πριν αυτό γίνει πολύ μεγάλο. Η έξοδος του συνολικού PID ελεγκτή προκύπτει από την υπέρθεση (πρόσθεση) των εξόδων των τριών επιμέρους ελεγκτών που αναφέρθηκαν. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνουν δύο σημειώσεις. Αφ' ενός σε ορισμένες εφαρμογές ελέγχου είναι δυνατόν να μην υπάρχουν και οι τρεις όροι του ελεγκτή. Οι δυνατοί συνδυασμοί, που δίνουν καλά αποτελέσματα ελέγχου, είναι οι εξής: P, PI, PD, PID. Αφ' ετέρου η επιλογή των τιμών των πολλαπλασιαστικών σταθερών (κέρδη) είναι εξαιρετικά σημαντική και θα πρέπει να γίνεται με μεγάλη προσοχή. Μεγάλες τιμές κερδών μπορούν να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητη συμπεριφορά ή ακόμη και αστάθεια. Μεγάλη τιμή του κέρδους αναλογικού όρου (P) οδηγεί σε μεγάλη υπερύψωση και πιθανώς αστάθεια, μεγάλη τιμή του κέρδους του ολοκληρωτικού όρου (I) οδηγεί πολλές φορές σε ταλαντώσεις, φθίνουσες ή μη, ενώ υπέρβαση στο κέρδος του διαφορικού όρου (D), ο οποίος δρα μόνο κατά τη μεταβατική περίοδο, οδηγεί σε ενίσχυση των υψίσυχνων ταλαντώσεων (θόρυβος) και μπορεί να οδηγήσει σε κορεσμό τους ενισχυτές του συστήματος ελέγχου. Τονίζεται επίσης ότι το αποτέλεσμα της επιθυμητής δράσης ενός σωστά ρυθμισμένου PID, είναι το σφάλμα μεταξύ πραγματικής (έξοδος) και επιθυμητής (είσοδος) τιμής να είναι μηδενικό, δηλαδή η έξοδος να ακολουθεί την είσοδο, όσο το δυνατόν πιο στενά. Αυτό δε σημαίνει όμως ότι και η έξοδος του ελεγκτή PID θα είναι τότε μηδενική. Κατά κύριο λόγο είναι μη μηδενική, τροφοδοτώντας με το κατάλληλο σήμα ελέγχου το ελεγχόμενο σύστημα.



Σχήμα 5.6: Έλεγχος τριφασικής μηχανής επαγωγής με την τεχνική ελέγχου σταθερού λόγου τάσης προς συχνότητα τροφοδοσίας και με χρήση τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης σε κλειστό βρόχο.

Παρακάτω παρατίθενται τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της παραπάνω τεχνικής ελέγχου:

• Η υπόθεση ότι η μαγνητική ροή παραμένει σταθερή δεν είναι απόλυτα ορθή, αφού για την εξαγωγή της υπόθεσης αυτής έχει αμεληθεί η επίδρασή της αντίστασης του στάτη, η οποία είναι υπαρκτή σε μια πραγματική μηχανή. Έτσι η μαγνητική ροή παραμένει σταθερή στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, αλλά όταν η μηχανή περάσει σε διαφορετικό σημείο λειτουργίας, μεταβάλλεται και η τιμή της μαγνητικής της ροής.

• Λόγω του παραπάνω φαινομένου, που πηγάζει από τη συζευγμένη μορφή των εξισώσεων του μοντέλου της μηχανής, η απόκριση του συστήματος στις εντολές μεταβολής της ταχύτητας δεν είναι βέλτιστη. Επομένως η ταχύτητα και η ποιότητα της απόκρισης δεν είναι γενικά ικανοποιητικές για εφαρμογές που απαιτούν έλεγχο ακριβείας υψηλής επίδοσης. Στον έλεγχο σε κλειστό βρόχο υπάρχει καλύτερη απόκριση, σε σχέση με τον έλεγχο σε ανοικτό βρόχο.

• Μεταβολές στην ταχύτητα που οφείλονται σε μεταβολή της συνεχούς τάσης τροφοδοσίας ή μεταβολές στην τιμή του φορτίου, δεν γίνονται αντιληπτές από τον αλγόριθμο ελέγχου σε ανοικτό βρόχο και δεν διορθώνονται, ενώ αντίθετα στον έλεγχο σε κλειστό βρόχο λαμβάνονται οι κατάλληλες δράσεις ελέγχου για τη διόρθωσή τους, εφόσον αυτό είναι εφικτό. Το γεγονός αυτό που οφείλεται στη φύση του ελέγχου σε ανοιχτό βρόχο, οδηγεί σε μόνιμα σφάλματα ταχύτητας. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της τεχνικής αυτής, είναι ότι ο έλεγχος της ολίσθησης θα πρέπει να σχεδιαστεί με ιδιαίτερη προσοχή, καθώς όλη η ενέργεια ολίσθησης καταναλώνεται μέσα στην μηχανή επαγωγής, αυξάνοντας τη θερμοκρασία της.

• Στην εν λόγω τεχνική ελέγχου εφαρμόζεται η τεχνική SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) για τον έλεγχο του αντιστροφέα. Οι αρμονικές αυτές συνιστώσες, οι οποίες

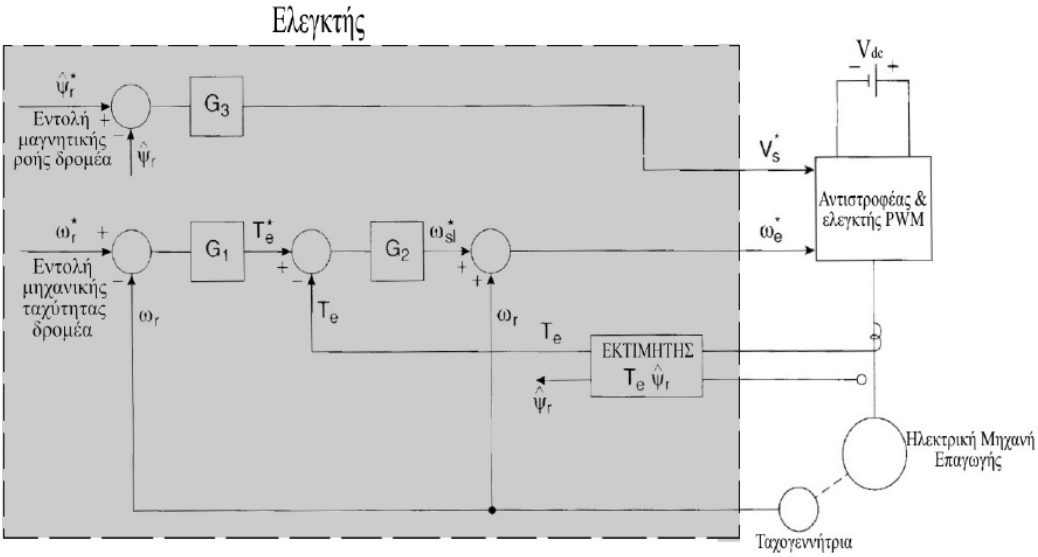
βρίσκονται σε υψηλές συχνότητες, δεν απαιτούν στις συνήθεις εφαρμογές τη χρήση φίλτρων για την καταστολή τους, αφού τις περισσότερες φορές φιλτράρονται σε ικανοποιητικό βαθμό από την επαγωγική αντίδραση των τυλιγμάτων του στάτη.

• Τέλος αυτή η τεχνική ελέγχου, είναι ιδιαίτερα απλή και παρουσιάζει ελάχιστη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλήθος βιομηχανικών εφαρμογών, που δεν απαιτούν μεγάλη ακρίβεια στην ρύθμιση της ταχύτητας και καλή μεταβατική συμπεριφορά, όπως ανεμιστήρες και αντλίες. Γενικά προτιμάται ο έλεγχος σε κλειστό, σε σχέση με τον έλεγχο σε ανοιχτό βρόχο, για όλα τα παραπάνω αναφερόμενα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει.

5.3.1.3 Έλεγχος ταχύτητας μέσω της ηλεκτρικής ροπής και της μαγνητικής ροής σε κλειστό βρόχο

Η τεχνική ελέγχου με διατήρηση σταθερού λόγου τάσης προς συχνότητα τροφοδοσίας θεωρεί, ότι η μαγνητική ροή της μηχανής παραμένει σταθερή και ίση με την ονομαστική της τιμή. Στην πράξη όμως η ροή μπορεί να παρεκκλίνει από αυτήν την τιμή, με αποτέλεσμα να παρατηρείται μεταβολή της ευαισθησίας της αναπτυσσόμενης ηλεκτρικής ροπής, ως προς την ολίσθηση, γεγονός που έχει ως συνέπεια είτε μικρότερη μαγνητική ροή είτε κορεσμό του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής. Η μικρότερη μαγνητική ροή συνεπάγεται και μικρότερη αναπτυσσόμενη ηλεκτρική ροπή και άρα μείωση της δυνατότητας μέγιστης επιτάχυνσης/επιβράδυνσης της μηχανής. Πιθανά αίτια για το φαινόμενο αυτό μπορεί να είναι η διακύμανση του πλάτους της τάσης του δικτύου, η λανθασμένη επιλογή της σταθερής τιμής του λόγου τάσης προς συχνότητα τροφοδοσίας, η μεγαλύτερη πτώση τάσης στον στάτη λόγω μεγαλύτερου ρεύματος τυμπάνου ή η μεταβολή των παραμέτρων της μηχανής κατά τη λειτουργία.

Για το λόγο αυτό συμπεραίνεται, ότι ένα σύστημα ελέγχου της ταχύτητας ενός κινητήρα επαγωγής θα έχει καλύτερη απόδοση, αν περιλαμβάνει έλεγχο σε κλειστό βρόχο, τόσο της αναπτυσσόμενης ηλεκτρικής ροπής, όσο και της μαγνητικής ροής εντός της μηχανής. Ένα τέτοιο σύστημα ελέγχου φαίνεται στο Σχήμα 5.7. Παρατηρείται ότι περιλαμβάνει επιπλέον βρόχους ανατροφοδότησης τόσο της ηλεκτρικής ροπής, όσο και της μαγνητικής ροής. Οι επιπρόσθετοι βρόχοι ανάδρασης αυξάνουν την πολυπλοκότητα και θα πρέπει να σχεδιάζονται με μεγάλη προσοχή, καθώς μπορεί να οδηγήσουν το σύστημα σε κατάσταση αστάθειας. Ο εσωτερικός βρόχος ελέγχου της ροπής αυξάνει την ταχύτητα απόκρισης του ελέγχου ταχύτητας και καθορίζει την επιθυμητή ολίσθηση της μηχανής (ω_{sl}^*), ενώ ο βρόχος ελέγχου της ροής ελέγχει το επιθυμητό πλάτος της τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα (V_s^*).



Σχήμα 5.7: Έλεγχος ταχύτητας τριφασικής μηχανής επαγωγής με έλεγχο σε κλειστό βρόχο της αναπτυσσόμενης ηλεκτρικής ροπής και της μαγνητικής ροής της μηχανής.

Υπάρχουν δύο τρόποι να ληφθούν τα σήματα ροπής και ροής από τη μηχανή. Ο πρώτος τρόπος είναι με τη χρήση αισθητήρων ροής και ροπής, οι οποίοι είναι προσαρμοσμένοι στη μηχανή. Ο τρόπος αυτός αποφεύγεται καθώς δεν είναι πρακτικός εξαιτίας του μεγάλου κόστους και των ειδικών παρεμβάσεων που απαιτούνται στη μηχανή. Ο δεύτερος τρόπος αποτελεί την κοινή πρακτική και βασίζεται στην εκτίμηση (υπολογισμό) των μεγεθών της ροπής και της ροής της μηχανής με την χρησιμοποίηση του μοντέλου της. Η διάταξη υπολογισμού που λέγεται παρατηρητής (observer) ή εκτιμητής (estimator) χρησιμοποιεί μετρητικές διατάξεις για τη μέτρηση των ρευμάτων και των τάσεων του στάτη, ενώ πιθανώς χρησιμοποιείται και το σήμα της μηχανικής ταχύτητας από την ταχογεννήτρια. Από τις μετρήσεις αυτές, μέσω των εξισώσεων του εκάστοτε χρησιμοποιούμενου μοντέλου για τη μηχανή, προκύπτουν τα ζητούμενα μεγέθη για τη διενέργεια του ελέγχου.

Η μαγνητική ροή της μηχανής μπορεί τώρα να διατηρείται σταθερή ή να μεταβάλλεται με κάποιο προγραμματισμό ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής. Επομένως τα G_1, G_2 και G_3 δεν είναι ελεγκτές PID στη γενική τους μορφή, παρά μόνον αν η μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή. Θεωρείται ότι στο μπλοκ του αντιστροφέα περιέχεται το κύκλωμα ελέγχου που δημιουργεί τις επιθυμητές τάσεις αναφοράς και τις συγκρίνει με την τριγωνική κυματομορφή του φορέα, ώστε να επιτύχει διαμόρφωση των παλμών του αντιστροφέα με την τεχνική PWM (Pulse Width Modulation).

Παρακάτω περιγράφεται η λειτουργία του ελέγχου για επιθυμητή μαγνητική ροή δρομέα σταθερού πλάτους, ίσο με το ονομαστικό. Όταν η ταχύτητα αυξάνεται, αυξάνεται αναλογικά και η τάση τροφοδοσίας μέχρι την ονομαστική ταχύτητα, οπότε περνάμε σε λειτουργία τετραγωνικού παλμού του αντιστροφέα, και η τάση τροφοδοσίας περνάει σε κορεσμό. Έτσι οδηγείται το σύστημα στην περιοχή σταθερής ισχύος σε λειτουργία «εξασθένισης πεδίου», με αποτέλεσμα να έχουμε μείωση της μαγνητικής ροής του δρομέα με τα αρνητικά παρελκόμενα που προαναφέρθηκαν. Μια λύση στο πρόβλημα αυτό που θα επιτρέψει την τροφοδοσία του κινητήρα με τάση διαμορφωμένη με την τεχνική PWM ακόμα και σε υπερσύγχρονες ταχύτητες, είναι η κατάλληλη ηθελημένη μείωση της μαγνητικής ροής. Σημειώνεται επίσης ότι η απόκριση του βρόχου ελέγχου της μαγνητικής ροής είναι πολύ πιο αργή από αυτή του βρόχου ελέγχου της ταχύτητας, ιδιαίτερα μάλιστα όταν ο τελευταίος εμπεριέχει έναν κλειστό βρόχο ελέγχου της ροπής. Καθώς λοιπόν ο βρόχος ελέγχου ταχύτητας–ροπής παράγει μια εντολή για αύξηση της ταχύτητας, η ροή εμφανίζει μια προσωρινή μείωση, μέχρι ο βρόχος ελέγχου να την επαναφέρει στην επιθυμητή της τιμή. Λόγω της συζευγμένης μορφής του συστήματος υπάρχει μια καθυστέρηση στην απόκριση της ροπής, η οποία βέβαια είναι αναμενόμενη σε ένα σύστημα βαθμωτού ελέγχου.

5.3.2 Διανυσματικός Έλεγχος με Προσανατολισμό Πεδίου

Ο διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό πεδίου (Vector Control – Field Orientation Control) εφαρμόστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1970 και αποτέλεσε μια επανάσταση στον τομέα ελέγχου των ηλεκτρικών κινητήρων επαγωγής. Στο διανυσματικό έλεγχο τα ελεγχόμενα μεγέθη θεωρούνται ως διανύσματα, οπότε κατά τον έλεγχο προσδιορίζεται εκτός από το μέτρο και η φάση τους. Η μεγάλη σπουδαιότητα του διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό πεδίου έγκειται, στο ότι υπό κατάλληλες προϋποθέσεις μπορεί να επιτευχθεί αποσύζευξη των εξισώσεων της μηχανής, με άμεσο επακόλουθο ο έλεγχός της να είναι εύκολος, ταχύς και ιδιαίτερα ακριβής.

Ο διανυσματικός έλεγχος, όπως φανερώνει και η ονομασία του, έχει ως κεντρική ιδέα τον έλεγχο του διανύσματος των ελεγχόμενων μεταβλητών. Συνεπώς πέρα από το μέτρο τους ελέγχει και τη γωνία τους (φάση), ώστε να προσδιορίσει επακριβώς το διάνυσμά τους. Ο διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό πεδίου αποτελεί τη λύση στο πρόβλημα που εμφανίζει ο έλεγχος των ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής, το οποίο δεν είναι άλλο από την συζευγμένη μορφή των εξισώσεων του μοντέλου της μηχανής. Δεν υφίσταται πλέον αλληλεπίδραση μεταξύ της αναπτυσσόμενης ηλεκτρικής ροπής και της μαγνητικής ροής της μηχανής, με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζεται μεταβολή της ευαισθησίας της ηλεκτρικής ροπής, ως προς την ολίσθηση και αργή (νωθρή) απόκριση του συστήματος στις μεταβολές ταχύτητας, ενώ το σύστημα αποκτά μεγαλύτερο περιθώριο ευστάθειας. Έτσι η συμπεριφορά της μηχανής γίνεται ανάλογη με αυτήν μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος, όπου ελέγχεται ανεξάρτητα η μαγνητική ροή εντός της μηχανής και η αναπτυσσόμενη ηλεκτρική ροπή.

Ο διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό πεδίου έφερε μια αναγέννηση στον τομέα ελέγχου υψηλής ακρίβειας και απόδοσης για κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος, σύγχρονους και ασύγχρονους. Τα ανώτερα χαρακτηριστικά λειτουργίας του, τον κατέστησαν γρήγορα σε μια ευρύτατα χρησιμοποιούμενη τεχνική ελέγχου, εκτοπίζοντας σταδιακά το βαθμωτό έλεγχο από εφαρμογές που απαιτούσαν έλεγχο υψηλής ακριβείας. Ταυτόχρονα η ασύγχρονη μηχανή επαγωγής απέκτησε όμοια συμπεριφορά με τη μηχανή συνεχούς ρεύματος και επικράτησε στις εφαρμογές ελέγχου μεταβλητής ταχύτητας, λόγω των καλύτερων χαρακτηριστικών λειτουργίας της, τερματίζοντας έτσι τη μέχρι τότε πρωτοκαθεδρία των μηχανών συνεχούς ρεύματος.

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό πεδίου, οι οποίες θα αναλυθούν ενδελεχώς παρακάτω. Η πρώτη καλείται άμεσος διανυσματικός έλεγχος ή διανυσματικός έλεγχος με ανατροφοδότηση (Direct or Feedback Vector Control) και προτάθηκε από τον F. Blaschke. Η δεύτερη καλείται έμμεσος διανυσματικός έλεγχος ή διανυσματικός έλεγχος με πρώσο–τροφοδότηση (Indirect or Feedforward Vector Control) και προτάθηκε από τον H. Hasse. Σημειώνεται ότι και στις δύο μεθόδους, ο προσανατολισμός μπορεί να γίνει είτε σύμφωνα με τη μαγνητική ροή του δρομέα είτε με τη μαγνητική ροή του διακένου είτε ακόμα και με τη μαγνητική ροή του στάτη. Ο προσανατολισμός με τη μαγνητική ροή του δρομέα εξασφαλίζει εκ φύσεως ανεξάρτητο έλεγχο, ενώ ο προσανατολισμός με τις δύο άλλες ροές, διατηρεί μια μορφή σύζευξης, η οποία θα πρέπει στη συνέχεια να εξαλειφθεί με αλγεβρική πρόσθεση των κατάλληλων όρων αποσύζευξης στις προκύπτουσες εξισώσεις του μοντέλου.

Για να επιλυθεί το πρόβλημα αυτό, θα πρέπει αρχικά να μετασχηματιστούν αλγεβρικά οι εξισώσεις του μοντέλου της μηχανής, σε ένα πλαίσιο αναφοράς δύο καθέτων αξόνων (dq), το οποίο περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Ο έλεγχος θα πρέπει να διενεργηθεί στο ίδιο πλαίσιο αναφοράς.

Για την μαθηματική μοντελοποίηση της τριφασικής ασύγχρονης ηλεκτρικής μηχανής επαγωγής, θα χρειαστεί ένα δυναμικό μοντέλο, το οποίο θα προσομοιώνει ικανοποιητικά τόσο τη μόνιμη, όσο και τη μεταβατική συμπεριφορά της. Ένα κατάλληλο μοντέλο είναι το δυναμικό μοντέλο της μηχανής σε πλαίσιο αναφοράς δύο καθέτων αξόνων (dq), το οποίο περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα (εξισώσεις Kron). Το μοντέλο αυτό περιγράφεται πλήρως από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\begin{bmatrix} v_{qs}^{\ e} \\ v_{ds}^{\ e} \\ v_{qr}^{\ e} \\ v_{dr}^{\ e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & \omega_e \cdot L_s & pL_m & \omega_e L_m \\ -\omega_e \cdot L_s & R_s + pL_s & -\omega_e \cdot L_m & pL_m \\ p \cdot L_m & (\omega_e - \omega_r) \cdot L_m & R_r + pL_r & (\omega_e - \omega_r) \cdot L'_r \\ -(\omega_e - \omega_r) \cdot L_m & pL_m & -(\omega_e - \omega_r) \cdot L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{qs}^{\ e} \\ i_{ds}^{\ e} \\ i_{qr}^{\ e} \\ i_{dr}^{\ e} \end{bmatrix} \tag{5.2}$$

και την εξίσωση για την αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή T_e της μηχανής:

$$T_e = T_L + J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + B \cdot \omega_m = T_L + \frac{2}{P} \cdot J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} + B \cdot \frac{2}{P} \cdot \omega_r \tag{5.3}$$

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{P}{2}\right) \cdot L_m \cdot (i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \tag{5.4}$$

όπου p εννοείται ο μετασχηματισμός Laplace, T_L η ροπή του φορτίου, P ο αριθμός των πόλων της μηχανής, J η ροπή αδρανείας του συστήματος δρομέα– φορτίου και ω_m (ω_r) η μηχανική (ηλεκτρική) ταχύτητα περιστροφής του δρομέα αντίστοιχα.

Σημειώνεται ότι για ηλεκτρική μηχανή επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα οι τάσεις του δρομέα στην εξίσωση (5.2) είναι μηδενικές. Επίσης το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη φαινόμενα ανώτερης τάξης που εμπλέκονται στη λειτουργία της πραγματικής ηλεκτρικής μηχανής, όπως τον κορεσμό του μαγνητικού κυκλώματος. Είναι φανερό ότι το προκύπτον σύστημα εξισώσεων για το μοντέλο της ασύγχρονης μηχανής επαγωγής είναι μη γραμμικό (συζευγμένες εξισώσεις) και χρονικά μεταβλητό. Συνεπώς για τον έλεγχό του πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή, ώστε αυτός να είναι επιτυχής. Για τον λόγο αυτό έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές (στρατηγικές) ελέγχου, οι οποίες εξετάζονται και συγκρίνονται στην παρούσα εργασία. Στην παραπάνω εξίσωση (5.3) εμπλέκεται και η ροπή του φορτίου T_L. Το φορτίο θεωρείται φορτίο σταθερής ροπής, που σημαίνει ότι στη μηχανική εξίσωση του μοντέλου η ροπή του φορτίου T_L θεωρείται ως μια σταθερά. Σε περίπτωση άλλου είδους φορτίου, θα πρέπει να προσαρμοστεί στην (5.3) η μαθηματική σχέση, που συνδέει τη ροπή του φορτίου με την ταχύτητά του. Σε κάθε περίπτωση τελικός στόχος του εφαρμοζόμενου ελέγχου, είναι να ληφθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα ταχύτητας ή ροπής στο φορτίο.

Ο αλγόριθμος ελέγχου θα πρέπει να εξασφαλίζει πάντα, ότι το πλαίσιο αναφοράς διατηρεί τον επιθυμητό προσανατολισμό με το πεδίο του δρομέα. Πλήρη αποσύζευξη των εξισώσεων του μοντέλου της μηχανής θα επιτευχθεί, όταν προσανατολιστεί ο ευθύς άξονας του περιστρεφόμενου πεδίου με τη σύγχρονη ταχύτητα πλαισίου αναφοράς δύο αξόνων με το διάνυσμα της μαγνητικής ροής του δρομέα, όταν και αυτό περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Η αποσύζευξη αυτή απορρέει από τις εξισώσεις του μοντέλου για τις συνθήκες του προσανατολισμού και παραμένει πλήρης, για όσο χρόνο διατηρείται ο προσανατολισμός αυτός. Για το λόγο αυτό η διαρκής διατήρηση του σωστού προσανατολισμού από τον αλγόριθμο ελέγχου είναι μείζονος σημασίας και βασική προϋπόθεση για την επιτυχία του εφαρμοζόμενου ελέγχου.

Εφόσον με τη διατήρηση του προσανατολισμού αυτού οι εξισώσεις του μοντέλου της μηχανής αποσυνδέονται, η μαγνητική ροή της μηχανής και η ροπή της (άρα και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της) είναι ανεξάρτητες μεταβλητές. Το γεγονός αυτό είναι μια σημαντικότατη παρατήρηση, η οποία αποτελεί και τη βάση του διανυσματικού ελέγχου, αφού ελέγχονται ανεξάρτητα και κατά το δοκούν, τόσο η μαγνητική ροή όσο και η ταχύτητα του δρομέα, χωρίς η μεταβολή του ενός μεγέθους να επιδρά στην τιμή του άλλου. Αυτή η ιδιότητα αποτελεί το κυριότερο πλεονέκτημα του διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό πεδίου, αφού επιτρέπει τον έλεγχο μιας μηχανής επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα σα να

ήταν μηχανή συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης. Με το ρεύμα ευθέως άξονα ελέγχεται το πλάτος της μαγνητικής ροής του δρομέα (πεδίο) της μηχανής, ενώ με το ρεύμα εγκάρσιου άξονα ελέγχεται η αναπτυσσόμενη ηλεκτρική ροπή και συνεπώς η ταχύτητα του δρομέα της μηχανής.

Τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνική ελέγχου, χαρακτηρίζονται από την υψηλή τους απόδοση και τη μεγάλη ακρίβεια στη ρύθμιση της ταχύτητας και της μαγνητικής ροής, τόσο σε στατές όσο και σε δυναμικές συνθήκες και στα τέσσερα τεταρτημόρια του πεδίου ταχύτητας–ροπής ακόμα και σε χαμηλές ταχύτητες. Η απόκριση, απουσία σύζευξης, είναι ιδιαίτερα ταχεία και χωρίς ιδιαίτερη ταλαντωτική συμπεριφορά, γεγονός που χαρακτηρίζει την επίδοση και την ακρίβεια συστημάτων, που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνική ελέγχου, ως ιδιαίτερα καλή.

Δύο είναι τα κυριότερα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής: η ιδιαίτερα μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα που απαιτείται για τον σωστό προσανατολισμό του πλαισίου αναφοράς και η ανάγκη για έλεγχο του ρεύματος του αντιστροφέα. Η μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα συνεπάγεται μεγάλο υπολογιστικό φόρτο, όταν ο έλεγχος διενεργείται με μεγάλη συχνότητα και στην περίπτωση αυτή συνήθως απαιτείται η χρήση ιδιαίτερα γρήγορων και υψηλού κόστους υπολογιστικών μονάδων. Ο έλεγχος ρεύματος που απαιτείται μπορεί να επιτευχθεί είτε με τον έλεγχο του στιγμιαίου ρεύματος σε ζώνη υστέρησης είτε με πρόβλεψη των επιθυμητών τάσεων από τα επιθυμητά ρεύματα μέσω του μοντέλου της μηχανής και με την εφαρμογή της τεχνικής SPWM με κυματομορφές διαμόρφωσης. Η πρώτη μέθοδος με τον έλεγχο με ζώνη υστέρησης δε δίνει βέλτιστα αποτελέσματα, καθώς η διακοπτική συχνότητα δεν είναι σταθερή, ενώ το αρμονικό περιεχόμενο είναι σημαντικό, οδηγώντας στην ανάπτυξη παρασιτικών ροπών. Η δεύτερη τεχνική με την πρόβλεψη των επιθυμητών τάσεων δίνει σταθερή διακοπτική συχνότητα, ενώ η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος είναι σαφώς μικρότερη.

Στη συνέχεια θα εξεταστούν δύο περιπτώσεις διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό με το πεδίο του δρομέα: ο άμεσος και ο έμμεσος διανυσματικός έλεγχος.

5.3.2.1 Αρχές διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό πεδίου

Στην ιδανική περίπτωση αποσύζευξης των εξισώσεων της μηχανής με τη βοήθεια του διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό πεδίου, όπως προαναφέρθηκε, μία ασύγχρονη ηλεκτρική μηχανή επαγωγής έχει συμπεριφορά όμοια με τη συμπεριφορά που εμφανίζει ένας κινητήρας συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης. Η αναπτυσσόμενη ροπή ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος αμελώντας την επαγωγική αντίδραση του τυμπάνου και τον μαγνητικό κορεσμό είναι:

$$T_e = k \cdot I_a \cdot I_f \tag{5.5}$$

όπου k μια σταθερά της μηχανής, I_a το ρεύμα τυμπάνου και I_f το ρεύμα πεδίου διέγερσης, το οποίο δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο στη μηχανή.

Στη μηχανή ξένης διέγερσης το ρεύμα του πεδίου διέγερσης δημιουργείται από ξεχωριστό ηλεκτρικό κύκλωμα και συνεπώς μπορεί να ελέγχεται ανεξάρτητα από το ρεύμα τυμπάνου. Η ανεξαρτησία μεταφράζεται διανυσματικά σε καθετότητα. Άρα τα διανύσματα των ρευμάτων I_a και I_f καθώς και οι προκαλούμενες από αυτά μαγνητικές ροές ψ_a και ψ_f αντίστοιχα θα είναι στατικά και κάθετα μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει, ότι η μεταβολή του ενός δεν επηρεάζει το άλλο (και επομένως ούτε την μαγνητική ροή του άλλου) και ο έλεγχός τους μπορεί να γίνει ανεξάρτητα, προσφέροντας ταχύτατη μεταβατική απόκριση και υψηλή τιμή ροπής ανά μονάδα ρεύματος.

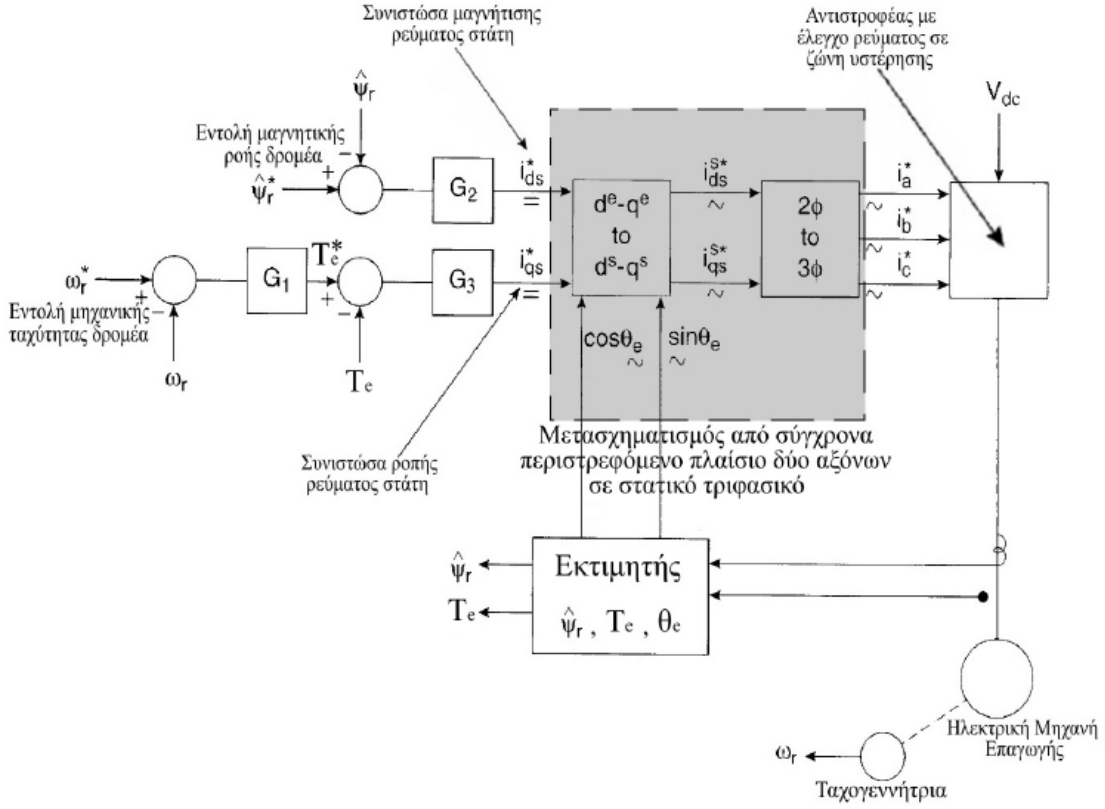
5.3.2.2 Άμεσος Διανυσματικός Έλεγχος με Προσανατολισμό με το Πεδίο του Δρομέα

Ο άμεσος διανυσματικός έλεγχος υπολογίζει τη γωνία που απαιτείται για το σωστό προσανατολισμό του πλαισίου αναφοράς με το πεδίο του δρομέα άμεσα, με ανατροφοδότηση της εξόδου της μηχανής. Η μαγνητική ροή του δρομέα της μηχανής μετράται ή με ειδικούς αισθητήρες που βρίσκονται εντός της μηχανής ή τις περισσότερες φορές υπολογίζεται από έναν εκτιμητή βάσει του μοντέλου της. Από τη γωνία μεταξύ των δύο συνιστωσών, ευθέως και εγκάρσιου άξονα, της μαγνητικής ροής του δρομέα, προκύπτει η γωνία του προσανατολισμού. Για το λόγο αυτό, ο έλεγχος αυτός χαρακτηρίζεται άμεσος έλεγχος ή έλεγχος με ανατροφοδότηση (Direct or Feedback Vector Control with Field Orientation).

Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται το γενικό διάγραμμα του άμεσου διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό πεδίου ή αλλιώς του διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό πεδίου με ανατροφοδότηση (Direct or Feedback Vector Control–Field Orientation Control). Ο έλεγχος ξεκινάει με την ανατροφοδότηση στον ελεγκτή των σημάτων για τη μηχανική ταχύτητα του δρομέα της μηχανής, καθώς και για τις τάσεις και τα ρεύματα του στάτη. Από τα σήματα αυτά ένας εκτιμητής υπολογίζει με βάση το χρησιμοποιούμενο μοντέλο για τη μηχανή τις στιγμιαίες τιμές:

- του πλάτους της μαγνητικής ροής του δρομέα (ψ_r)
- της αναπτυσσόμενης ηλεκτρικής ροπής του κινητήρα (T_e)
- της ηλεκτρικής γωνίας (θ_e) μεταξύ του ευθέως άξονα του στατικού πλαισίου αναφοράς (d^s) και
- του ευθέως άξονα του περιστρεφόμενου με σύγχρονη ταχύτητα πλαισίου αναφοράς (d^e), η οποία απαιτείται για το μετασχηματισμό.

Στη συνέχεια συγκρίνονται (αφαιρούνται) οι τιμές του πλάτους της μαγνητικής ροής και του μέτρου της μηχανικής ταχύτητας του δρομέα, με τις αντίστοιχες επιθυμητές και τα προκύπτοντα σφάλματα οδηγούνται στους ελεγκτές G_1 και G_2. Οι ελεγκτές αυτοί γενικά είναι μη γραμμικοί, επειδή το σύστημα είναι μη γραμμικό στη γενική του μορφή (μπορεί να είναι ελεγκτές PID).



Σχήμα 5.8: Διάγραμμα του άμεσου διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό πεδίου, που περιλαμβάνει έλεγχο της μαγνητικής ροής του δρομέα της μηχανής σε κλειστό βρόχο.

Στην έξοδο των δύο ελεγκτών προκύπτουν αντίστοιχα τα επιθυμητά ρεύματα στάτη, ευθέως και εγκάρσιου άξονα, τα οποία όμως αναφέρονται στο πλαίσιο που περιστρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα. Στο βρόχο ελέγχου της ταχύτητας μπορεί να εμπεριέχεται προαιρετικά και ένας κλειστός βρόχος ελέγχου της ηλεκτρικής ροπής, ο οποίος προσφέρει μεγάλη ταχύτητα απόκρισης του συστήματος στις εντολές ταχύτητας. Στη συνέχεια τα επιθυμητά ρεύματα θα πρέπει να μετασχηματιστούν σε στατό τριφασικό πλαίσιο αναφοράς, ώστε να ανταποκρίνονται στα ρεύματα των τριών φάσεων του στάτη του πραγματικού συστήματος. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ο αντίστροφος πίνακας του μετασχηματισμού των στατικών μεταβλητών του στάτη σε σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς που έχει δοθεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 4. Ο μετασχηματισμός αυτός μπορεί να θεωρηθεί ότι γίνεται σε δύο στάδια: το πρώτο είναι, ο μετασχηματισμός από το στρεφόμενο πλαίσιο δύο κάθετων αξόνων με σύγχρονη ταχύτητα, σε ένα στατό πλαίσιο δύο κάθετων αξόνων και το δεύτερο από το στατό πλαίσιο δύο κάθετων αξόνων στο πραγματικό στατό τριφασικό σύστημα. Από το μετασχηματισμό αυτό προκύπτουν τα επιθυμητά ρεύματα των τριών φάσεων.

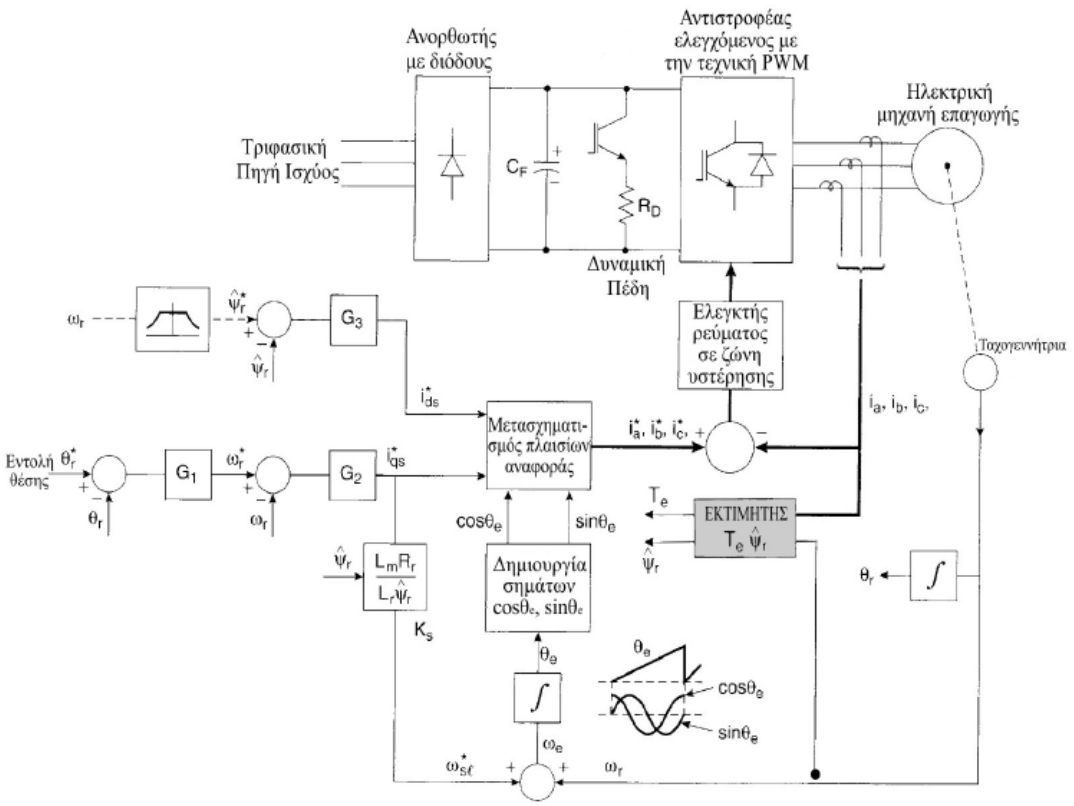
Στη συνέχεια θα πρέπει να παραχθούν κατάλληλοι παλμοί προς τους διακόπτες του αντιστροφέα, ώστε να τροφοδοτηθεί ο κινητήρας με τα κατάλληλα ρεύματα. Ο αντιστροφέας θα πρέπει να παραμένει πάντα στην γραμμική περιοχή λειτουργίας PWM, ειδάλλως εάν περάσει σε λειτουργία τετραγωνικού παλμού ο έλεγχος παύει να είναι ντετερμινιστικός. Η τεχνική ελέγχου του αντιστροφέα που χρησιμοποιείται και για τις τρεις φάσεις, είναι ο έλεγχος του στιγμιαίου ρεύματος σε ζώνη υστέρησης, ενώ εάν επιθυμείται λειτουργία της μηχανής σε ταχύτητες πέραν της σύγχρονης, θα πρέπει να προγραμματιστεί κατάλληλη μείωση της μαγνητικής ροής της μηχανής στις περιοχές αυτές, ώστε να μην περνάει σε μη

γραμμική λειτουργία (υπερδιαμόρφωση). Άλλη δυνατότητα που διαθέτουμε είναι ο έλεγχος του αντιστροφέα με την τεχνική SPWM. Από τα επιθυμητά ρεύματα και την επιθυμητή ταχύτητα υπολογίζονται με χρήση του μοντέλου της μηχανής οι επιθυμητές τάσεις του στάτη της μηχανής. Οι τάσεις αυτές κανονικοποιούνται και αποτελούν τα σήματα διαμόρφωσης ή αναφοράς για την τεχνική SPWM.

5.3.2.3 Έμμεσος Διανυσματικός Έλεγχος με Προσανατολισμό με το Πεδίο του Δρομέα

Ο έμμεσος διανυσματικός έλεγχος υπολογίζει τη γωνία που απαιτείται για το σωστό προσανατολισμό του πλαισίου αναφοράς με το πεδίο του δρομέα έμμεσα, με προσωτροφοδότηση της εισόδου. Η γωνία του προσανατολισμού προκύπτει από ολοκλήρωση της επιθυμητής ταχύτητας, η οποία δίνεται από το άθροισμα της παρούσας κυκλικής συχνότητας περιστροφής του δρομέα, με την επιθυμητή κυκλική συχνότητα ολίσθησης. Η επιθυμητή κυκλική συχνότητα ολίσθησης προκύπτει από το σφάλμα ταχύτητας με τη χρήση των εξισώσεων του μοντέλου της μηχανής. Γι'αυτό το λόγο ο έλεγχος στην περίπτωση αυτή, χαρακτηρίζεται έμμεσος έλεγχος ή έλεγχος με προσωτροφοδότηση (Indirect or Feedforward Vector Control with Field Orientation).

Το διάγραμμα του έμμεσου διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό με το πεδίο του δρομέα, φαίνεται στο Σχήμα 5.9. Ο έλεγχος που εφαρμόζεται επιτρέπει λειτουργία τεσσάρων τεταρτημορίων για τη μηχανή, χωρίς την προσθήκη επιπλέον εντολών στον αλγόριθμο ελέγχου. Το κύκλωμα ισχύος περιλαμβάνει τριφασικό μη ελεγχόμενο ανορθωτή με διόδους και δυναμική πέδη για την κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη λειτουργία γεννήτριας ή πέδησης της μηχανής, εφόσον ο μη ελεγχόμενος ανορθωτής με διόδους δεν επιτρέπει την αμφίδρομη ροή ισχύος. Στη συνέχεια υπάρχει ένας τριφασικός αντιστροφέας σε συνδεσμολογία γέφυρας, που ελέγχεται με την τεχνική PWM με έλεγχο του στιγμιαίου ρεύματος εντός ζώνης υστέρησης. Εναλλακτικά μπορεί να εφαρμοστεί έλεγχος με την τεχνική SPWM με κυματομορφές διαμόρφωσης ή αναφοράς στις επιθυμητές τάσεις των τριών φάσεων που υπολογίζονται με τη βοήθεια του μοντέλου της μηχανής, από τα επιθυμητά ρεύματα και την επιθυμητή ταχύτητα περιστροφής. Ο αντιστροφέας αυτός τροφοδοτεί με την κατάλληλη τάση που προκύπτει από τον αλγόριθμο ελέγχου, έναν τριφασικό ηλεκτρικό κινητήρα επαγωγής. Το κύκλωμα ελέγχου περιλαμβάνει εκτιμητή της τιμής της αναπτυσσόμενης ηλεκτρικής ροπής και του πλάτους της μαγνητικής ροής του δρομέα, ο οποίος χρησιμοποιεί το μοντέλο ρευμάτων της μηχανής.



Σχήμα 5.9: Διάγραμμα του έμμεσου διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό με το πεδίο του δρομέα και έλεγχο του πλάτους της μαγνητικής ροής του δρομέα σε κλειστό βρόχο.

Τα συμπεράσματα για τον άμεσο διανυσματικό έλεγχο ταυτίζονται με τα αντίστοιχα του έμμεσου και ακολουθούν αμέσως παρακάτω:

• Ο προσανατολισμός του ευθέως άξονα του πλαισίου αναφοράς με τη μαγνητική ροή του δρομέα οδηγεί σε αποσύζευξη των εξισώσεων του μοντέλου. Τα μεγέθη: πλάτος μαγνητικής ροής δρομέα και ταχύτητα περιστροφής δρομέα, μπορούν να ελέγχονται ανεξάρτητα, χωρίς να επηρεάζει το ένα την τιμή του άλλου. Στην πράξη δεν θα πρέπει να περιμένει κανείς ιδανικό διανυσματικό έλεγχο. Στη μεταβατική κατάσταση ο σωστός προσανατολισμός μπορεί στιγμιαία να χάνεται, με αποτέλεσμα να έχουμε ιδιαίτερα καλή και ταχεία απόκριση. Πολλές φορές όμως δεν παρατηρείται η ιδανική βηματική μεταβολή που αναμένεται. Όταν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή του δρομέα, η ταχύτητα δεν παραμένει απόλυτα αμετάβλητη.

• Εάν ο αλγόριθμος ελέγχου αντιληφθεί μεταβολές στην ταχύτητα, οφειλόμενες σε μεταβολή της συνεχούς τάσης τροφοδοσίας ή μεταβολές στην τιμή του φορτίου, αναλαμβάνονται κατάλληλες δράσεις ελέγχου για τη διόρθωσή τους, εφόσον αυτό είναι εφικτό. Το ρεύμα που τροφοδοτεί την ηλεκτρική μηχανή ελέγχεται ικανοποιητικά, εξασφαλίζοντας υψηλή τιμή ροπής ανά μονάδα ρεύματος. Είναι σημαντικό στο σημείο αυτό να τονιστεί, ότι η τεχνική αυτή παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία σε μεταβολές των παραμέτρων της μηχανής και ιδιαίτερα στη μεταβολή της τιμής της αντίστασης του δρομέα. Η μεταβολή αυτή μπορεί να οφείλεται είτε σε θέρμανση λόγω των θερμικών απωλειών εντός της μηχανής (θερμότητα Joule, μαγνητικές απώλειες πυρήνα, θερμικές απώλειες λόγω δινορευμάτων) είτε στο επιδερμικό φαινόμενο, το οποίο εξαρτάται από τη συχνότητα των κυκλοφορούντων ρευμάτων δρομέα. Η μεταβολή των παραμέτρων έχει ως αποτέλεσμα, ο προσανατολισμός με το πεδίο του δρομέα να μην είναι πάντοτε ορθός και ακριβής, γεγονός που υποβαθμίζει την ποιότητα του ελέγχου και επιδεινώνει την επίδοσή του.

• Αυτή η τεχνική ελέγχου χαρακτηρίζεται από την υψηλή της απόδοση και τη μεγάλη ακρίβεια στη ρύθμιση της ταχύτητας και της μαγνητικής ροής, τόσο σε στατές, όσο και σε δυναμικές συνθήκες και στα τέσσερα τεταρτημόρια του πεδίου ταχύτητας–ροπής, ακόμα και σε χαμηλές ταχύτητες. Η απόκριση απουσία σύζευξης, είναι ιδιαίτερα ταχεία και χωρίς ιδιαίτερη ταλαντωτική συμπεριφορά, γεγονός που χαρακτηρίζει την επίδοση και την ακρίβεια συστημάτων που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνική ελέγχου ως εξαιρετική. Βεβαίως η εφαρμογή της παρουσιάζει αυξημένη υπολογιστική πολυπλοκότητα, ιδιαίτερα όταν επιβάλλεται η διενέργεια πολλών κύκλων υπολογισμού στη μονάδα του χρόνου. Για το λόγο αυτό συνήθως επιτάσσει τη χρήση ισχυρών υπολογιστικών μονάδων με μεγάλο κόστος. Συνεπώς λόγω του οικονομικού της κόστους, πεδίο χρήσης αυτής της τεχνικής ελέγχου είναι εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης που απαιτούν υψηλής ακρίβειας και βέλτιστης επίδοσης έλεγχο ταχύτητας.

• Τέλος ένα σημαντικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνικής είναι η δυνατότητα που παρέχει για εξοικονόμηση ενέργειας. Η εξοικονόμηση αυτή μπορεί να επιτευχθεί με κατάλληλο προγραμματισμό της εντολής του επιθυμητού πλάτους της μαγνητικής ροής του δρομέα της μηχανής, ανάλογα με την ταχύτητα ή το φορτίο της. Ο προγραμματισμός αυτός έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της μαγνητικής ροής σε τιμές μικρότερες της ονομαστικής, σε περιπτώσεις που η μηχανή δεν απαιτείται να αναπτύξει την μέγιστή της ροπή. Το όφελος από την ενέργεια αυτή είναι, ότι μειώνονται σημαντικά οι μαγνητικές απώλειες λόγω υστέρησης, με αποτέλεσμα η μηχανή να εμφανίζει μικρότερη κατανάλωση με το ίδιο μηχανικό αποτέλεσμα. Επομένως η λειτουργία της γίνεται αποδοτικότερη.

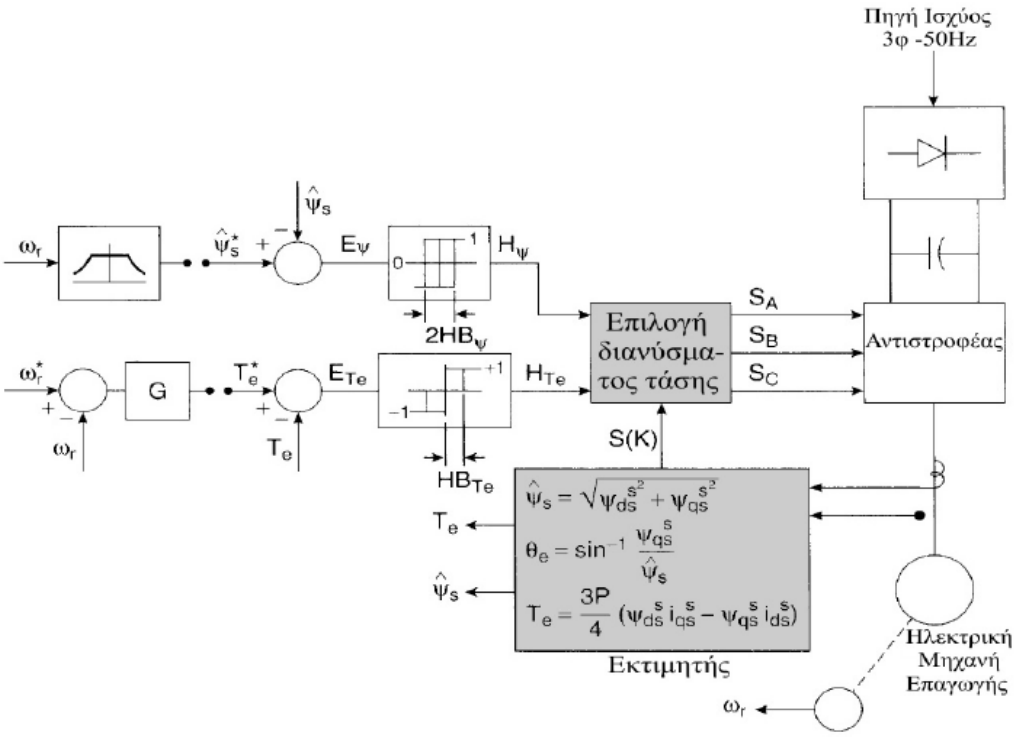
5.3.3 Άμεσος Έλεγχος Ροπής και Ροής (DTFC ή DTC)

Ο άμεσος έλεγχος ροπής και ροής (Direct Torque and Flux Control–DTFC ή συνηθέστερα DTC), ο οποίος εναλλακτικά καλείται και άμεσος αυτοέλεγχος (Direct Self–Control - DSC), αποτελεί μια ιδιαίτερα προηγμένη τεχνική βαθμωτού (μονόμετρου) ελέγχου. Η τεχνική αυτή προτάθηκε για πρώτη φορά στα μέσα της δεκαετίας του 1980 και αποτέλεσε την αρχή μιας νέας γενιάς τεχνικών ελέγχου ηλεκτρικών κινητήρων μέσω αντιστροφέων πηγής τάσης.

Επομένως, σύμφωνα με τα προηγούμενα, θα ήταν αναμενόμενο να εξεταστεί ο άμεσος έλεγχος ροπής και ροής στην παράγραφο του βαθμωτού ελέγχου. Στη διεθνή βιβλιογραφία αυτή η τεχνική ελέγχου εξετάζεται ως επί το πλείστον ξεχωριστά, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που παρουσιάζει. Όπως φανερώνει και η ονομασία της, η τεχνική αυτή συνίσταται στον άμεσο έλεγχο της ροπής και της μαγνητικής ροής της μηχανής, μέσω της επιλογής των κατάλληλων κάθε φορά διανυσμάτων κατάστασης του αντιστροφέα.

Το τεράστιο ενδιαφέρον που έχει πυροδοτήσει αυτή η τεχνική ελέγχου, οφείλεται στο ότι επιτυγχάνει παρόμοια επίδοση ελέγχου με το διανυσματικό έλεγχο με προσανατολισμό πεδίου, χωρίς όμως να συνεπάγεται ανάλογη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Συγκεκριμένα η τεχνική αυτή, όπως και κάθε βαθμωτός έλεγχος, δε λαμβάνει υπόψη της, τη συζευγμένη μορφή των εξισώσεων του μοντέλου της μηχανής και όπως είναι αναμενόμενο, αυτό οδηγεί σε μη βέλτιστη απόκριση. Η μείωση όμως της πολυπλοκότητας και η επακόλουθη μείωση του απαιτούμενου χρόνου υπολογισμού, επιτρέπει τη διενέργεια πολύ γρήγορων κύκλων ελέγχου. Επομένως μπορεί η απόκριση του κάθε κύκλου να μην είναι η βέλτιστη, όμως η ταχύτητα με την οποία αυτή διορθώνεται από τον κύκλο ελέγχου που ακολουθεί, επιτρέπει τον ταχύτατο και με αρκετά μεγάλη ακρίβεια έλεγχο της ηλεκτρικής ροπής (άρα και της ταχύτητας) αλλά και της μαγνητικής ροής της μηχανής. Η απόκριση ροπής στην τεχνική του άμεσου ελέγχου ροής και ροπής, θεωρείται ότι είναι εφάμιλλη εκείνης ενός συστήματος, που χρησιμοποιεί την τεχνική του διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό πεδίου.

Το διάγραμμα ενός τυπικού συστήματος ελέγχου μια ηλεκτρικής μηχανής, το οποίο εφαρμόζει την τεχνική του άμεσου ελέγχου ροής και ροπής φαίνεται στο Σχήμα 5.10.



Σχήμα 5.10: Διάγραμμα τυπικού ελεγκτή που χρησιμοποιεί την τεχνική άμεσου ελέγχου ροπής και ροής.

Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 5.10, τα επιθυμητά σήματα για το πλάτος της μαγνητικής ροής του στάτη και την αναπτυσσόμενη ηλεκτρική ροπή, συγκρίνονται με τα εκτιμώμενα πραγματικά και τα αντίστοιχα σφάλματα οδηγούνται σε δύο ελεγκτές, έναν για το σφάλμα της ροής και έναν για το σφάλμα της ροπής. Οι ελεγκτές αυτοί είναι κβαντιστές, δηλαδή διατάξεις που μετατρέπουν ένα συνεχές σήμα σε διακριτές στάθμες, σύμφωνα με μια συνάρτηση μετατροπής.

Η φιλοσοφία του ελέγχου με την τεχνική αυτή βασίζεται στη βαθύτερη κατανόηση της λειτουργίας του αντιστροφέα και την πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων ελέγχου που προσφέρει (βαθμοί ελευθερίας). Η παρούσα κατάσταση της ηλεκτρικής μηχανής εκτιμάται και ελέγχεται η αναπτυσσόμενη ροπή και η μαγνητική της ροή. Ανάλογα με το πόσο οι τιμές αυτές αποκλίνουν από τις επιθυμητές και ανάλογα με τον κυκλικό τομέα, στον οποίο βρίσκεται το διάνυσμα της μαγνητικής ροής του στάτη, επιλέγεται από έναν πίνακα διακοπτικών καταστάσεων εκείνη η διακοπτική κατάσταση, η οποία θα οδηγήσει το σύστημα ηλεκτρικής κίνησης στην επιθυμητή απόκριση. Ο πίνακας διακοπτικών καταστάσεων είναι δεδομένος και έχει προκύψει από την ανάλυση της επίδρασης του κάθε επιτρεπτού διανύσματος κατάστασης του αντιστροφέα (της προκύπτουσας τάσης από την εφαρμογή του) επί της ροπής και της μαγνητικής ροής της μηχανής. Ανάλογα με το είδος του χρησιμοποιούμενου αντιστροφέα και το πλήθος των σταθμών κβάντισης των σφαλμάτων ροής και ροπής, προκύπτει και το πλήθος των στοιχείων του πίνακα διακοπτικών καταστάσεων.

Η λειτουργία ενός συστήματος, που χρησιμοποιεί τον άμεσο έλεγχο ροπής και ροής, είναι αυτορυθμιζόμενη και μπορεί χωρίς πρόβλημα να επεκταθεί και στα τέσσερα τεταρτημόρια και στην περιοχή εξασθένισης πεδίου. Ένα μειονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι, ότι ο έλεγχος εντός ζώνης υστέρησης, προκαλεί διακύμανση της ροής και της ροπής, ενώ η διακοπτική συχνότητα δεν είναι σταθερή. Παρόλα αυτά το γεγονός ότι η εν λόγω τεχνική δεν

περιλαμβάνει έλεγχο με ανατροφοδότηση ρεύματος, δε χρησιμοποιεί την κλασική τεχνική PWM (Pulse Width Modulation) και δεν απαιτεί τους πολύπλοκους μετασχηματισμούς μεταξύ πλαισίων αναφοράς, αποτελεί συγκριτικό πλεονέκτημα της τεχνικής του άμεσου ελέγχου ροπής.

Και αυτή η τεχνική παρέχει δυνατότητα για εξοικονόμηση ενέργειας, μέσω κατάλληλου προγραμματισμού της εντολής του επιθυμητού πλάτους της μαγνητικής ροής του δρομέα της μηχανής, ανάλογα με την ταχύτητα ή το φορτίο της. Ο προγραμματισμός αυτός έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της μαγνητικής ροής σε τιμές μικρότερες της ονομαστικής, σε περιπτώσεις που η μηχανή δεν απαιτείται να αναπτύξει τη μέγιστή της ροπή. Το όφελος από την ενέργεια αυτή είναι ότι μειώνονται σημαντικά οι μαγνητικές απώλειες λόγω υστέρησης, με αποτέλεσμα η μηχανή να εμφανίζει μικρότερη κατανάλωση με το ίδιο μηχανικό αποτέλεσμα. Επομένως η λειτουργία της γίνεται αποδοτικότερη.

Η μειωμένη υπολογιστική πολυπλοκότητα σε συνδυασμό με την ιδιαίτερα καλή επίδοση της τεχνικής αυτής, δίνει ένα ευρύ πεδίο πρακτικών εφαρμογών για συστήματα που απαιτούν ακριβή έλεγχο ταχύτητας, με ικανοποιητική μεταβατική συμπεριφορά. Η εξέλιξη αυτή έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη μεγάλου ερευνητικού ενδιαφέροντος για αυτή την τεχνική.

5.3.4 Σύγκριση των μελετώμενων τεχνικών ελέγχου

Στα προηγούμενα αναφέραμε αναλυτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε τεχνικής ελέγχου ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής ξεχωριστά. Αυτό όμως που θα είχε ίσως περισσότερη αξία, θα ήταν η σύγκριση των εξεταζόμενων τεχνικών ελέγχου μεταξύ τους, ώστε να είμαστε σε κάθε περίπτωση σε θέση να επιλέγουμε εκείνη που ταιριάζει καλύτερα στην συγκεκριμένη εφαρμογή ηλεκτρικής κίνησης.

Ακολουθεί ένας συγκεντρωτικός πίνακας (Πίνακας 5.1) με τα χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων τεχνικών ελέγχου ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής, ο οποίος επιτρέπει στον αναγνώστη να αποκομίσει μια συγκεντρωτική εικόνα για τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε τεχνικής. Τα στοιχεία αυτά είναι τα θεωρητικώς αναμενόμενα, τα οποία επαληθεύονται από τις σχετικές προσομοιώσεις και από τα πειραματικά αποτελέσματα της εφαρμογής τους.

Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτική κατάσταση των κυριότερων χαρακτηριστικών των εξεταζόμενων τεχνικών ελέγχου ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής

Ιδιότητα	**Μονόμετρος (βαθμωτός) Έλεγχος**		**Διανυσματικός Έλεγχος με προσανατολισμό με το πεδίο του Δρομέα**		**Άμεσος έλεγχος ροπής και ροής (DTC)**
	Ανοικτού βρόχου	**Κλειστού βρόχου**	**Άμεσος**	**Έμμεσος**	
Ακρίβεια Ελέγχου Ταχύτητας	Κακή	Ικανοποιητική	Εξαιρετική	Εξαιρετική	Εξαιρετική
Ταχύτητα Απόκρισης	Μικρή	Αρκετά καλή	Εξαιρετική	Εξαιρετική	Πολύ καλή
Ταλαντωτική Συμπεριφορά	Ναι	Ναι	Ασήμαντη	Ασήμαντη	Μικρή
Υπερύψωση	Ναι	Σημαντική	Ασήμαντη	Ασήμαντη	Πολύ Μικρή
Υπολογιστική Πολυπλοκότητα	Ελάχιστη	Ελάχιστη	Σημαντική	Σημαντική	Όχι ιδιαίτερα μεγάλη
Αντιστάθμιση μεταβολών ταχύτητας που οφείλονται σε μεταβολή του φορτίου ή της συνεχούς τάσης τροφοδοσίας	Όχι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι
Τρόπος ελέγχου αντιστροφέα	SPWM		1) Έλεγχος ρεύματος σε ζώνη υστέρησης 2) SPWM με πρόβλεψη των επιθυμητών τάσεων της μηχανής		Κανένας
Αρμονικές φασικού ρεύματος τροφοδοσίας της μηχανής	Αρμονικό περιεχόμενο πέριξ της συχνότητας φορέα και άνω και σταθερή διακοπτική συχνότητα		1) Σημαντικότατη αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος και μη σταθερή διακοπτική συχνότητα 2) Ομοίως με αριστερά		Αρμονικό περιεχόμενο που πλησιάζει εκείνο του τετραγωνικού παλμού
Δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας μέσω ρύθμισης της μαγνητικής ροής της μηχανής	Όχι	Όχι	Ναι	Ναι	Ναι
Ευαισθησία σε μεταβολή των παραμέτρων της μηχανής	Ναι	Μικρή	Στην τιμή της ωμικής αντίστασης του δρομέα		Στην τιμή της ωμικής αντίστασης του στάτη
Συνολική αξιολόγηση της κάθε τεχνικής ανάλογα με το αποτέλεσμα του ελέγχου (επίδοση) (από 1-5 με άριστα 5)	1	3	4	5	5

5.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[5.1] Ι. Κιοσκερίδης, Ηλεκτρονικά Ισχύος, Τζιόλα, 2008.

[5.2] Peter Vas, "Sensorless Vector and Direct Torque Control", Oxford University Press, 1998.

[5.3] Bimal K. Bose, "Modern Power Electronics and AC Drives", Prentice Hall PTR, 2002.

[5.4] Paul C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill, 1987.

[5.5] Σ. Ν. Μανιάς, "Ηλεκτρονικά Ισχύος", Συμεών, 2000.

[5.6] Π.Β. Μαλατέστας, Σ. Ν. Μανιάς, Συστήματα Οδήγησης Ηλεκτρικών Κινητήρων, Συμεών, 1994.

[5.7] Σ. Ν. Μανιάς, Αθ. Καλετσάνος, "Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά", Συμεών, 2001.

[5.8] Α.Θ. Καντιάνης, ''Μοντελοποίηση επαγωγικού Κινητήρα και νέες Τεχνικές Ελέγχου για Εφαρμογές Ηλεκτρικού Αυτοκίνητου'', Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, 1998.

[5.9] G.C Verghese, S.R. Sanders, "Obsevers fro Flux Estimation in Induction Machines", IEEE Transactions on Indutrial Electronics, vol.35. No.1, pp.85-94, Februar 1998.

[5.10] Muhammad H. Rashid, "Power Electronics Handbook", Academic Press, 2001.

[5.11] Ιάκωβος Στ. Μανωλάς, "Συγκριτική Μελέτη Τεχνικών Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών Επαγωγής", Δημοσίευση, Σχολή ΗΜΜΥ ΕΜΠ, Αθήνα, Οκτώβριος 2006.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ
6

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν αναλυτικά τις κυριότερες τεχνικές ελέγχου ηλεκτρικών κινητήρων επαγωγής, που χρησιμοποιούνται σήμερα σε πρακτικές εφαρμογές και εξετάστηκαν θεωρητικά η λειτουργία και η αναμενόμενη απόκριση των συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης που χρησιμοποιούν τις τεχνικές αυτές.

Το πέρασμα από τη θεωρητική ανάλυση στην πρακτική εφαρμογή των εν λόγω τεχνικών ελέγχου διαθέτει και ένα ενδιάμεσο στάδιο, την προσομοίωση, η οποία συνήθως εκτελείται με τη βοήθεια ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η προσομοίωση χρησιμοποιεί μαθηματικά μοντέλα του εξεταζόμενου συστήματος βάσει των οποίων υπολογίζει την απόκριση και τη συμπεριφορά του πραγματικού συστήματος. Όπως είναι ευνόητο, η προσομοίωση αποτελεί απλώς μια προσπάθεια εκτίμησης και προσέγγισης της απόκρισης και της συμπεριφοράς του πραγματικού συστήματος. Η ακρίβειά της όμως, εξαρτάται από τη δυνατότητα του χρησιμοποιούμενου μοντέλου να προβλέψει σωστά τη συμπεριφορά του εξεταζόμενου πραγματικού συστήματος. Για το λόγο αυτό λέγεται, ότι η προσομοίωση βρίσκεται στο μεταίχμιο μεταξύ θεωρίας και πειράματος, αφού χρησιμοποιεί θεωρητικά μοντέλα για να προβλέψει τη συμπεριφορά της πραγματικής μηχανής. Επειδή δεν είναι εφικτό τα θεωρητικά μοντέλα να συμπεριλάβουν όλες τις παραμέτρους ενός πραγματικού συστήματος, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης θα αποκλίνουν γενικά από τα αντίστοιχα του πραγματικού συστήματος. Θα βρίσκονται όμως πλησίον αυτών, αν έχει επιλεγεί ένα αρκετά αντιπροσωπευτικό μοντέλο του πραγματικού συστήματος. Επομένως τα αποτελέσματα της προσομοίωσης τις περισσότερες φορές αποτελούν ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της πραγματικής μηχανής πριν τη χρήση μιας νέας θεωρητικής τεχνικής ελέγχου στο πραγματικό σύστημα, το οποίο μπορεί να βοηθήσει τον μελετητή να βγάλει χρήσιμα συμπεράσματα γλιτώνοντας πολύτιμο χρόνο και αποφεύγοντας πιθανά ατυχήματα και καταστροφές. Δεν μπορούν όμως σε καμιά περίπτωση να υποκαταστήσουν τα πειραματικά αποτελέσματα, υπό την έννοια ότι μόνο τα πειραματικά αποτελέσματα δίνουν μια σαφή εικόνα, χωρίς καμία αίρεση, για την επίδοση και τη συμπεριφορά ενός πραγματικού συστήματος ηλεκτρικής κίνησης.

6.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

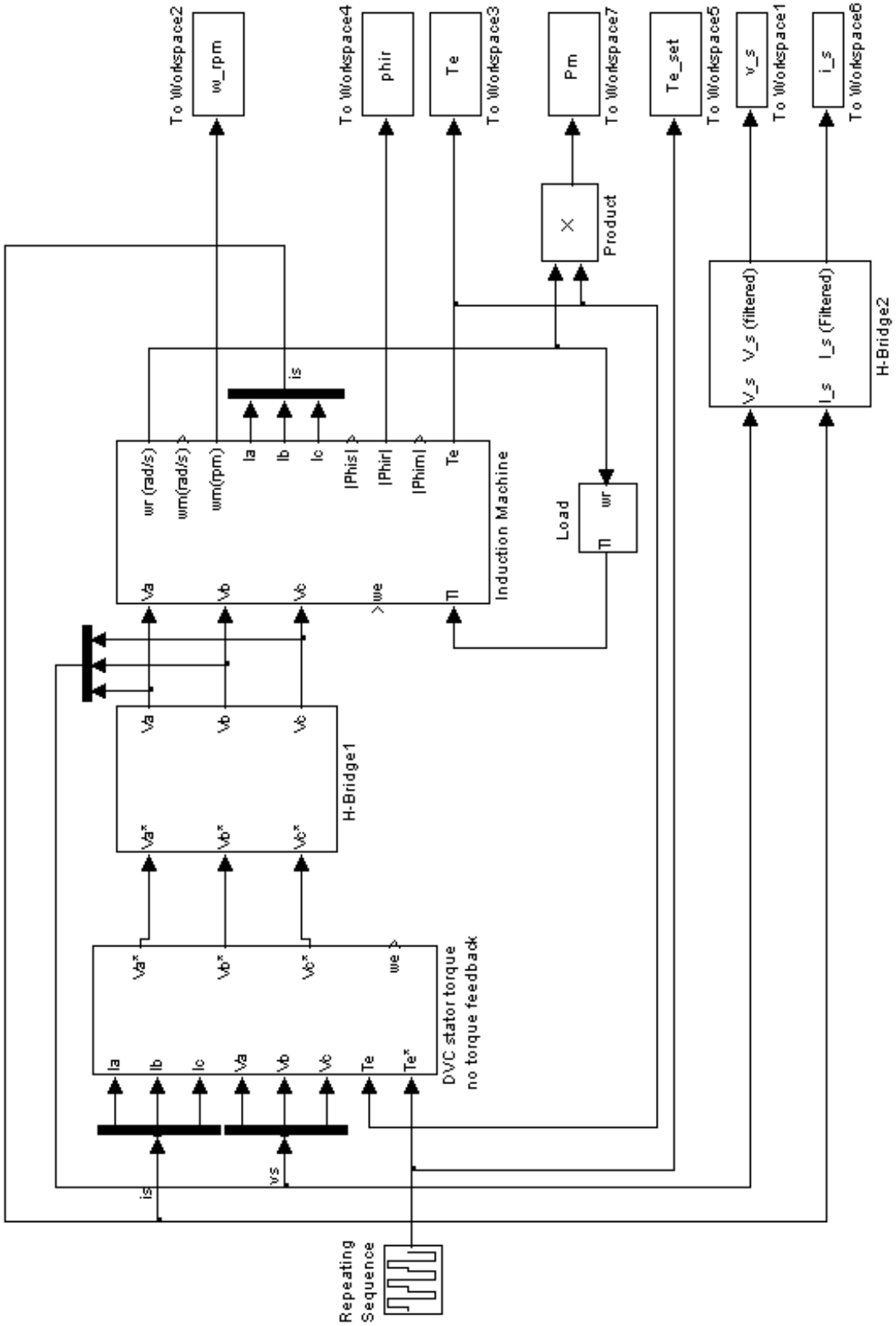
Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς και της απόκρισης ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης κατά την εφαρμογή των τεχνικών ελέγχου του, θα χρειαστεί αφενός μεν να βρεθούν τα κατάλληλα μοντέλα που θα προσεγγίζουν όσο το δυνατόν πλησιέστερα το πραγματικό σύστημα και αφετέρου, να εισαχθούν τα μοντέλα αυτά σε ένα πρόγραμμα αριθμητικής ανάλυσης, το οποίο θα εκτελείται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και από το οποίο θα υπολογίζονται, βάσει των μαθηματικών μοντέλων, όλα τα μεγέθη του συστήματος που μας ενδιαφέρουν. Για την εκτέλεση της προσομοίωσης θα χρησιμοποιηθεί ένας ψηφιακός προσωπικός ηλεκτρονικός υπολογιστής (PC) γενικού σκοπού και ένα ιδιαίτερα γνωστό και διαδεδομένο πακέτο προγραμμάτων αριθμητικής ανάλυσης γενικής χρήσης, το MATLAB,

και ειδικότερα το λογισμικό προσομοίωσης που το συνοδεύει, το SIMULINK. Στη συνέχεια θα πρέπει να εισαχθούν τα κατάλληλα μοντέλα στο παραπάνω λογισμικό. Το κεφάλαιο αυτό επικεντρώνεται στις τεχνικές του έμμεσου και άμεσου διανυσματικού έλεγχου και παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα του μοντέλου Simulink που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση. Το σύστημα περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες εξισώσεις για μια επαγωγική μηχανή, όπως αυτή περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Το πρώτο υποσύστημα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1, είναι ο ελεγκτής (controller), ο οποίος προσαρμόζεται στο εκάστοτε μοντέλο που λειτουργεί. Το δεύτερο υποσύστημα, είναι το μπλοκ του τριφασικού αντιστροφέα (H-Bridge 1), ο οποίος ρυθμίζει την τάση αναφοράς από τον ελεγκτή στις εκάστοτε τάσεις των φάσεων μέσω του μετατροπέα διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM). Το αμέσως επόμενο υποσύστημα, είναι το μπλοκ της μηχανής επαγωγής (Induction Machine), το οποίο περιλαμβάνει τις απαραίτητες εξισώσεις λειτουργίας της. Το μπλοκ δέχεται τις τάσεις των φάσεων σαν τιμές εισόδου και υπολογίζει ταχύτητες, εντάσεις, ροές καθώς και την αναπτυσσόμενη ροπή (Πίνακας 6.1). Κάτω δεξιά βρίσκεται το υποσύστημα που φιλτράρει τις τάσεις εισόδου και τις εντάσεις εξόδου με ένα ρυθμιζόμενο φίλτρο 8 βαθμίδων, χαμηλής διέλευσης (H-Bridge 2). Το υποσύστημα, στο δεξιό άκρο δέχεται τις τιμές εξόδου του μοντέλου και αποστέλλει αυτές στην περιοχή λειτουργίας της Matlab (Πίνακας 6.2).

Πίνακας 6.1 : Τιμές εισόδου για συστήματα με διανυσματικό έλεγχο

Επαναλαμβανομένη ακολουθία	Εφαρμόζεται σε όλα τα δομικά διαγράμματα και η μηχανή προσπαθεί να ακολουθήσει τη ροπή αναφοράς.
J	Αδράνεια του άξονα, συνήθης τιμή 0.05
Kw	Είναι η σταθερά που καθορίζει τις απώλειες περιστροφής της μηχανής. $T_L = K_w \omega^2$, συνήθως 0.00047502
freqt	Είναι η συχνότητα στην οποία λειτουργεί το PWM, συνήθως στα 2000 Hz.
Vdc	Είναι η τιμή του κυκλώματος συνεχούς ρεύματος, συνήθως 300V.
Tstop	Χρόνος προσομοίωσης , συνήθως 10s
t_J_large	Μετά από αυτή την τιμή, η αδράνεια του κινητήρα μεταβάλλεται σε μια μεγίστη τιμή, έτσι η ταχύτητα της μηχανής δεν αλλάζει με την επιβολή ροπής, συνήθως 4s.
fc*	Όλες οι τιμές fci_dvc, fcv, κ.λ.π χρησιμοποιούνται για να ελέγξουν το φιλτράρισμα κατά την έξοδο των τιμών των ελεγκτών και της μηχανής. Χαμηλές τιμές φιλτραρίσματος μπορούν να προκαλέσουν ασθενέστερα σήματα αλλά επίσης μπορούν να δημιουργήσουν αστάθειες στο σύστημα.



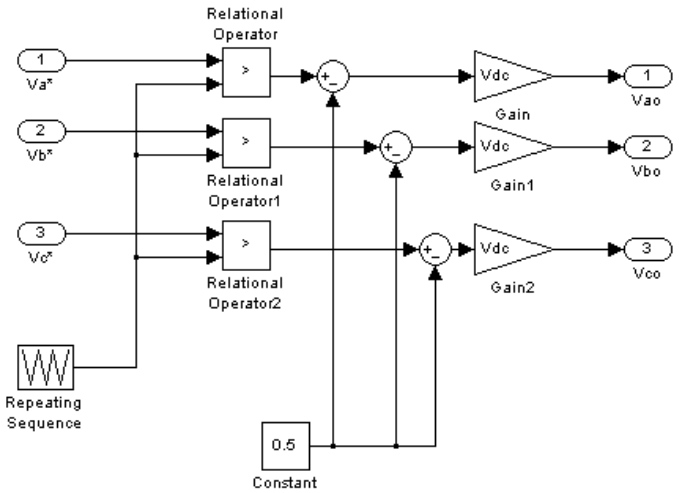
Σχήμα 6.1 : Δομικό διάγραμμα προσομοίωσης για συστήματα διανυσματικού ελέγχου

Πίνακας 6.2 : Τιμές εξόδου για συστήματα με διανυσματικό έλεγχο

Te_set	Επιβαλλόμενη ροπή η οποία προκύπτει άμεσα από την επαναλαμβανόμενη ακολουθία σε Nm.
w_rpm	Μηχανική ταχύτητα του άξονα σε rpm.
phir	Μαγνητική ροη του ρότορα εντός της μηχανής σε Wb.
Te	Αναπτυσσόμενη ροπή της μηχανής σε Nm.
Pm	Μηχανική ισχύς που παράγεται από τη μηχανή σε W.
v_s	V_a ,V_b και V_c , Φιλτραρισμένα σε 1000 Hz σε V.
i_s	I_a , I_b και I_c , Φιλτραρισμένα σε 1000 Hz σε A.

Η πηγή ισχύος του πραγματικού συστήματος είναι το τριφασικό σύστημα τάσεων του δικτύου, το οποίο στη συνέχεια ανορθώνεται με τη βοήθεια ενός ελεγχόμενου ανορθωτή και τροφοδοτεί τον αντιστροφέα. Επειδή θεωρούμε τον ανορθωτή ιδανικό και επιλέγουμε πάντα σταθερή συνεχή τάση τροφοδοσίας του αντιστροφέα, μοντελοποιούμε το σύστημα αυτό με μια πηγή ισχύος συνεχούς τάσης (DC) που έχει σταθερή τιμή.

Ο τριφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης σε συνδεσμολογία γέφυρας μοντελοποιείται όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2 και περιλαμβάνει το κύκλωμα ελέγχου του με την τεχνική PWM.

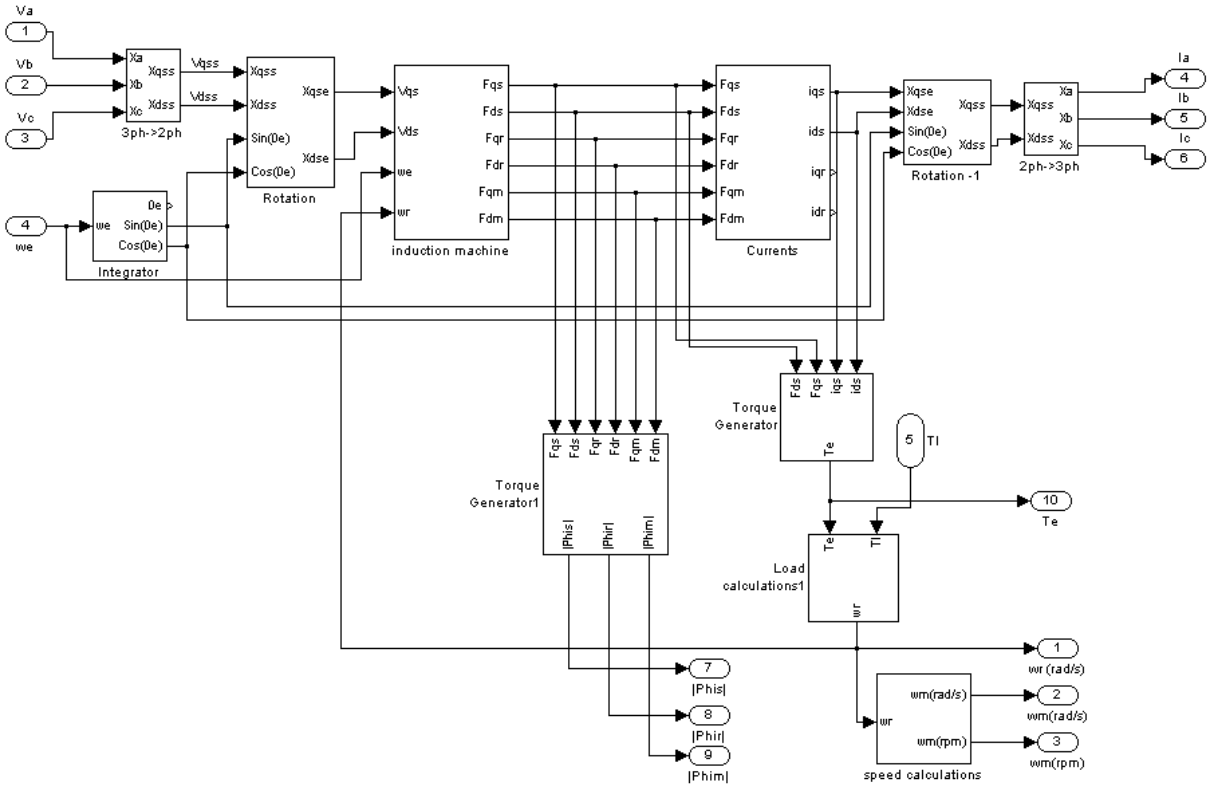


Σχήμα 6.2 : Μοντέλο για τον τριφασικό αντιστροφέα πηγής τάσης σε συνδεσμολογία γέφυρας με έλεγχο PWM.

Η ασύγχρονη τριφασική μηχανή μοντελοποιείται όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3. Για την προσομοίωση της τριφασικής ασύγχρονης ηλεκτρικής μηχανής επαγωγής θα χρειαστούμε ένα δυναμικό μοντέλο το οποίο θα προσομοιώνει ικανοποιητικά τόσο τη μόνιμη, όσο και τη μεταβατική συμπεριφορά της. Ένα κατάλληλο μοντέλο έχει παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 4 και ειδικότερα στην παράγραφο 4.9.3.2 και δεν είναι άλλο από το δυναμικό μοντέλο της μηχανής σε πλαίσιο αναφοράς δύο καθέτων αξόνων (dq) το οποίο περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα (εξισώσεις Kron). Το μοντέλο αυτό περιγράφεται πλήρως από τις

εξισώσεις 4.60–4.63 τις οποίες και θα πρέπει να εισάγουμε στο SIMULINK, ώστε να δημιουργήσουμε το μοντέλο της μηχανής. Παρατηρούμε ότι, εφόσον το μοντέλο αυτό αναφέρεται σε ένα πλαίσιο αναφοράς δύο καθέτων αξόνων (dq) το οποίο περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, θα πρέπει και οι είσοδοί του να μετασχηματιστούν στο ίδιο πλαίσιο αναφοράς. Αυτό θα γίνει με την υλοποίηση στο SIMULINK του γενικού αλγεβρικού μετασχηματισμού, που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 4.9.2.

Ο αλγόριθμος ελέγχου θα πρέπει να εξασφαλίζει πάντα, ότι το πλαίσιο αναφοράς διατηρεί τον επιθυμητό προσανατολισμό με το πεδίο του δρομέα. Πλήρη αποσύζευξη των εξισώσεων του μοντέλου της μηχανής θα έχουμε, όταν προσανατολιστεί ο ευθύς άξονας του περιστρεφόμενου πεδίου με τη σύγχρονη ταχύτητα πλαισίου αναφοράς δύο αξόνων με το διάνυσμα της μαγνητικής ροής του δρομέα, όταν και αυτό περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Η αποσύζευξη αυτή απορρέει από τις εξισώσεις του μοντέλου για τις συνθήκες του προσανατολισμού και παραμένει πλήρης, για όσο χρόνο διατηρείται ο προσανατολισμός αυτός. Για το λόγο αυτό η διαρκής διατήρηση του σωστού προσανατολισμού από τον αλγόριθμο ελέγχου είναι μείζονος σημασίας και βασική προϋπόθεση για την επιτυχία του εφαρμοζόμενου ελέγχου.



Σχήμα 6.3: Δυναμικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της τριφασικής ασύγχρονης επαγωγικής μηχανής

Το φορτίο που έχουμε, θεωρείται φορτίο σταθερής ροπής, που σημαίνει ότι στη μηχανική εξίσωση του μοντέλου η ροπή του φορτίου T_L θεωρείται ως μια σταθερά. Η προσέγγιση αυτή είναι λογική αφού το φορτίο που θα χρησιμοποιήσουμε το επιλέγουμε εμείς, έτσι ώστε να έχει τα ανωτέρω χαρακτηριστικά.

Μέχρι στιγμής όμως δεν έχουμε αναφερθεί καθόλου στο σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης. Αυτό δε συνέβη τυχαία. Επειδή οι αλγόριθμοι ελέγχου διαφέρουν στις τρεις εξεταζόμενες τεχνικές, ομοίως θα διαφέρουν μεταξύ τους και τα συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου που χρησιμοποιούνται σε κάθε τεχνική. Για το λόγο αυτό θα παρουσιάσουμε στα επόμενα χωριστά το κύκλωμα παρακολούθησης και ελέγχου που χρησιμοποιείται για κάθε επιμέρους τεχνική ελέγχου, θα εξετάσουμε τη

διασύνδεσή του με το κύκλωμα ισχύος, που όπως αναφέραμε παραμένει αμετάβλητο, και θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα από την προσομοίωση της κάθε τεχνικής ελέγχου.

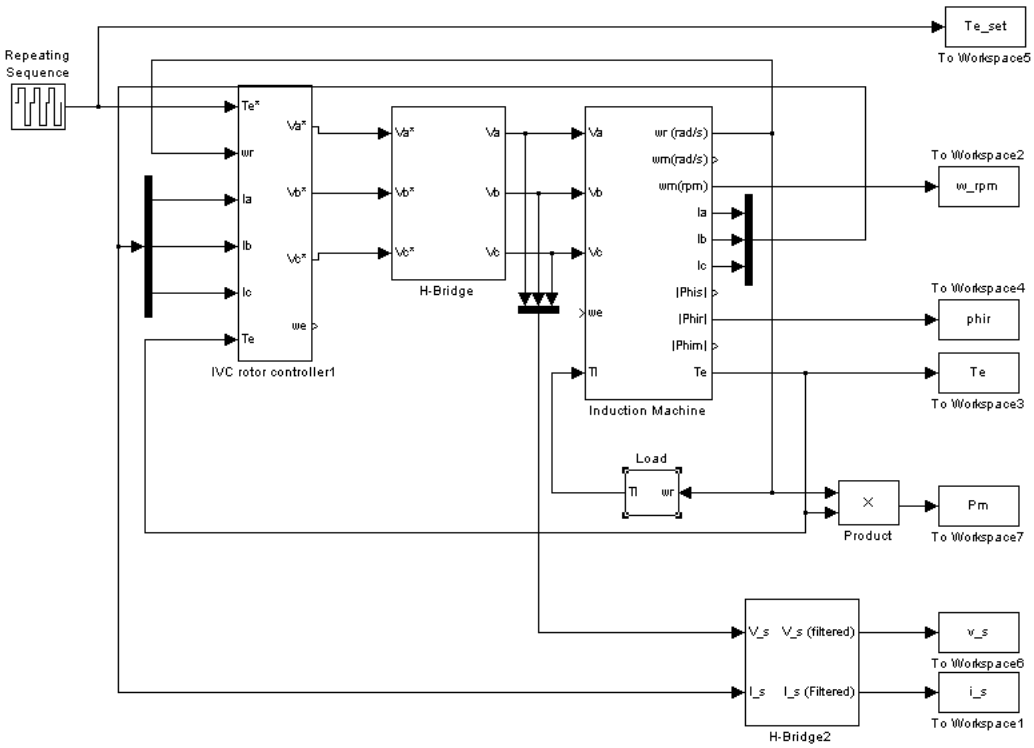
Όλες οι προσομοιώσεις τρέχουν με την παρακάτω ακολουθία. Μια χαμηλή ροπή αναφοράς (1Nm) εφαρμόζεται για 2s (0s - 2s). Αυτό επιτρέπει στις ροπές να σταθεροποιηθούν στη μηχανή. Μια υψηλή ροπή αναφοράς (5Nm) εφαρμόζεται για 4s (2s - 6s). Καθώς συμβαίνει αυτό, η μηχανή συμπεριφέρεται σαν κινητήρας και η ταχύτητα θα αυξηθεί μέχρι οι απώλειες περιστροφής να γίνουν ίσες με την εφαρμοζόμενη ροπή. Μια πολύ υψηλή αδράνεια (10,000J) εμφανίζεται στα 4s. Αυτό διατηρεί την ταχύτητα της μηχανής σταθερή, έτσι ώστε να παράγεται ισχύς με αρνητική ροπή. Χωρίς αυτή την αλλαγή, όταν εφαρμόζεται αρνητική ροπή, η μηχανή θα αντιστρέφει την περιστροφή στην άλλη διεύθυνση. Εφαρμόζεται τώρα μια αρκετά υψηλή αρνητική ροπή αναφοράς (-5Nm) για τα 4s (6s - 10s). Από τη στιγμή που η ταχύτητα παραμένει σταθερή λόγω της μεγάλης αδρανείας, η μηχανή είναι τώρα μια γεννήτρια που παράγει ισχύ.

6.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΠΕΔΙΟΥ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η προσομοίωση των επιμέρους τεχνικών ελέγχου. Αρχικά προσομοιώνεται η τεχνική του διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό πεδίου. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το μοντέλο του κυκλώματος ισχύος παραμένει αμετάβλητο σε όλες τις τεχνικές ελέγχου, ενώ το μόνο που διαφοροποιείται είναι το κύκλωμα παρακολούθησης και ελέγχου. Όπως είναι γνωστό υπάρχουν διάφορα είδη διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό πεδίου, τα οποία έχουν περιγραφεί θεωρητικά επαρκώς στην παράγραφο 5.3.2. Στο κεφάλαιο αυτό θα προσομοιωθεί τόσο ο άμεσος, όσο και ο έμμεσος διανυσματικός έλεγχος.

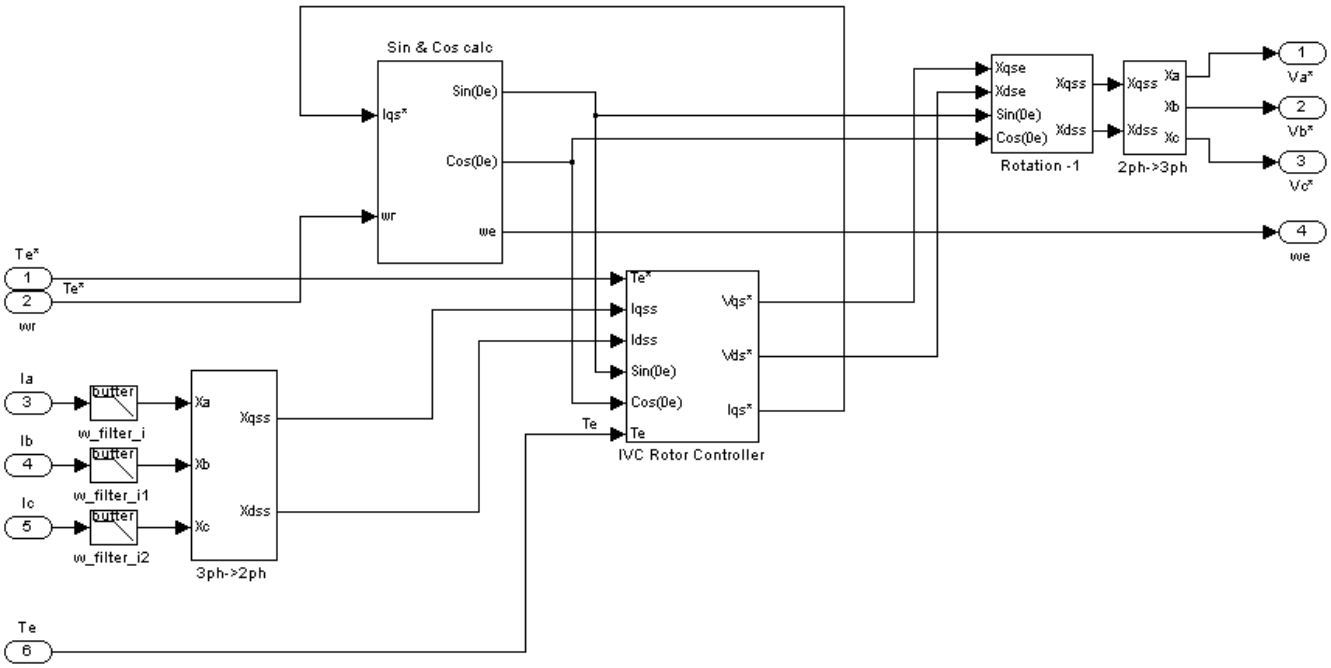
6.3.1 Έμμεσος διανυσματικός έλεγχος

Στον έμμεσο διανυσματικό έλεγχο προσομοιώνονται τα εξής δύο μοντέλα: το μοντέλο του δρομέα χωρίς ανάδραση καθώς και του δρομέα με ανάδραση. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του ελέγχου φαίνεται στο Σχήμα 6.4 και είναι ίδιο και για τα δύο μοντέλα.



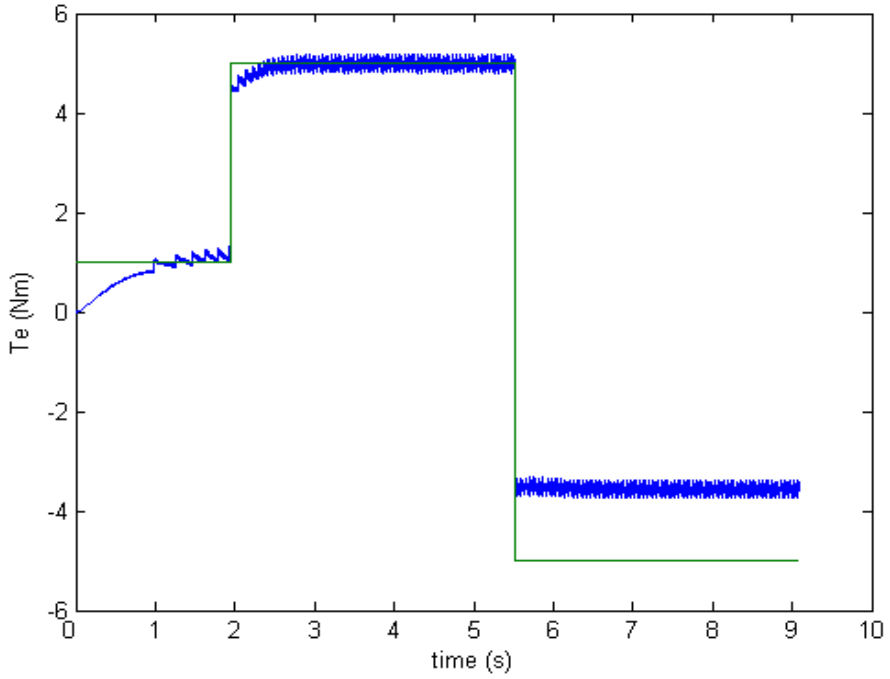
Σχήμα 6.4 : Προσομοίωση στο SIMULINK του έμμεσου διανυσματικού ελέγχου του δρομέα

Η τροφοδότηση του ελεγκτή του έμμεσου διανυσματικού ελέγχου του δρομέα φαίνεται στο Σχήμα 6.5.

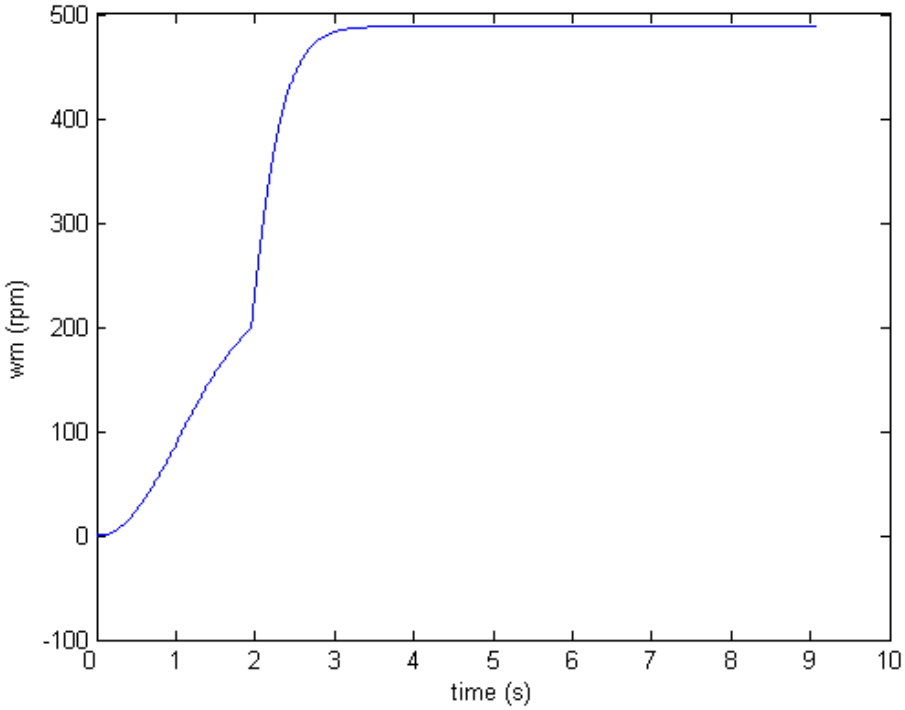


Σχήμα 6.5: Τροφοδότηση ελεγκτή έμμεσου διανυσματικού ελέγχου του δρομέα

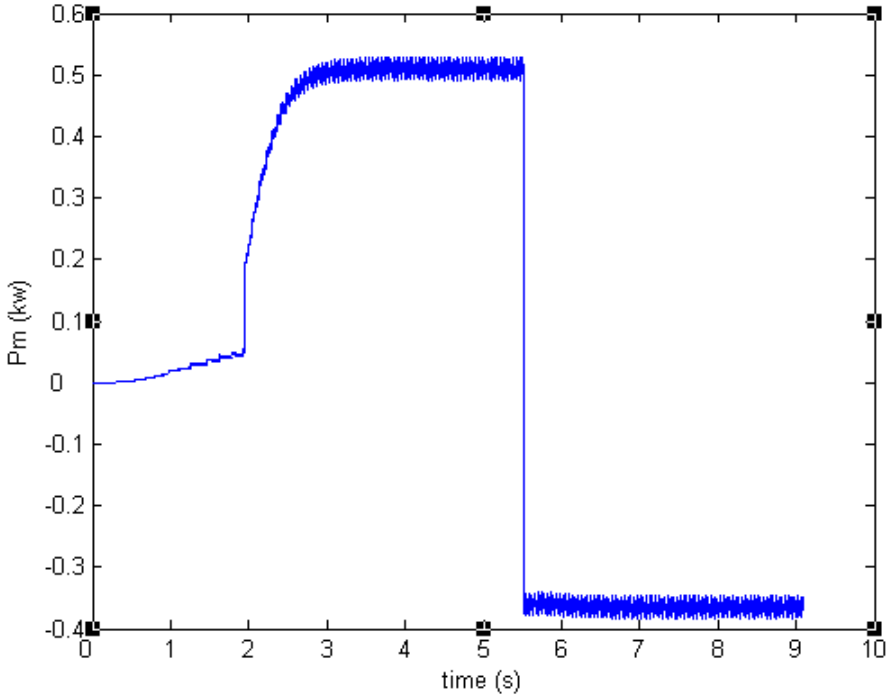
Στο σύστημα έμμεσου διανυσματικού ελέγχου ροπής και στα δύο μοντέλα, η ηλεκτρική ταχύτητα προκύπτει από την ταχύτητα του άξονα και την υπολογιζόμενη γωνία ολίσθησης. Ο ελεγκτής περιορίζει το μαγνητικό πεδίο του ρότορα (phir) να είναι ευθυγραμμισμένο με τον ds-άξονα. Καθώς το I_{qs} είναι ευθέως ανάλογο με τη ροπή, το ρεύμα I_{qs} ελέγχεται να ακολουθεί τη ροπή αναφοράς, που εφαρμόζεται στο σύστημα.



Σχήμα 6.6 : Απόκριση ροπής για έμμεσο διανυσματικό έλεγχο χωρίς ανάδραση



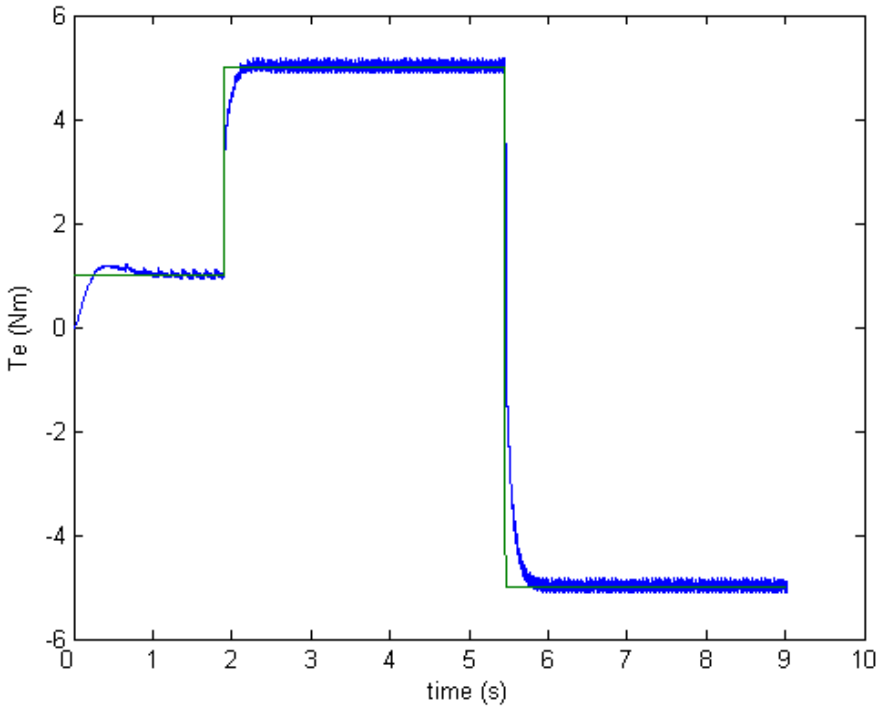
Σχήμα 6.7 : Απόκριση ταχύτητας για έμμεσο διανυσματικό έλεγχο χωρίς ανάδραση



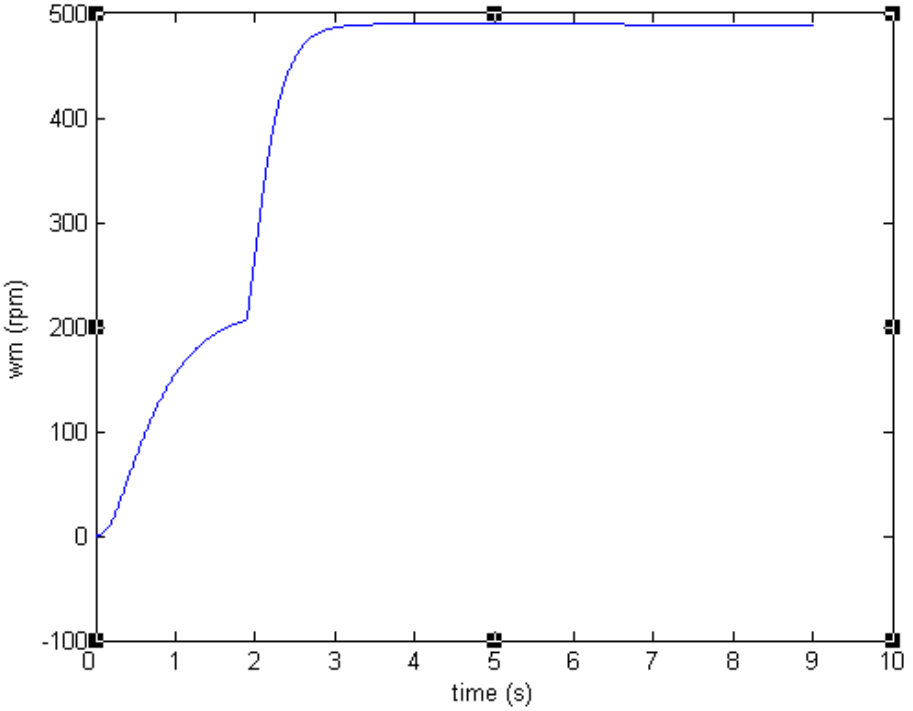
Σχήμα 6.8 :Απόκριση ισχύος για έμμεσο διανυσματικό έλεγχο χωρίς ανάδραση

Το μοντέλο χωρίς ανάδραση δεν χρησιμοποιεί μετρήσεις από τη ροπή για να ελέγξει τη ροπή του κινητήρα, βασιζόμενη στην αναλογία του I_{qs} και της ροπής. Η απόκριση ροπής τους συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 6.6 και η ροπή ακολουθεί τη ροπή αναφοράς, εκτός από την περίπτωση που η ροπή είναι αρνητική, οπού εκεί υπάρχει μετάθεση του ρεύματος. Στο Σχήμα 6.7 φαίνεται η απόκριση της ταχύτητας της μηχανής και στο Σχήμα 6.8 απεικονίζεται η ισχύς της μηχανής. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα 6.6, 6.7 και 6.8, από το χρόνο 0s μέχρι 6s περίπου, η μηχανή λειτουργεί σαν κινητήρας, και από 6s έως 10s περίπου, σαν γεννήτρια, εξαιτίας της θετικής ταχύτητας και της αρνητικής ροπής.

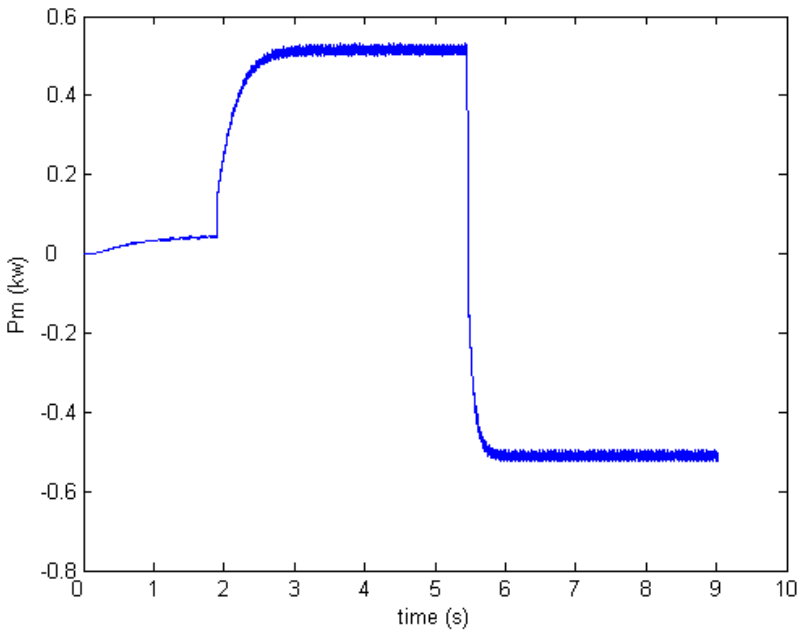
Το μοντέλο ανάδρασης θεωρεί ότι υπάρχει ένας αισθητήρας ροπής στον άξονα και συνεπώς το ρεύμα αναφοράς I_{qs} βασίζεται στη διαφορά μεταξύ της ροπής αναφοράς και της πραγματικής ροπής και είναι ελεγχόμενο από έναν PI ελεγκτή. Αυτό προσφέρει σημαντικά καλύτερη απόκριση στη ροπή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.9. Πέρα από την καλύτερη απόκριση στη ροπή, το σύστημα αυτό είναι πανομοιότυπο με το σύστημα χωρίς ανάδραση όσον αφορά την απόκριση ταχύτητας (Σχήμα 6.10) και την απόκριση ισχύος (Σχήμα 6.11).



Σχήμα 6.9 : Απόκριση ροπής για έμμεσο διανυσματικό έλεγχο με ανάδραση



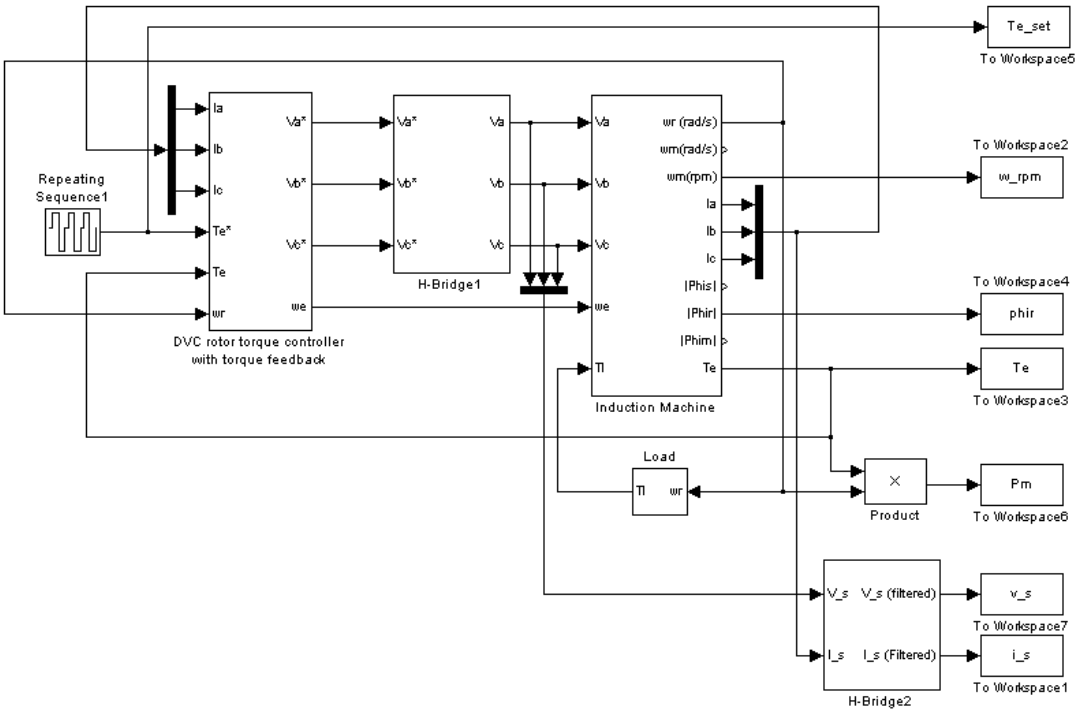
Σχήμα 6.10 : Απόκριση ταχύτητας για έμμεσο διανυσματικό έλεγχο με ανάδραση



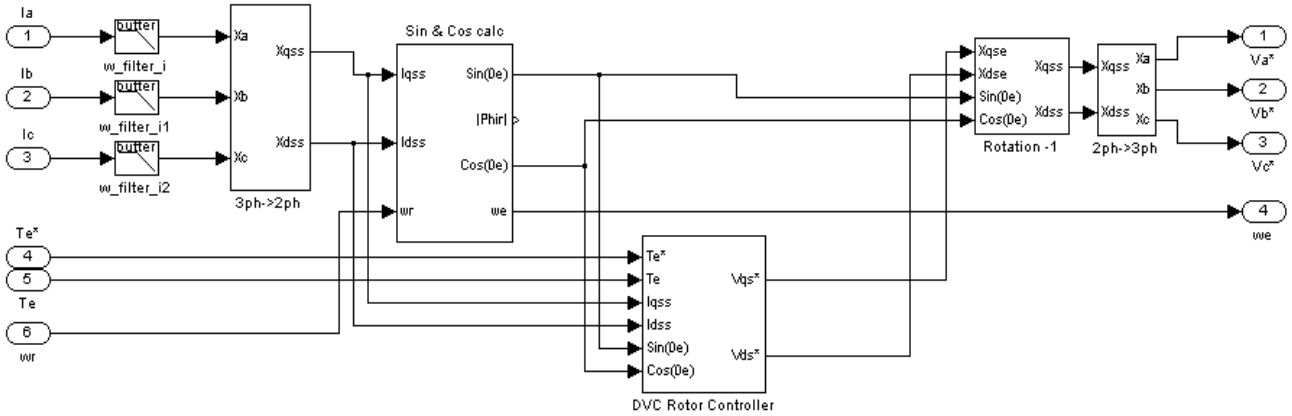
Σχήμα 6.11 : Απόκριση ισχύος για έμμεσο διανυσματικό έλεγχο με ανάδραση

6.3.2 Άμεσος διανυσματικός έλεγχος με μαγνητική ροή στο δρομέα

Στο σύστημα άμεσου διανυσματικού ελέγχου με μαγνητική ροή στο δρομέα, προσομοιώνονται τα εξής δύο μοντέλα: το μοντέλο του δρομέα χωρίς ανάδραση καθώς και του δρομέα με ανάδραση. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του ελέγχου φαίνεται στο Σχήμα 6.12 και είναι ίδιο και για τα δύο μοντέλα.

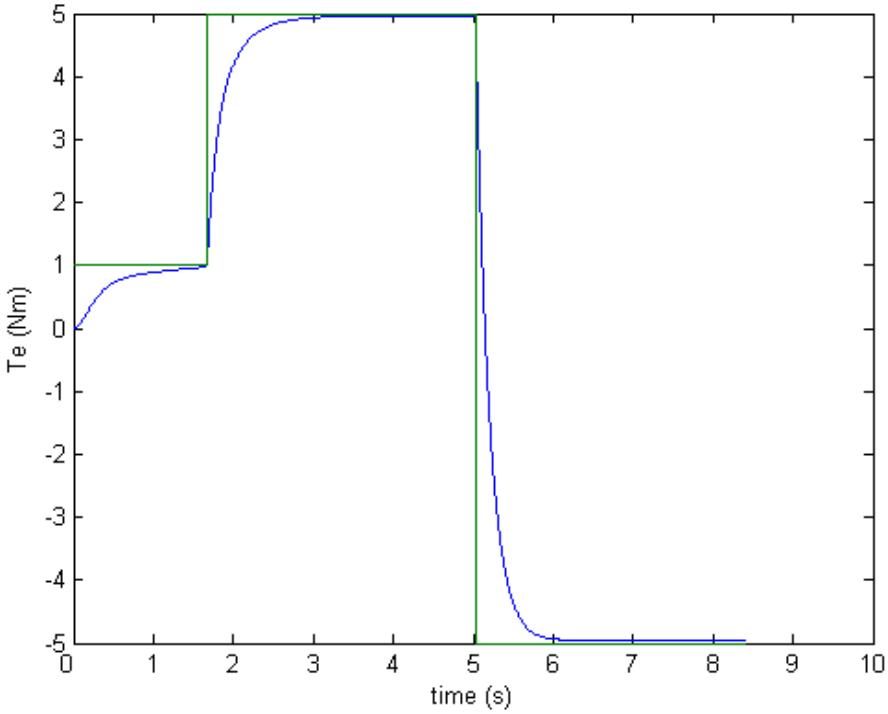


Σχήμα 6.12 : Δομικό διάγραμμα άμεσου διανυσματικού ελέγχου με μαγνητική ροή στο δρομέα

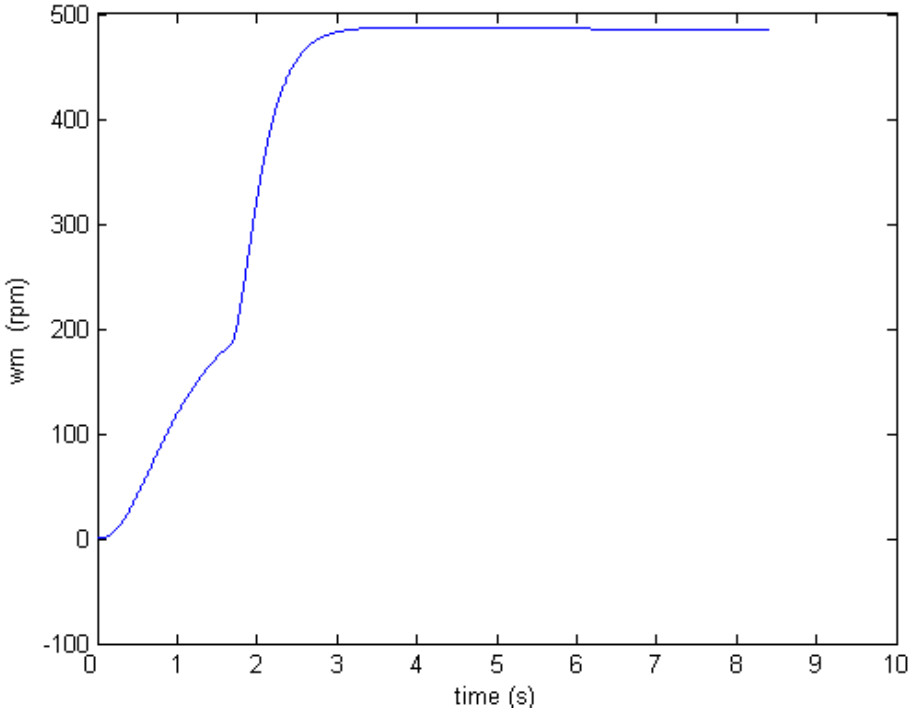


Σχήμα 6.13: Τροφοδότηση ελεγκτή άμεσου διανυσματικού ελέγχου με μαγνητική ροή στο δρομέα

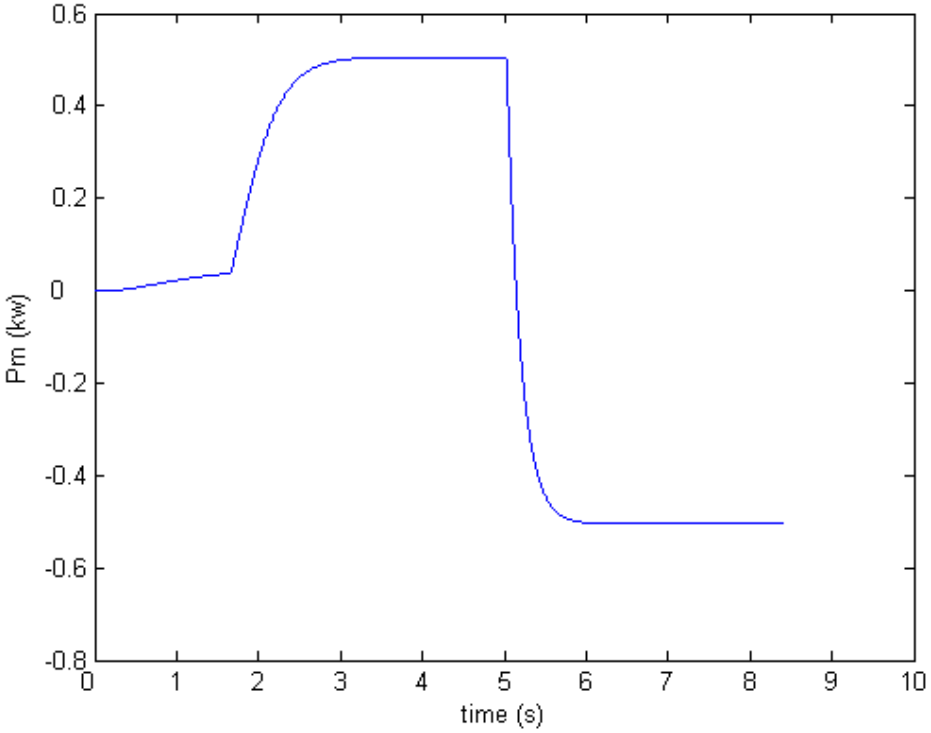
Στο σύστημα άμεσου διανυσματικού ελέγχου με **μαγνητική ροή στο δρομέα** και στα δύο μοντέλα, η ηλεκτρική ταχύτητα προκύπτει από τις τιμές της ροής του δρομέα στο σταθερό (stationary) άξονα. Ο ελεγκτής περιορίζει τη ροή του δρομέα να είναι ευθυγραμμισμένη με τον ds-άξονα. Καθώς το I_{qs} είναι ευθέως ανάλογο με τη ροπή, το ρεύμα I_{qs} ελέγχεται να ακολουθεί τη ροπή αναφοράς που εφαρμόζεται στο σύστημα.



Σχήμα 6.14 : Απόκριση ροπής για άμεσο διανυσματικό έλεγχο με μαγνητική ροή στο δρομέα χωρίς ανάδραση

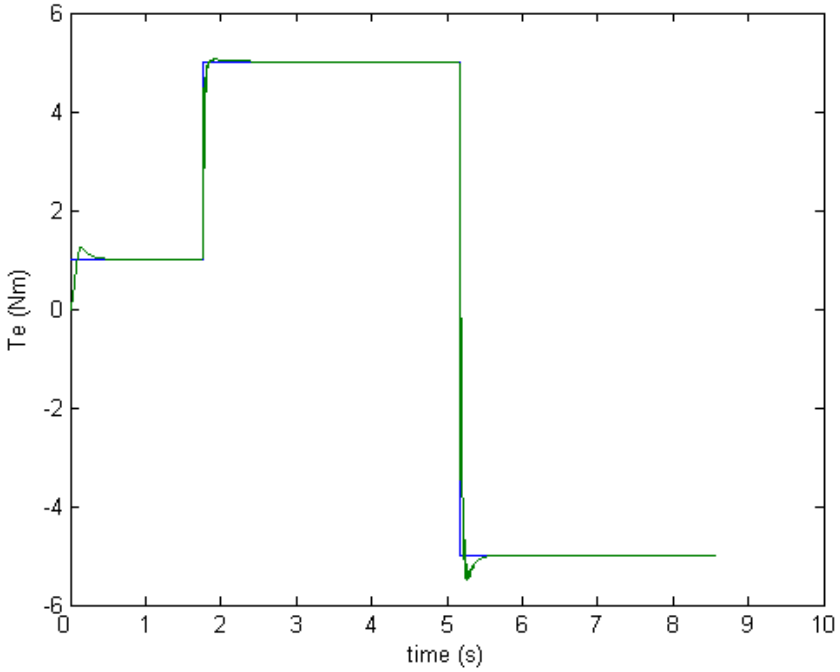


Σχήμα 6.15 : Απόκριση ταχύτητας για άμεσο διανυσματικό έλεγχο με μαγνητική ροή στο δρομέα χωρίς ανάδραση

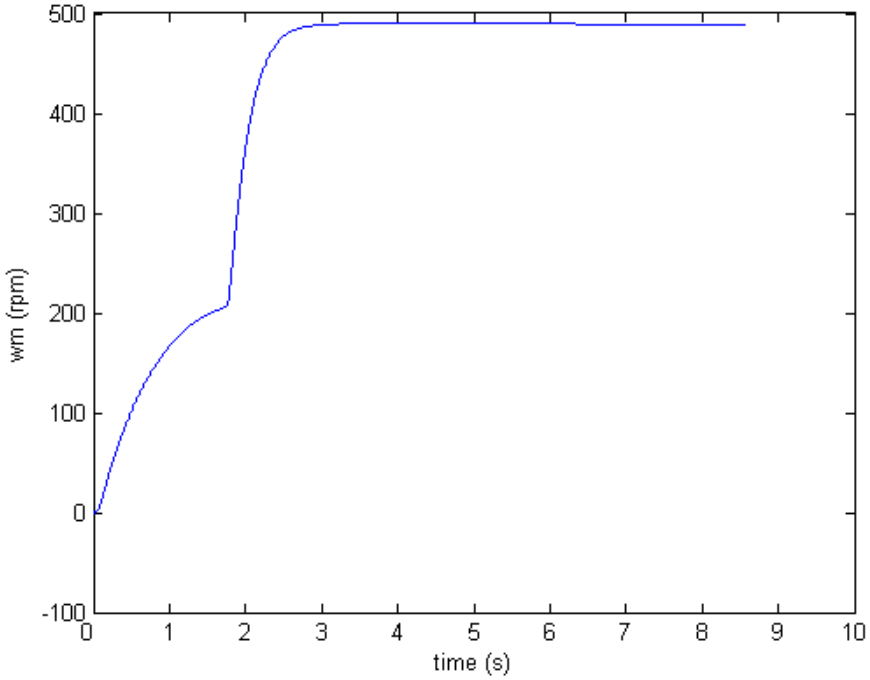


Σχήμα 6.16 : Απόκριση ισχύος για άμεσο διανυσματικό έλεγχο χωρίς ανάδραση με μαγνητική ροή στο δρομέα

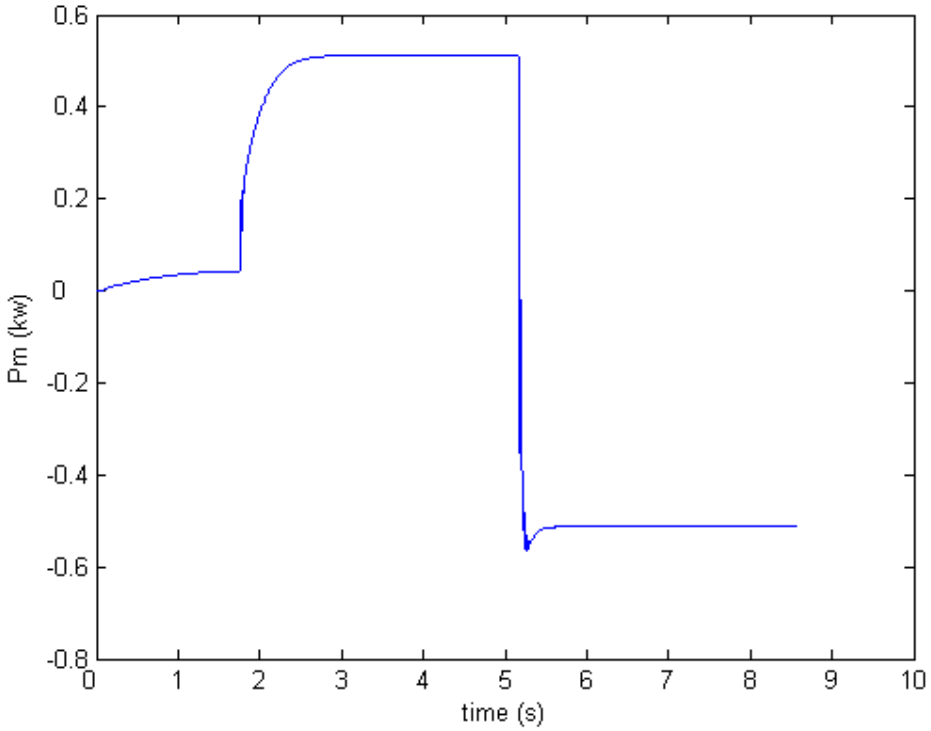
Το μοντέλο χωρίς ανάδραση δεν χρησιμοποιεί μετρήσεις από τη ροπή για να ελέγξει τη ροπή του κινητήρα, βασιζόμενη στην αναλογία του I_{qs} και της ροπής. Η απόκριση ροπής τους συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 6.14 και η ροπή ακολουθεί τη ροπή αναφοράς, με μια αργή απόκριση. Στο Σχήμα 6.15 φαίνεται η απόκριση της ταχύτητας της μηχανής και στο Σχήμα 6.16 απεικονίζεται η ισχύς της μηχανής. Όπως μπορεί να δει κανείς από αυτά τα διαγράμματα, από το χρόνο 0s μέχρι 6s περίπου, η μηχανή συμπεριφέρεται σαν κινητήρας, και από 6s εώς 10s περίπου, σα γεννήτρια παράγοντας ισχύ, εξαιτίας της θετικής ταχύτητας και της αρνητικής ροπής.



Σχήμα 6.17 : Απόκριση της ροπής για άμεσο διανυσματικό έλεγχο με μαγνητική ροή στο δρομέα με ανάδραση



Σχήμα 6.18 : Απόκριση της ταχύτητας για άμεσο διανυσματικό έλεγχο με μαγνητική ροή στο δρομέα με ανάδραση

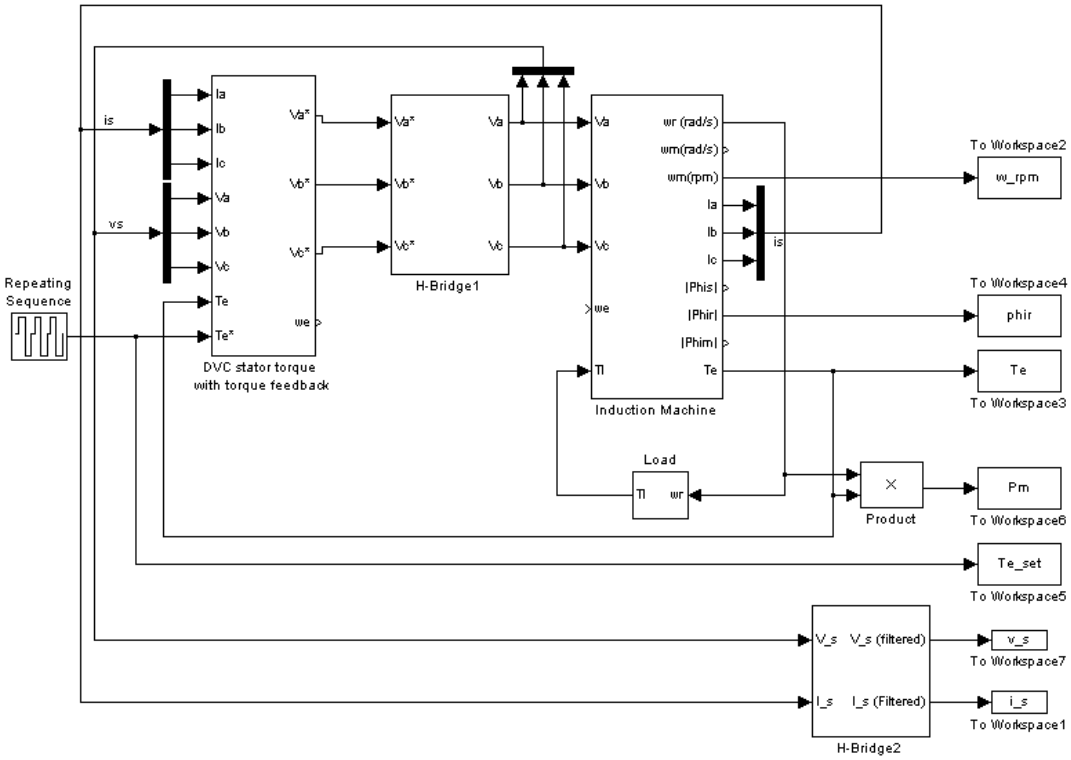


Σχήμα 6.19 : Απόκριση ισχύος για άμεσο διανυσματικό έλεγχο με μαγνητική ροή στο δρομέα με ανάδραση

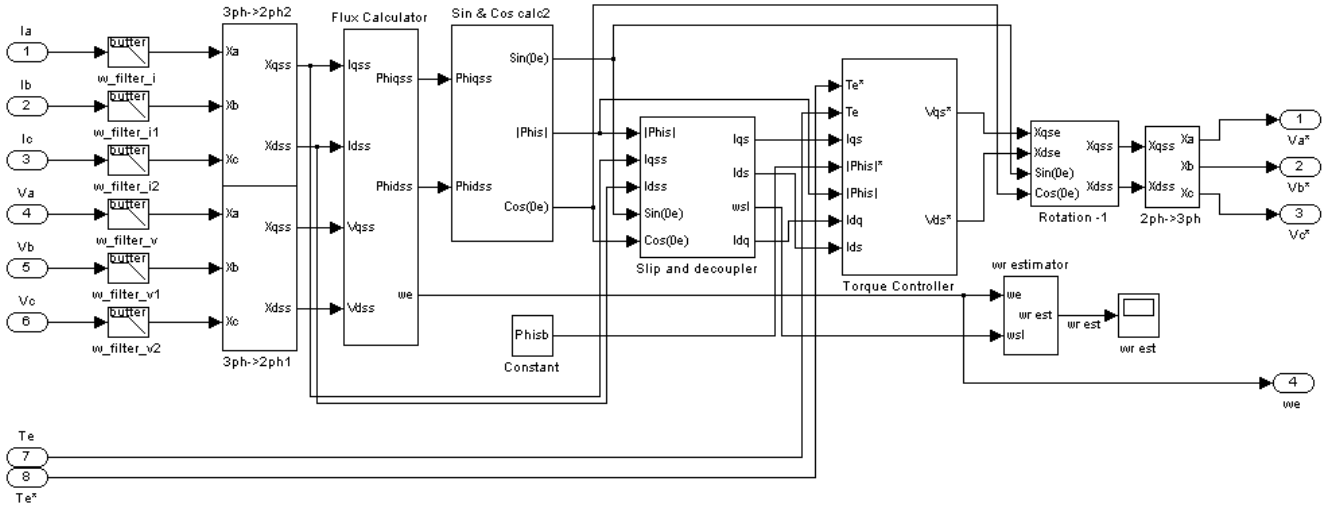
Το μοντέλο ανάδρασης θεωρεί ότι υπάρχει ένας αισθητήρας ροπής στον άξονα και συνεπώς το ρεύμα αναφοράς I_{qs} βασίζεται στη διαφορά μεταξύ της ροπής αναφοράς και της πραγματικής ροπής και είναι ελεγχόμενο από έναν PI ελεγκτή. Αυτό προσφέρει σημαντικά καλύτερη απόκριση της ροπής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.17. Πέρα από την καλύτερη απόκριση της ροπής, το σύστημα αυτό είναι πανομοιότυπο με το σύστημα χωρίς ανάδραση (Σχήμα 6.18 και 6.19).

6.3.3 Άμεσος διανυσματικός έλεγχος με μαγνητική ροή στο στάτη

Στο σύστημα άμεσου διανυσματικού ελέγχου μαγνητικής ροής του στάτη, προσομοιώνονται τα εξής δύο μοντέλα: το μοντέλο του στάτη χωρίς ανάδραση καθώς και του στάτη με ανάδραση. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του ελέγχου φαίνεται στο Σχήμα 6.20 και είναι ίδιο και για τα δύο μοντέλα.

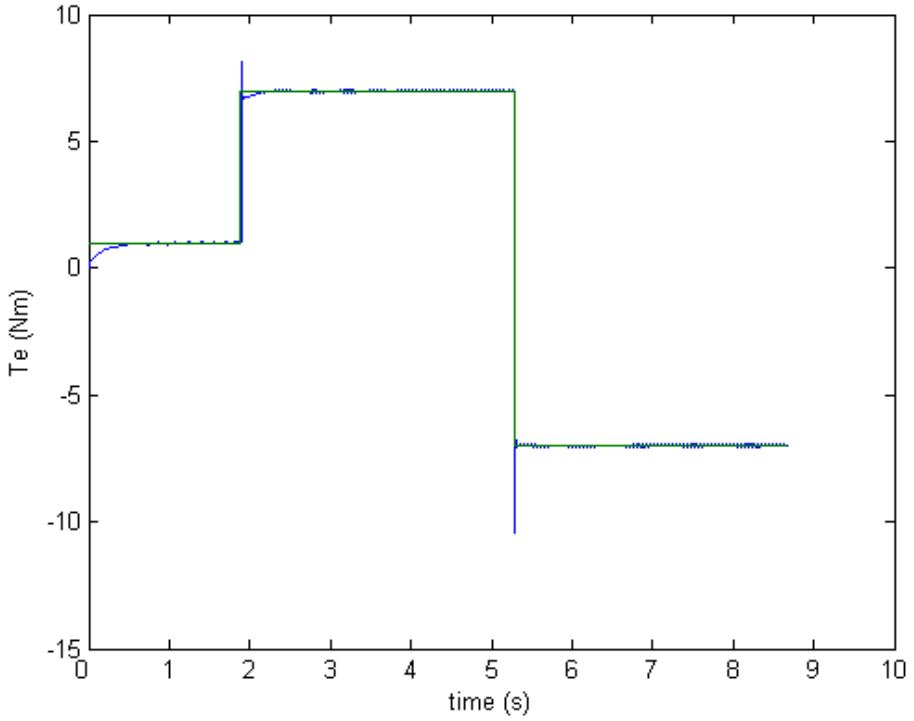


Σχήμα 6.20: Δομικό διάγραμμα άμεσου διανυσματικού ελέγχου με μαγνητική ροή στο στάτη

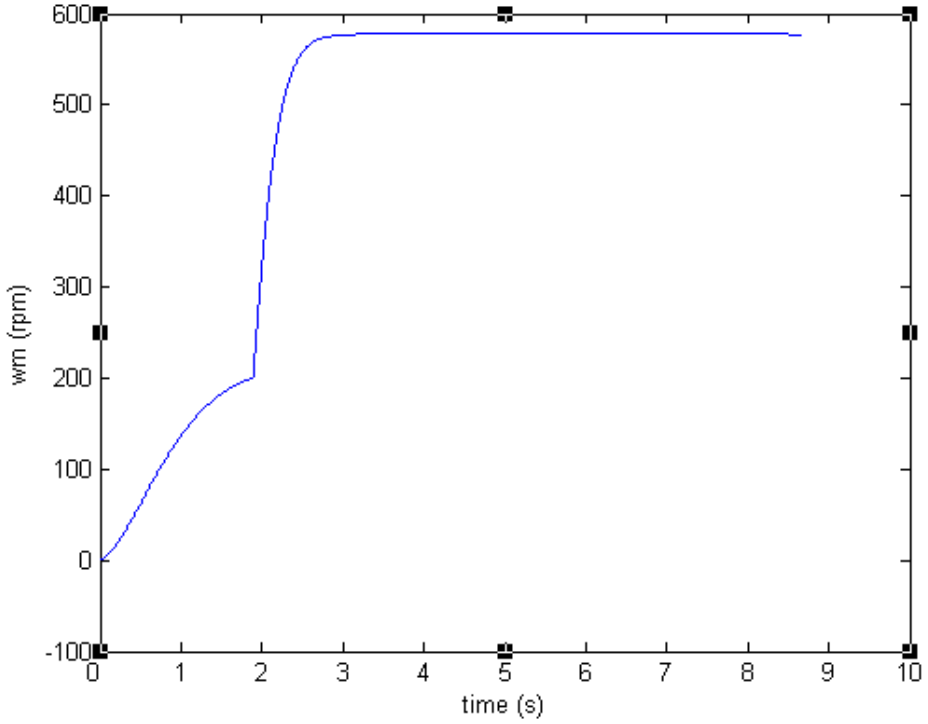


Σχήμα 6.21: Τροφοδότηση ελεγκτή άμεσου διανυσματικού ελέγχου με μαγνητική ροή στο στάτη

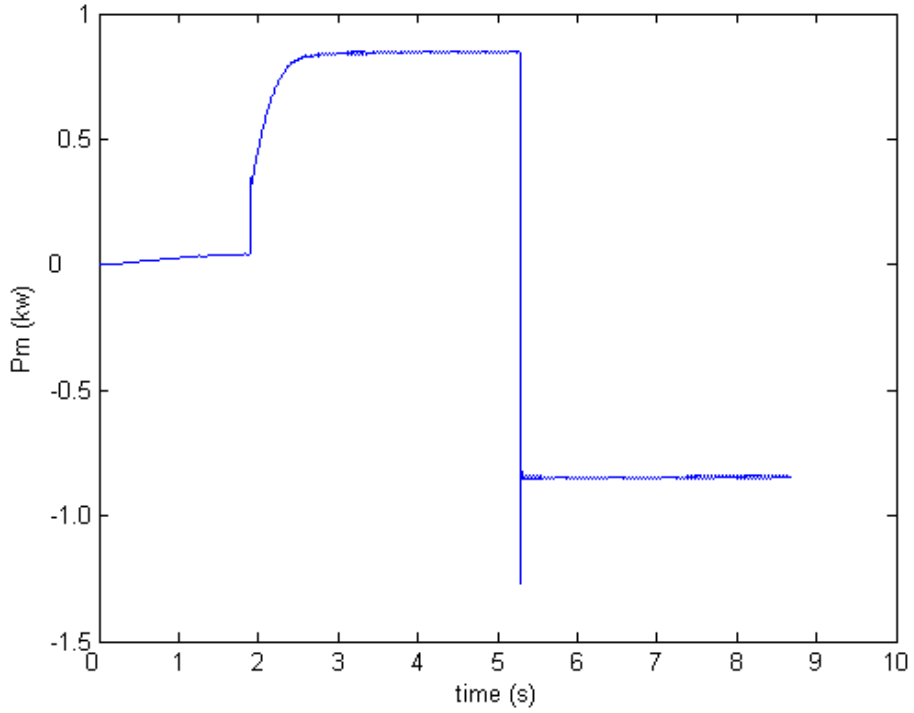
Στο σύστημα άμεσου διανυσματικού ελέγχου με **ροή στο στάτη** και τα δύο μοντέλα βρίσκουν την ηλεκτρική ταχύτητα άμεσα από τα ρεύματα και τις τάσεις της μηχανής. Ο ελεγκτής περιορίζει τη μαγνητική ροή του στάτη στη μηχανή να είναι ευθυγραμμισμένη με τον ds-άξονα. Καθώς η ροπή που παράγεται από τη μηχανή είναι ανάλογη του ρεύματος I_{qs}, αυτό το ρεύμα χρησιμοποιείται για να ελέγχει τη ροπή, που δημιουργείται από τη μηχανή.



Σχήμα 6.22 : Απόκριση ροπής για άμεσο διανυσματικό έλεγχο με μαγνητική ροή στο στάτη χωρίς ανάδραση

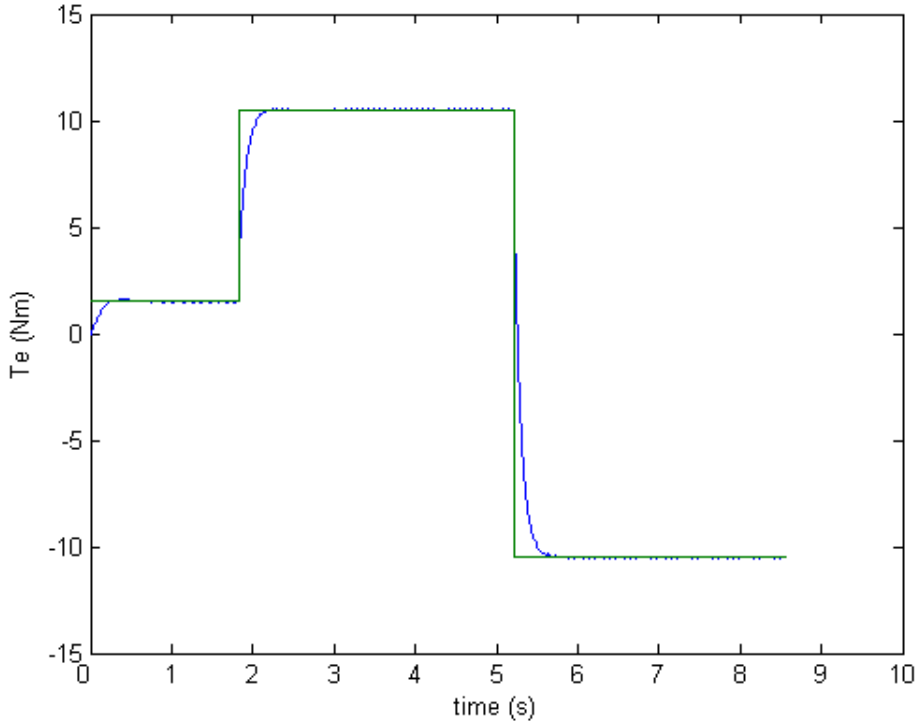


Σχήμα 6.23 : Απόκριση ταχύτητας για άμεσο διανυσματικό έλεγχο με μαγνητική ροή στο στάτη χωρίς ανάδραση

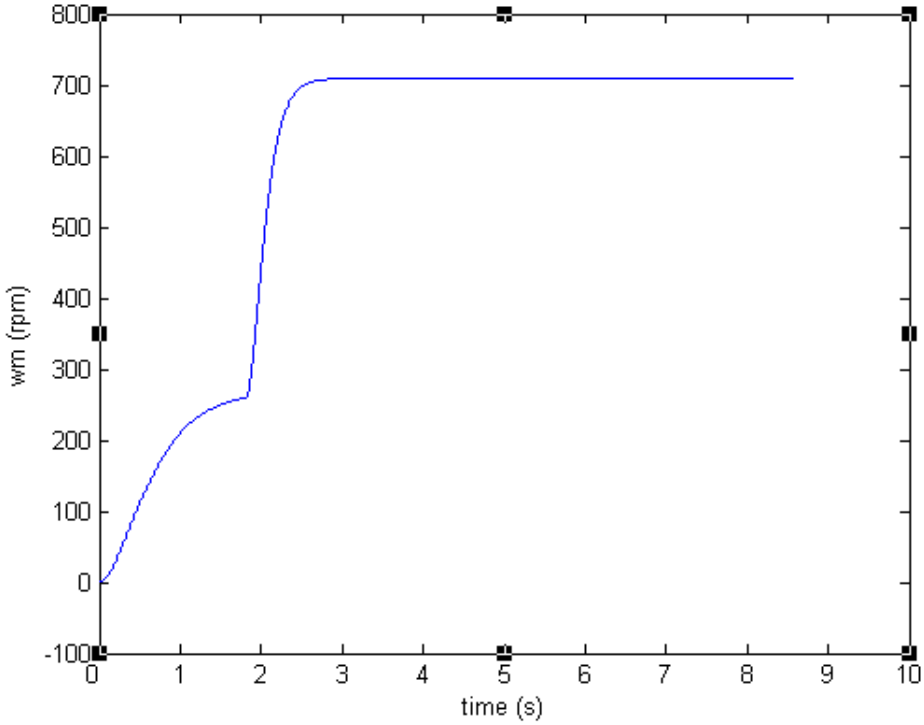


Σχήμα 6.24 : Απόκριση ισχύος για άμεσο διανυσματικό έλεγχο με μαγνητική ροή στο στάτη χωρίς ανάδραση

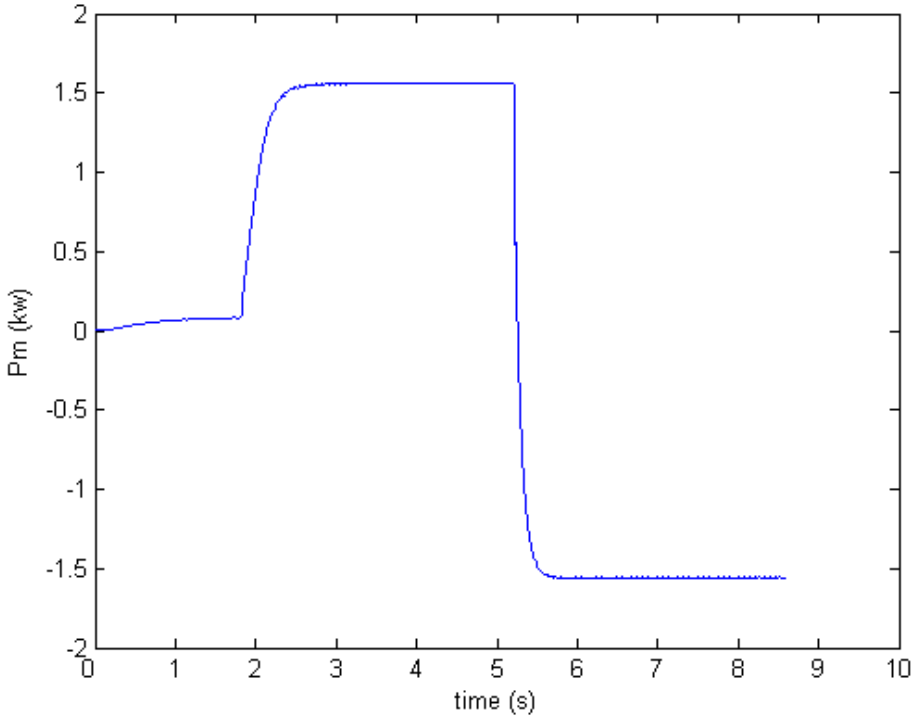
Το μοντέλο χωρίς ανάδραση δεν χρησιμοποιεί μετρήσεις από τη ροπή για να ελέγξει τη ροπή του κινητήρα, βασιζόμενη στην αναλογία του I_{qs} και της ροπής. Η απόκριση ροπής τους συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 6.22 και ακολουθεί τη ροπή αναφοράς, με μεγάλη προσέγγιση. Αυτός είναι ο καλύτερος ελεγκτής από άποψη απόκρισης, ειδικά αν θεωρήσουμε ότι δεν υπάρχει ανάδραση από τη ροπή, που δημιουργείται στη μηχανή. Στο Σχήμα 6.23 φαίνεται η απόκριση της ταχύτητας της μηχανής και στο Σχήμα 6.24 απεικονίζεται η ισχύς της μηχανής. Όπως μπορεί να δει κανείς από αυτά τα διαγράμματα, από το χρόνο 0 s μέχρι 6s περίπου, η μηχανή λειτούργει σαν κινητήρας, και από 6s έως 10s περίπου, σαν γεννήτρια παράγοντας ισχύ , εξαιτίας της θετικής ταχύτητας και της αρνητικής ροπής.



Σχήμα 6.25 : Απόκριση ροπής για άμεσο διανυσματικό έλεγχο με μαγνητική ροή στο στάτη με ανάδραση



Σχήμα 6.26 : Απόκριση ταχύτητας για άμεσο διανυσματικό έλεγχο με μαγνητική ροή στο στάτη με ανάδραση



Σχήμα 6.27 : Απόκριση ισχύος για άμεσο διανυσματικό έλεγχο με μαγνητική ροή στο στάτη με ανάδραση

Το μοντέλο ανάδρασης θεωρεί ότι υπάρχει ένας αισθητήρας ροπής στον άξονα και συνεπώς το ρεύμα αναφοράς I_{qs} βασίζεται στη διαφορά μεταξύ της ροπής αναφοράς και της πραγματικής ροπής και είναι ελεγχόμενο από έναν PI ελεγκτή. Η προσθήκη αυτής της ανάδρασης δεν κάνει τον ελεγκτή να αντιδράσει πολύ καλυτέρα, ενώ το μοντέλο χωρίς ανάδραση είναι πολύ καλό, ακολουθώντας την ροπή αναφοράς. Οι αποκρίσεις με ανάδραση φαίνονται στα Σχήματα 6.25, 6.26 και 6.27.

6.4 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο άμεσος διανυσματικός έλεγχος υπολογίζει τη γωνία που απαιτείται για το σωστό προσανατολισμό του πλαισίου αναφοράς με το πεδίο του δρομέα άμεσα, με ανατροφοδότηση της εξόδου της μηχανής. Από τη γωνία μεταξύ των δύο συνιστωσών, ευθέως και εγκάρσιου άξονα, της μαγνητικής ροής του δρομέα, προκύπτει η γωνία του προσανατολισμού.

Ο έμμεσος διανυσματικός έλεγχος υπολογίζει τη γωνία που απαιτείται για τον σωστό προσανατολισμό του πλαισίου αναφοράς με το πεδίο του δρομέα έμμεσα, με προσωτροφοδότηση (feedforward) της εισόδου. Η γωνία του προσανατολισμού προκύπτει, από ολοκλήρωση της επιθυμητής ταχύτητας, η οποία δίνεται από το άθροισμα της παρούσας κυκλικής συχνότητας περιστροφής του δρομέα με την επιθυμητή κυκλική συχνότητα ολίσθησης. Η επιθυμητή κυκλική συχνότητα ολίσθησης προκύπτει, από το σφάλμα ταχύτητας με χρήση των εξισώσεων του μοντέλου της μηχανής.

Στον έμμεσο διανυσματικό έλεγχο του δρομέα, παρατηρούμε ότι στα διαγράμματα με ανάδραση έχουμε γενικά καλύτερες αποκρίσεις, με εμφανώς καλύτερη απόκριση στο διάγραμμα ροπής.

Η μέθοδος του διανυσματικού ελέγχου παρουσιάζει πάρα πολύ μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα αλλά και μεγάλη ακρίβεια και ταχύτητα απόκρισης. Ένα σημαντικό

πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνικής είναι η δυνατότητα που παρέχει για εξοικονόμηση ενέργειας. Το όφελος από την ενέργεια αυτή είναι, ότι μειώνονται σημαντικά οι μαγνητικές απώλειες λόγω υστέρησης, με αποτέλεσμα η μηχανή να εμφανίζει μικρότερη κατανάλωση με το ίδιο μηχανικό αποτέλεσμα. Επομένως η λειτουργία της γίνεται αποδοτικότερη.

Ανάμεσα στον άμεσο και στον έμμεσο διανυσματικό έλεγχο με προσανατολισμό πεδίου, προτιμάται ο έμμεσος, καθώς βασίζεται λιγότερο στις παραμέτρους του μοντέλου της μηχανής, δίνοντας έτσι καλύτερα αποτελέσματα κατά την εφαρμογή του. Και οι δύο όμως παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία σε διακυμάνσεις της τιμής της ωμικής αντίστασης του δρομέα. Η επίδοση των δύο τεχνικών ελέγχου υψηλής ακρίβειας κρίνεται εφάμιλλη, ενώ το ποιά θα επιλεγεί σε κάθε περίπτωση καθορίζεται από το είδος της εφαρμογής.

6.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[6.1] Chee- Nun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery (using Matlab)", Prentice Hall, 1997.

[6.2] M.Godoy Simoes, Felix A. Farret, "Renewable Energy Systems, Design and Analysis", CRC Press, 2004.

[6.3] Cathey, Jimmie J, "Electric Machines: Analysis and Design Applying MATLAB", McGraw-Hill, 2000.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκαν οι τρεις βασικότερες τεχνικές ελέγχου των γεννητριών επαγωγής και στη συνέχεια προσομοιώθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab, οι τεχνικές του έμμεσου και άμεσου διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό του πεδίου.

Αναφέρθηκαν αναλυτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε τεχνικής ελέγχου ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής και παρουσιάστηκε η μεταξύ τους σύγκριση.

Για εφαρμογές χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις σε ακρίβεια και ταχύτητα απόκρισης, δεν είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί μία τεχνική ελέγχου με ιδιαίτερα καλά χαρακτηριστικά και πολύ καλή επίδοση. Για λόγους απλότητας, οικονομίας και αξιοπιστίας επιλέγεται η τεχνική του βαθμωτού ελέγχου. Δίνεται η δυνατότητα επιλογής μεταξύ του ελέγχου ταχύτητας σε ανοικτό ή σε κλειστό βρόχο, ανάλογα με το είδος της εφαρμογής. Για ένα σύστημα ηλεκτρικής κίνησης που εκτελεί σταθερά την ίδια επαναλαμβανόμενη εργασία, πάντα με το προβλεπόμενο φορτίο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι δύο τεχνικές, καθώς εμφανίζουν παρόμοια επίδοση. Για σύστημα ηλεκτρικής κίνησης, που απαιτείται να προσφέρει καλό έλεγχο ταχύτητας ακόμα και μεταβολές του φορτίου, τότε ο βαθμωτός έλεγχος ταχύτητας σε κλειστό βρόχο, με ρύθμιση της συχνότητας ολίσθησης, είναι απαραίτητος. Η δυναμική συμπεριφορά και στις δύο περιπτώσεις θα είναι αρκετά καλή και η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος ιδιαίτερα ικανοποιητική.

Στην περίπτωση κάποιου συστήματος ηλεκτρικής κίνησης που απαιτεί μεγάλης ακρίβειας και εξαιρετικής επίδοσης έλεγχο ταχύτητας, τόσο στη μεταβατική, όσο και στη μόνιμη κατάσταση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ο διανυσματικός έλεγχος με προσανατολισμό με το πεδίο του δρομέα είτε ο άμεσος έλεγχος ροπής και μαγνητικής ροής. Η εφαρμογή του άμεσου ελέγχου ροπής και ροής, κρίνεται εφάμιλλη με αυτήν του διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό με το πεδίο του δρομέα, ενώ παρουσιάζει μικρότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Ακόμα υπερέχει σε αρκετά σημεία, καθώς δεν απαιτεί τους πολύπλοκους μετασχηματισμούς μεταξύ πλαισίων, δεν απαιτεί έλεγχο ρεύματος, δε χρησιμοποιεί κάποια τεχνική PWM και εμφανίζει μεγάλη ευαισθησία ως προς την τιμή της ωμικής αντίστασης του στάτη, η οποία αφενός είναι άμεσα μετρήσιμη και αφετέρου μπορεί να μεταβληθεί με τη σύνδεση εξωτερικών αντιστάσεων. Για όλα τα παραπάνω ο άμεσος έλεγχος ροπής και ροής προτιμάται σε σχέση με τον διανυσματικό έλεγχο με προσανατολισμό με το πεδίο του δρομέα. Το μοναδικό του μειονέκτημα είναι, ότι πρόκειται για μια τεχνική εντατικού υπολογισμού, γεγονός το οποίο απαιτεί μεγάλη συχνότητα κύκλων υπολογισμού, ώστε να απαλειφθούν τα φαινόμενα που συνδέονται με τη συζευγμένη μορφή των εξισώσεων του μοντέλου.

Ως εναλλακτική λύση προβάλλει η εφαρμογή του διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό με το πεδίο του δρομέα. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει πάρα πολύ μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα αλλά και μεγάλη ακρίβεια και ταχύτητα απόκρισης. Ανάμεσα στον άμεσο και στον έμμεσο διανυσματικό έλεγχο με προσανατολισμό πεδίου, προτιμάται ο έμμεσος, καθώς βασίζεται λιγότερο στις παραμέτρους του μοντέλου της μηχανής, δίνοντας έτσι καλύτερα αποτελέσματα κατά την εφαρμογή του. Και οι δύο όμως παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία σε διακυμάνσεις της τιμής της ωμικής αντίστασης του δρομέα και συνήθως

απαιτείται ένα μοντέλο πρόβλεψης της διακύμανσης αυτής. Η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος με έλεγχο σε ζώνη υστέρησης είναι απαράδεκτα υψηλή και για το λόγο αυτό αποφεύγεται σε πρακτικές εφαρμογές, όπου συνήθως εφαρμόζεται SPWM με πρόβλεψη των επιθυμητών τάσεων. Η επίδοση των δύο τεχνικών ελέγχου υψηλής ακρίβειας κρίνεται εφάμιλλη, ενώ το ποιά θα επιλεγεί σε κάθε περίπτωση καθορίζεται από το είδος της εφαρμογής.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ MATLAB/SIMULINK

Π.1 ΓΕΝΙΚΑ

Προσομοίωση ή μοντελοποίηση είναι μια διαδικασία ανάλυσης και σύνθεσης ενός συστήματος ή μέρους αυτού, η οποία οδηγεί σε κατάλληλη μαθηματική περιγραφή, που εκφράζει τα χαρακτηριστικά του και τη δυναμική του συμπεριφορά, σε συνάρτηση με παραμέτρους που μπορούν να προσδιοριστούν στην πράξη. Γενικά και απλά ως μοντελοποίηση μπορεί να χαρακτηριστεί η διαδικασία που περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός μοντέλου που αντιπροσωπεύει μια πραγματική κατάσταση και την πειραματική εφαρμογή του.

Στη μαθηματική προσομοίωση προσπαθούμε να δημιουργούμε μια συναρτησιακή σχέση ανάμεσα σε οντότητες που αντικειμενικά χαρακτηρίζονται σημαντικές. Ένα μοντέλο υποθετικά μιμείται ή αναπαράγει ορισμένα ουσιώδη χαρακτηριστικά ή συνθήκες μιας πραγματικής κατάστασης, συνήθως σε διαφορετική κλίμακα. Το μοντέλο μπορεί κατά περίπτωση να έχει διαφορετική μορφή, όπως:

- Φυσική, όπως τα μοντέλα υπό κλίμακα και ανάλογα μηχανικών συστημάτων.
- Διανοητική, όπως στην ευριστική (heuristic) ή προαισθηματική (intuitive) γνώση και
- Συμβολική, όπως σε μαθηματικές, γλωσσολογικές, γραφικές και σχηματικές αναπαραστάσεις.

Ένα μοντέλο για να είναι χρήσιμο πρέπει να είναι ρεαλιστικό και συνάμα κατανοητό, απλό και εύκολο στην επεξεργασία. Σπανίως όμως συμβαίνει ένα μοντέλο να είναι απλό ή ένα μοντέλο απλό να είναι ρεαλιστικό. Η προσομοίωση για να είναι χρήσιμη στις επιστημονικές μελέτες συνήθως θα πρέπει να ακολουθεί τα παρακάτω στάδια.

- Παρατήρηση του φυσικού συστήματος που πρόκειται να μοντελοποιηθεί.
- Μορφοποίηση του μαθηματικού μοντέλου ούτως ώστε αυτό να περιγράφει πιστά την παρατήρηση και την πραγματικότητα.
- Πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος μέσα από ιδιότητες ή τη λύση του μαθηματικού προβλήματος.
- Αξιολόγηση και επαλήθευση με πειραματικό τρόπο της παρατήρησης ή του μαθηματικού μοντέλου.

Η έννοια του όρου μοντελοποίηση-προσομοίωση διαφέρει ανάλογα με τη φύση του πραγματικού φυσικού συστήματος και τον επιδιωκόμενο στόχο. Με την ευρεία έννοια του όρου προσομοίωση νοείται η τεχνική κατά την οποία δομείται ένα μοντέλο που αντιπροσωπεύει μια πραγματική κατάσταση και στη συνέχεια διενεργούνται σε αυτό πειραματικές εφαρμογές. Στην παρούσα εργασία με τον όρο προσομοίωση εννοούμε την ανάπτυξη πειραματικού λογικού και μαθηματικού μοντέλου και ειδικότερα τη μαθηματική αναπαράσταση δυναμικών συστημάτων που χαρακτηρίζονται από μείγμα διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων.

Τα μαθηματικά μοντέλα κατατάσσονται γενικά σε μια από τις παρακάτω κατηγορίες:

Γραμμικά ή μη γραμμικά: Γραμμικά χαρακτηρίζονται τα μοντέλα που περιγράφονται μόνο από γραμμικές μαθηματικές σχέσεις στις οποίες ισχύει η αρχή της υπέρθεσης, ενώ αντίθετα μη-γραμμικά είναι αυτά που βασίζονται σε μη γραμμικές σχέσεις.

Διακριτών ή κατανεμημένων παραμέτρων: Τα μοντέλα διακριτών παραμέτρων περιγράφονται από απλές διαφορικές εξισώσεις μιας μεταβλητής, ενώ τα μοντέλα κατανεμημένων παραμέτρων περιγράφονται από διαφορικές εξισώσεις περισσότερων της μιας μεταβλητών στις οποίες συμπεριλαμβάνεται ο χρόνος και μια ή περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές χώρου.

Στατικά ή Δυναμικά: Τα στατικά μοντέλα δε λαμβάνουν υπόψη τις χρονικές μεταβολές, ενώ αντίθετα τα δυναμικά μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τα χρονικώς μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά και τις αλληλεπιδράσεις τους.

Συνεχούς ή διακριτού χρόνου: Τα μοντέλα του συνεχούς χρόνου περιγράφονται από εξισώσεις στις οποίες οι εξαρτημένες μεταβλητές είναι συνεχείς στο χρόνο, ενώ τα μοντέλα διακριτού χρόνου περιγράφονται από εξισώσεις των οποίων οι εξαρτημένες μεταβλητές ορίζονται σε διακριτά χρονικά διαστήματα.

Προσδιοριστικά ή στοχαστικά: Ένα μοντέλο θεωρείται στοχαστικό εάν αυτό σχετίζεται με τη θεωρία των πιθανοτήτων και προσδιοριστικό εάν δεν την λαμβάνει υπόψη του.

Η διαδικασία μοντελοποίησης είναι συχνά επαναληπτική και κυκλική. Ο κύκλος αρχίζει με τον προσδιορισμό του σκοπού του μοντέλου και των περιορισμών λειτουργίας του καθώς και των υποθέσεων, απλοποιήσεων και παραδοχών που μπορούν να γίνουν. Στη συνέχεια ορίζεται ο τρόπος προσδιορισμού των παραμέτρων του μοντέλου και των υπολογιστικών μεθόδων που θα ακολουθηθούν. Είναι κατανοητό ότι απαιτείται βαθιά γνώση του αντικειμένου προκειμένου οι υποθέσεις και οι απλοποιήσεις να είναι κατάλληλες και ουσιαστικές. Η απλοποίηση είναι αυτό που χαρακτηρίζει τα περισσότερα καλά μοντέλα. Όμως η υπεραπλούστευση και οι παραλείψεις μπορεί να οδηγήσουν σε απαράδεκτη απώλεια ακρίβειας. Από την άλλη πλευρά ένα πολύ λεπτομερειακό μοντέλο συχνά γίνεται δύσχρηστο.

Κάθε μοντέλο περιλαμβάνει παραμέτρους οι οποίες πρέπει να υπολογιστούν. Το μοντέλο όμως πρέπει να είναι προσαρμοσμένο κατά τρόπο ώστε οι παράμετροι αυτοί να μπορούν να προσδιοριστούν και πειραματικά, αλλιώς θεωρείται ημιτελές. Το μοντέλο που κατασκευάστηκε πρέπει τέλος να επιβεβαιωθεί και να επικυρωθεί. Η επιβεβαίωση περιλαμβάνει έλεγχο της συνεπούς υλοποίησης των μαθηματικών σχέσεων, της διαδικασίας επίλυσης και των παραδοχών που ορίστηκαν αρχικά. Η επικύρωση περιλαμβάνει την πιστοποίηση του βαθμού καταλληλότητας του μοντέλου στο να αποδίδει τη συμπεριφορά του πραγματικού συστήματος, το οποίο αναπαριστά. Εάν οι διαφορές είναι τέτοιες που δεν μπορούν να είναι αποδεκτές, το μοντέλο πρέπει να τροποποιηθεί και ο κύκλος προσομοίωσης να επαναληφθεί. Τα αριθμητικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των παραμέτρων πρέπει να είναι διαφορετικά από αυτά που χρησιμοποιούνται για την επιβεβαίωση του μοντέλου.

Η μοντελοποίηση και η προσομοίωση έχουν μεταξύ άλλων και πολλές ειδικές εφαρμογές. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμες σε περιπτώσεις όπου το πραγματικό σύστημα δεν υπάρχει ή είναι πολύ δαπανηρό ή χρονοβόρο ή κινδυνεύει να κατασκευαστεί ή όταν ο πειραματισμός με αυτό μπορεί να προκαλέσει ανεπανόρθωτες βλάβες ή δυσλειτουργίες. Η αλλαγή των τιμών των παραμέτρων ή η εφαρμογή μιας άλλης στρατηγικής γίνεται ευκολότερα και γρηγορότερα με την προσομοίωση παρά με τη διενέργεια επαναληπτικών πειραμάτων ή μελετών στο πραγματικό σύστημα. Η προσομοίωση μπορεί επίσης να είναι και ένα πολύ χρήσιμο εκπαιδευτικό εργαλείο. Είναι μια τεχνική με την οποία οι μαθητευόμενοι μπορούν να μάθουν περισσότερα και να κατανοήσουν καλύτερα και σε βάθος το σύστημα που μελετούν.

Ένα ερώτημα που τίθεται συχνά αφορά την επιβεβαίωση του μοντέλου. Εάν δηλαδή τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αντανακλούν αυτά του πραγματικού συστήματος για τις δεδομένες συνθήκες προσομοίωσης. Ακόμη και στην περίπτωση όπου το μοντέλο επαληθεύεται υπό συγκεκριμένες συνθήκες, η χρήση του για προσομοίωση σε διαφορετικές συνθήκες πρέπει να γίνεται προσεκτικά και με συνέπεια. Διαφορετικά τα αποτελέσματα σε μια τέτοια περίπτωση μπορεί να μην έχουν καμία αξία.

Τελικά κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων δεν πρέπει να παραβλέπονται οι απλοποιήσεις και οι παραδοχές που έχουν γίνει στα πρώτα στάδια της διαδικασίας προσομοίωσης.

Π.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Τα συστήματα ισχύος και οι επιμέρους διατάξεις τους είναι κατά κανόνα από τη φύση τους μεγάλα και σύνθετα αλλά και επίσης δαπανηρά και χρονοβόρα ως προς την ανάπτυξη, την επιτήρηση και τον έλεγχο. Για τους λόγους αυτούς κυρίως η προσομοίωση και η μοντελοποίηση αποτελούν τα βασικά και σε ορισμένες περιπτώσεις ίσως τα μοναδικά εργαλεία ανάλυσης, μελέτης, έρευνας και πειραματισμού.

Οι διατάξεις ισχύος πρέπει να έχουν μελετηθεί σωστά ώστε να είναι σε θέση να αντέχουν σε αναμενόμενες καταπονήσεις που οφείλονται σε παροδικές υπερτάσεις, βραχυκυκλώματα και σφάλματα γενικότερα. Επειδή τέτοιες ακραίες καταπονήσεις συμβαίνουν συνήθως κάτω από ασταθείς μεταβατικές συνθήκες λειτουργίας, η σχεδίαση και η μελέτη των διατάξεων αυτών λαμβάνει κατά κύριο λόγο υπόψη τα μεταβατικά αυτά φαινόμενα. Μερικά από τα συνήθη περιστατικά που αντιμετωπίζονται είναι:

- Επαναλαμβανόμενες υπερτάσεις που επιδρούν σοβαρά στη σύνθεση, συνοχή και αντοχή μονώσεων.
- Δινορεύματα που προκαλούνται λόγω κεραυνών και ξαφνικών διακοπών
- Ανεπιθύμητες αλληλοεπιδράσεις όπως για παράδειγμα ο συντονισμός ανάμεσα στη μη-γραμμική αυτεπαγωγή μαγνήτισης και της χωρητικότητας του κυκλώματος κ.λ.π.

Τα συστήματα ισχύος είναι, όπως προαναφερθήκαμε, συνήθως μεγάλα και σύνθετα και αυτός είναι ένα από τους βασικούς λόγους που μοντελοποιούνται τμηματικά και μεμονωμένα. Σε πολλές περιπτώσεις κατά τη μοντελοποίηση επιδιώκεται η υποδιαστασιολόγηση και η απλούστευση σαν ένα μέσο για την ανάπτυξη απλούστερων και λειτουργικότερων μοντέλων.

Π.3 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Για τη μελέτη των συστημάτων μεγάλης κλίμακας και την αποφυγή της αφαιρετικής αντιμετώπισης του προβλήματος κατά τη διαδικασία της μοντελοποίησης χάριν της απλοποίησης και της λειτουργικότητας, απαιτούνται εργαλεία ανάλογης κλίμακας δυνατοτήτων και δυναμικότητας. Η δυναμικότητα των ψηφιακών υπολογιστών να επεξεργάζονται συστηματικά μεγάλες ποσότητες πληροφοριών συντέλεσε στην σχεδόν αποκλειστική επικράτησή τους. Σήμερα υπάρχει πληθώρα υπολογιστικών προγραμμάτων και λογισμικών πακέτων προσομοίωσης, γενικών και ειδικών εφαρμογών, στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και στα συστήματα ελέγχου ηλεκτρικής ισχύος με ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος. Ανάμεσα στα πιο γνωστά και ευρύτερα χρησιμοποιούμενα προγράμματα προσομοίωσης συγκαταλέγεται και το πακέτο MATLAB/SIMULINK.

Π.4 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΟΥ MATLAB/ SIMUKINK

Τα πακέτα προσομοίωσης διακρίνονται χονδρικά σε δύο γενικές κατηγορίες. Τα πακέτα των γενικών εφαρμογών και τα πακέτα των ειδικών εφαρμογών. Τα περισσότερα πακέτα των γενικών εφαρμογών, λειτουργούν με βάση εξισώσεις και συγκεκριμένα οι εισερχόμενες πληροφορίες πρέπει να έχουν τη μορφή διαφορικών ή και αλγεβρικών εξισώσεων. Τα πακέτα των ειδικών εφαρμογών από την άλλη πλευρά, μπορεί να προσφέρουν βολικά και έτοιμα προς χρήση μοντέλα, για τις διατάξεις που χρησιμοποιούνται συχνά σε ειδικές εφαρμογές. Ο χρήστης μπορεί επίσης να προσθέτει κατά περίπτωση τα δικά του μοντέλα σε μορφή εξισώσεων, τα οποία και ενσωματώνονται στο πακέτο.

Το πακέτο MATLAB/SIMULINK είναι ένα πανίσχυρο εργαλείο μοντελοποίησης-προσομοίωσης δυναμικών κυρίως συστημάτων και σχεδίασης συστημάτων ελέγχου.

Το πρόγραμμα MATLAB, όπως συμβαίνει και με τα περισσότερα υπολογιστικά πακέτα γενικού τύπου, είναι ένα πρόγραμμα προσανατολισμένο στην επίλυση διαφορικών ή διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων, με βασικό εργαλείο τον πίνακα (matrix). Το πρόγραμμα SIMULINK είναι μια προέκταση του MATLAB που λειτουργεί σε περιβάλλον

WINDOWS σε συνεργασία με το MATLAB και είναι πρόγραμμα προσομοίωσης με βάση το δομικό διάγραμμα (block diagram).

Τα κρίσιμα ερωτήματα που τίθενται και πρέπει να απαντηθούν προκειμένου να επιλεγεί η καταλληλότερη λύση που θα ικανοποιεί κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο τα κριτήρια επιλογής, συνοψίζονται στα εξής:

- Είναι το εργαλείο που επιλέγεται το κατάλληλο για τη συγκεκριμένη εργασία;
- Ποιες είναι οι καθοριστικές παράμετροι που εμπλέκονται;
- Πως τα αναπτυξιακά του εργαλεία επιδρούν στο συνολικό κόστος;

Τα πλεονεκτήματα του πακέτου MATLAB/SIMULINK βάσει των οποίων γίνεται ελκυστικό και επιλέξιμο, όπως θα προκύψει τόσο μέσα από την επιμέρους ανάλυση όσο και από τις εφαρμογές που θα ακολουθήσουν, συνοψίζονται επιγραμματικά στα ακόλουθα:

- Ευκολία προγραμματισμού
- Φιλικό προς το χρήστη
- Ευρύτατο πεδίο γενικών και ειδικών εφαρμογών
- Πανίσχυρο από πλευράς δυνατοτήτων
- Επεκτασιμότητα
- Συνεργασιμότητα με άλλα προγράμματα

Ειδικότερα δε σε ότι αφορά το SIMULINK πρέπει συμπληρωματικά να αναφερθεί ότι:

- Καταργεί συνολικά ή σε μεγάλο βαθμό τον παραδοσιακό προγραμματισμό
- Βελτιστοποιεί την όλη διαδικασία μοντελοποίησης και σχεδίασης συστημάτων ελέγχου, με τη δραστική μείωση του χρόνου και κατά επέκταση και του κόστους.
- Ελαχιστοποιεί τις πιθανότητες σφαλμάτων και επιταχύνει τον εντοπισμό τους όταν προκύπτουν.

Π.5 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ MATLAB

Το πρόγραμμα MATLAB αρχικά δημιουργήθηκε για να προσφέρει λογισμική υποστήριξη στην επεξεργασία και επίλυση πινάκων (**MAT**rix **LAB**oratory), αλλά σταδιακά εξελίχθηκε σε ένα τεχνικό-υπολογιστικό περιβάλλον για υψηλών επιδόσεων αριθμητικούς υπολογισμούς και απεικονίσεις. Το MATLAB παρέχει ολοκληρωμένη αριθμητική ανάλυση, υπολογισμούς πινάκων, επεξεργασία σήματος και γραφική ανάλυση σε ένα εύχρηστο περιβάλλον όπου τα προβλήματα και οι λύσεις τους εκφράζονται όπως ακριβώς περιγράφονται μαθηματικά, χωρίς να απαιτείται ο παραδοσιακός προγραμματισμός. Το MATLAB είναι ένα σύστημα αλληλεπίδρασης με βασική μονάδα πληροφορίας τον πίνακα. Αυτό επιτρέπει την επίλυση πολύπλοκων αριθμητικών προβλημάτων σε χρόνο πολύ μικρότερο από αυτόν που απαιτείται για την ανάπτυξη κατάλληλου προγράμματος σε μια από τις γνωστές γλώσσες προγραμματισμού όπως Fortran, Basic ή C.

Το MATLAB έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια με τη συνεισφορά πολλών χρηστών. Στο πανεπιστημιακό περιβάλλον έχει καταστεί το βασικό εκπαιδευτικό εργαλείο τόσο σε βασικά μαθήματα εφαρμοσμένης γραμμικής άλγεβρας, όσο και σε άλλα ανώτερα μαθήματα διαφόρων γνωστικών περιοχών. Στη βιομηχανία το MATLAB χρησιμοποιείται στην έρευνα και στην επίλυση πρακτικών προβλημάτων.

Το πρόγραμμα MATLAB περιλαμβάνει χρήσιμα εργαλεία διασύνδεσης με εξωτερικά προγράμματα και αρχεία δεδομένων καθώς και δυνατότητα εύκολης επεξεργασίας και

αποθήκευσής τους. Χαρακτηριστική είναι επίσης η ευελιξία του βασικού προγράμματος και η δυνατότητά του να συνεργάζεται με πρόσθετες εργαλειοθήκες σχεδιασμένες για ειδικές και προχωρημένες εφαρμογές.

Το πιο σπουδαίο ίσως χαρακτηριστικό του MATLAB είναι η εύκολη επεκτασιμότητά του. Αυτό επιτρέπει στον καθένα να μπορεί να συνεισφέρει στην ανάπτυξη και τη συμπλήρωση του πακέτου, δημιουργώντας και τη δική του εφαρμογή. Όλα αυτά τα χρόνια που χρησιμοποιείται το MATLAB, έχουν αναπτυχθεί πολλές ενδιαφέρουσες εφαρμογές από κάθε λογής επιστήμονες διευρύνοντας κι εμπλουτίζοντας το πρόγραμμα αλλά και την επιστημονική γνώση.

Π.5.1 Ειδικά χαρακτηριστικά του MATLAB

Το λογισμικό Matlab χρησιμοποιεί εντολές (commands), τελεστές (operators), και συναρτήσεις (functions).Οι εντολές είναι κοινότυπες με την έννοια ότι δε διαφέρουν κατά το μεγαλύτερο μέρος τους από αυτές άλλων λογισμικών και φέρουν το όνομα των αντίστοιχων Αγγλικών όρων, ακέραιων ή συντμημένων. Αναφέρονται ορισμένες χαρακτηριστικές εντολές για παράδειγμα όπως, **input, clear, delete, cd, dir, format, hold, edit, keyboard, lad, lookfor, pack, type, print, what, who**, κ.λ.π.

Στις διάφορες μαθηματικές εκφράσεις χρησιμοποιούνται σαν τελεστές τα γνωστά μαθηματικά σύμβολα ως εξής.

Αριθμητικοί τελεστές όπως,
+: πρόσθεση,
-: αφαίρεση,
***:** πολλαπλασιασμός
/: δεξιά διαίρεση
\: αριστερή διαίρεση
^: ύψωση σε δύναμη

Τελεστές σύγκρισης όπως,
<: μικρότερο από,
<=: μικρότερο ή ίσο,
>: μεγαλύτερο από,
>=: μεγαλύτερο ή ίσο,
==: ίσο,
~=: όχι ίσο κ.λ.π.

Το MATLAB αντλεί μεγάλο μέρος της δύναμής του από τον πολύ μεγάλο αριθμό συναρτήσεων που περιλαμβάνει. Μια κατηγορία συναρτήσεων είναι οι λεγόμενες εσωτερικές ή ενδοδομημένες (intrinsic) συναρτήσεις, ενώ άλλες συναρτήσεις υπάρχουν σε ξεχωριστές βιβλιοθήκες, εξωτερικά αρχεία (M-Files), που διανέμονται με το πρόγραμμα και αποτελούν τις εργαλειοθήκες (MATLAB Toolbox). Υπάρχουν όμως και συναρτήσεις που έχουν προστεθεί από επιμέρους χρήστες ή ομάδες χρηστών με τη μορφή εσωτερικών συναρτήσεων. Αυτό αποτελεί ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του MATLAB, μεγάλης επιστημονικής σημασίας, καθώς κάθε επιστήμονας μπορεί με αυτό τον τρόπο να συνεισφέρει στην εξέλιξη και την ανάπτυξη της επιστημονικής γνώσης.

Στις γενικές κατηγορίες συναρτήσεων του MATLAB ανήκουν και οι ακόλουθες:

- Στοιχειώδεις μαθηματικές συναρτήσεις
- Ειδικές συναρτήσεις
- Στοιχειώδεις πινάκες
- Ειδικοί πινάκες
- Συναρτήσεις ανάλυσης δεδομένων
- Πολυωνύμων

- Επίλυσης διαφορικών εξισώσεων
- Μη-γραμμικών εξισώσεων
- Αριθμητικής ολοκλήρωσης
- Επεξεργασίας σήματος

Παραθέτουμε ένα μικρό δείγμα από το πλήθος των συναρτήσεων που περιέχονται στο πακέτο.

[abs, axis, contour, det, diag, disp, fft, figure, finite, flag, ginput, length, image, input, max, min, mean, mesh, norm, pause, plot, poly, size, subplot, surf, zeros] κ.λ.π.

Η φιλοσοφία και η λειτουργία του MATLAB βασίζεται στον ορθογώνιο πίνακα (mxn-matrix). Ο πίνακας αποτελεί το θεμελιώδες δομικό στοιχείο. Έτσι ένας πίνακας 1x1 ορίζει μια βαθμωτή (scalar) ποσότητα, ενώ μια σειρά (row) ή μια στήλη (column) ορίζουν ένα διάνυσμα (vector).

Η εισαγωγή πινάκων μπορεί να γίνει με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

- Εισαγωγή των στοιχείων του πίνακα μεμονωμένα ένα προς ένα.
- Δημιουργία πίνακα χρησιμοποιώντας εσωτερικές συναρτήσεις.
- Δημιουργία πίνακα με μορφή αρχείου δεδομένων (M-File).
- Φόρτωση του πίνακα από εξωτερικό αρχείο δεδομένων.

Όταν ο αριθμός των στοιχείων του πίνακα που εισάγεται είναι σχετικά μικρός, συνήθως προτιμάται ο πρώτος τρόπος. Για παράδειγμα εάν θέλουμε να εισάγουμε έναν πίνακα (3x3) που περιλαμβάνει τους εννέα πρώτους αριθμούς, πληκτρολογούμε τους αριθμούς απευθείας ως εξής:

To get started, select "MATLAB Help" from the Help menu.

>> A =[1 2 3; 4 5 6; 7 8 9]

και δίδεται η απάντηση :

```
A =
        1   2   3
        4   5   6
        7   8   9
    >>
```

Σημειώνεται ότι Α είναι το όνομα με το οποίο εγγράφεται ο πίνακας στο χώρο εργασίας (workspace) για να είναι διαθέσιμος έως την ολοκλήρωση της εργασίας, τα στοιχεία σειράς διαχωρίζονται μεταξύ τους με διάστημα ή με κόμμα, οι σειρές διαχωρίζονται μεταξύ τους με ερωτηματικό (Ελληνικό) και όλα τα στοιχεία περιέχονται σε αγκύλη. Η απάντηση δίδεται πληκτρολογώντας "Enter".

Π.5.2 Καινοτομίες και βελτιώσεις του MATLAB

Οι βελτιώσεις ανάμεσα στις νεότερες εκδόσεις Matlab σε σύγκριση με τις προγενέστερες μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα:

- Βελτίωση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος ώστε να γίνεται φιλικότερο στο χρήστη.
- Διερεύνηση του πεδίου εφαρμογών με την εισαγωγή νέων εργαλειοθηκών και βελτίωση των ήδη υπαρχουσών , καθώς και βελτίωση του κώδικα δημιουργίας εργαλείων.

- Επέκταση διασυνδέσεων και επικοινωνίας με άλλα προγραμματιστικά περιβάλλοντα.

Ειδικότερα το MATLAB 7.1 παρουσιάζεται σημαντικά βελτιωμένο σε όλους γενικά τους τομείς με πιο εμφανή την αλλαγή στην επιφάνεια εργασίας, η οποία έχει νέα περισσότερο λειτουργική δομή και είναι εμπλουτισμένη με ολοκληρωμένη σειρά αναπτυξιακών εργαλείων. Οι πιο αξιόλογες προσθήκες και βελτιώσεις είναι:

- Simulink
- Real-Time Workshop (Εργαστήριο Πραγματικού Χρόνου)
- Control System Toolbox (Εργαλειοθήκη Συστημάτων Ελέγχου)
- Signal Processing Toolbox (Εργαλειοθήκη Επεξεργασίας Σημάτων)
- Filter Design Toolbox (Εργαλειοθήκη Σχεδίασης Φίλτρων)
- Neural Network Toolbox (Εργαλειοθήκη Νευρωνικών Δικτύων)
- Fixed-Point Blockset (Δομικά Στοιχεία Σταθερού Σημείου)
- Power System Blockset (Δομικά Στοιχεία Συστημάτων Ισχύος)

Τέλος πολύ σημαντική είναι και η βελτίωση του μενού της βοήθειας (on-line help), το οποίο είναι άμεσα προσβάσιμο, τόσο από την επιφάνεια εργασίας όσο και από κάθε τελεστή.

Π.5.3 Εφαρμογές

Στις τυπικές εφαρμογές του MATLAB συμπεριλαμβάνονται:

- Υπολογισμοί και επίλυση προβλημάτων με μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης γενικού τύπου.
- Επίλυση ειδικών προβλημάτων σε μορφή πινάκων σε γνωστικές περιοχές όπως τα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου, Επεξεργασία Ψηφιακών Σημάτων, Στατιστική κ.α.

Το MATLAB παρέχει και μια ειδική ομάδα εφαρμογών (επίλυση ειδικών προβλημάτων), τις αποκαλούμενες Εργαλειοθήκες (Toolboxes). Πρόκειται για ομάδες ειδικών συναρτήσεων (MATLAB-FUNCTIONS or M-files),που διευρύνουν το περιβάλλον λειτουργίας τους με σκοπό την επίλυση ειδικών κατηγοριών προβλημάτων. Μερικές από τις πιο ενδιαφέρουσες περιοχές στις οποίες έχουν αναπτυχθεί Εργαλειοθήκες (Toolboxes) είναι οι ακόλουθες:

- Επικοινωνίες (Communications)
- Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου (Automatic Control Systems)
- Σχεδίαση Σ.Α.Ε (Qualitative Feedback Theory Control Design)
- Ασαφής Λογική (Fuzzy Logic)
- Συστήματα στην περιοχή της συχνότητας (Frequency Domain Systems)
- Αρμονική Ανάλυση Υψηλής Τάξης (High Order Spectral Analysis)
- Στατιστική (Statistics)
- Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks)
- Επεξεργασία Σήματος (Signal Processing)
- Βελτιστοποίηση (Optimization)
- Εύρωστος Έλεγχος (Robust Control)
- Σχεδίαση Φίλτρων (Filter Design)
- Βάση Δεδομένων (Database)
- Απόκτηση Πληροφοριών (Data Acquisition)
- Αναγνώριση Συστήματος (System Identification)
- Επεξεργασία Εικόνας (Image Processing)

Π.6 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ SIMULINK

Το πρόγραμμα SIMULINK όπως προαναφέρθηκε, είναι μια προέκταση του MATLAB και υλοποιεί με εύκολο και πρακτικό τρόπο τη μαθηματική συνάρτηση που περιγράφει το σύστημα που πρόκειται να προσομοιωθεί, χρησιμοποιώντας κατάλληλα δομικά στοιχεία (blocks) συναρτήσεων που περιέχονται σε αντίστοιχες βιβλιοθήκες. Έτσι δίδεται η δυνατότητα στο χρήστη να δομήσει γρήγορα και με ακρίβεια ένα μαθηματικό μοντέλο που αντιπροσωπεύει ένα οποιοδήποτε σύστημα απλό ή σύνθετο, γραμμικό ή μη-γραμμικό

Ένα μοντέλο SIMULINK μπορεί να περιλαμβάνει μεταβλητές συνεχούς και διακριτού χρόνου και να παράγει γραφικές απεικονίσεις που δείχνουν την πορεία προσομοίωσης ζωντανά, βοηθώντας έτσι σημαντικά στην κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος.

Η συνηθισμένη διαδικασία μοντελοποίησης και προσομοίωσης μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή ενός δυναμικού συστήματος στο παρελθόν, ήταν η ανάπτυξη πρώτα ενός δομικού διαγράμματος και η μετάφραση του στη συνέχεια σε πρόγραμμα χρησιμοποιώντας μία από τις γλώσσες προγραμματισμού. Η μέθοδος αυτή εκτός από το ότι απαιτούσε διπλή προσπάθεια,(μία για τη σχεδίαση και την ανάπτυξη του δομικού διαγράμματος και μία για τον προγραμματισμό), αύξανε σημαντικά τις πιθανότητες λάθους και κυρίως το χρόνο εντοπισμού του. Το δυσκολότερο και το πιο χρονοβόρο πρόβλημα στη διόρθωση του λάθους σε μια τέτοια διαδικασία, είναι αναμφίβολα ο εντοπισμός του ίδιου του λάθους. Γιατί το λάθος μπορεί να είναι στη σχεδίαση, δηλαδή στο δομικό διάγραμμα, στο πρόγραμμα, ή στη μετατροπή του δομικού διαγράμματος σε πρόγραμμα. Με τη χρήση του SIMULINK αφενός αποφεύγεται διπλή προσπάθεια στην ολοκλήρωση της διαδικασίας μοντελοποίησης, άρα η μοντελοποίηση απλοποιείται στο μέγιστο δυνατό βαθμό, και αφετέρου η πιθανότητα σφάλματος πρακτικά εξαλείφεται για το λόγο ότι ουσιαστικά ο προγραμματισμός εμπεριέχεται στο δομικό διάγραμμα, άρα είναι προεπιλεγμένος και αποκλείει οποιαδήποτε πιθανότητα λάθους.

Π.6.1 ΕΙΔΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΗΚΑ ΤΟΥ SIMULINK

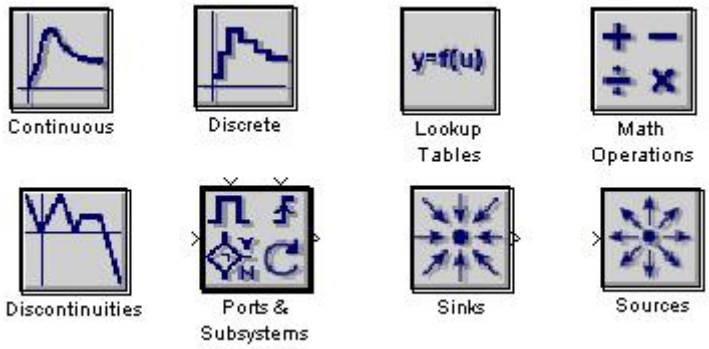
Η βελτίωση την οποία προσφέρει αλλά και υπόσχεται για το μέλλον η μέθοδος του δομικού διαγράμματος και ειδικά το SIMULINK στη μοντελοποίηση και την προσομοίωση κυρίως δυναμικών συστημάτων είναι τεράστια. Αυτό προκύπτει τόσο από τα στοιχεία που έχουν ήδη αναφερθεί, όσο και για πολλούς ακόμη λόγους που προκύπτουν από την ανάλυση του αντικειμένου και πρωτίστως από την έμπρακτη ενασχόληση και την εφαρμογή του. Ένα από τα σημεία που δεν πρέπει να παραλείψουμε να αναφέρουμε είναι η σημαντική συμβολή του SIMULINK στη βελτίωση της παραγωγικότητας της όλης μοντελοποίησης-προσομοίωσης. Από τα κρίσιμα μεγέθη που επιδρούν στην παραγωγικότητα μιας τέτοιας διαδικασίας, είναι και ο χρόνος και το κόστος, το οποίο και εξαρτάται από το χρόνο. Για αυτό το θέμα θα αναφέρουμε δύο βασικές στρατηγικές που εφαρμόζει το SIMULINK και είναι:

- Διαδικασία ταχείας ανάπτυξης πρωτοτύπου και
- Διαδικασία ταχείας ανάπτυξης της εφαρμογής.

Διαδικασία ταχείας ανάπτυξης πρωτοτύπου είναι η εφαρμογή παραγωγικών εργαλείων για την ανάπτυξη λειτουργικών πρωτοτύπων συστημάτων ελέγχου στον ελάχιστο δυνατό χρόνο. Κριτήριο βελτιστοποίησης στη διαδικασία αυτή αποτελεί η ταχύτητα ανάπτυξης της μεθόδου, παρά η ταχύτητα εκτέλεσης ή χρήσης της μνήμης. Η διαδικασία αυτή αρχίζει με την ανάπτυξη της προσομοίωσης του φυσικού συστήματος που μπορεί να ελεγχθεί, που αυτό μπορεί να είναι ένα μοντέλο του SIMULINK ή μοντέλο σε πρόγραμμα MATLAB ή σε πρόγραμμα C. Στη συνέχεια αναπτύσσεται ο ελεγκτής (controller), χρησιμοποιώντας πάλι το SIMULINK ή κάποια εργαλειοθήκη του MATLAB, όπως για παράδειγμα την Εργαλειοθήκη Βελτιστοποίησης. Κατά τη διάρκεια της όλης διαδικασίας εκτελούνται λεπτομερειακές δοκιμές για να διασφαλιστεί ότι η σχεδίαση ικανοποιεί όλες τις λειτουργικές απαιτήσεις. Αφού το μοντέλο του SIMULINK έχει ελεγχθεί διεξοδικά, προγραμματίζεται ο ελεγκτής σε γλώσσα συμβατή με τον βασικό υπολογιστή, στον οποίο και φορτώνεται το πρόγραμμα για να

ακολουθηθούν στη συνέχεια οι δοκιμές ελέγχου της καλής συνεργασίας του ελεγκτή και του μοντέλου.

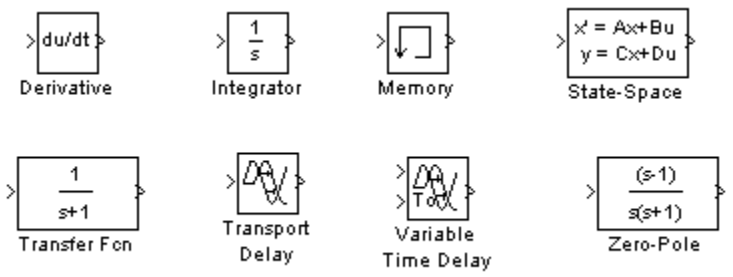
Η διαδικασία ταχείας ανάπτυξης της εφαρμογής είναι μια επέκταση της μεθοδολογίας ταχείας ανάπτυξης πρωτοτύπου, στην οποία το τελικό πρόγραμμα του υπολογιστή είναι το ίδιο το μοντέλο του SIMULINK, ή παράγεται αυτόματα από αυτό. Έτσι εξαλείφεται συνολικά η διαδικασία προγραμματισμού σε κάποια γλώσσα. Στην περίπτωση μάλιστα που ο ελεγκτής είναι υπολογιστής συμβατός με το SIMULINK, τότε αυτό αποτελεί και την τελική γλώσσα προγραμματισμού του όλου συστήματος. Συχνά, το μοντέλο SIMULINK του ελεγκτή δε συνεργάζεται ικανοποιητικά με το υπόλοιπο σύστημα, είτε γιατί δεν αποκρίνεται σχετικά γρήγορα, είτε γιατί ο ελεγκτής μπορεί να είναι κάποιος ενσωματωμένος μικροεπεξεργαστής μη συμβατός με το SIMULINK. Σε μία τέτοια περίπτωση δεν έχουμε παρά να χρησιμοποιήσουμε το Εργαστήριο Πραγματικού Χρόνου (Real Time Workshop) που περιέχεται στο πακέτο MATLAB-SIMULINK, το οποίο μετατρέπει αυτόματα το δομικό διάγραμμα του SIMULINK σε επιμέρους προγράμματα C τα οποία μπορούν να μεταγλωττιστούν ανάλογα και να φορτωθούν στο βασικό υπολογιστή. Στη συνέχεια παραθέτουμε επιλεκτικά τις πιο εύχρηστες κατηγορίες δομικών στοιχείων συναρτήσεων, τα οποία στην πλειοψηφία τους θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για της διαφορές εφαρμογές που θα ακολουθήσουν. Για λόγους οικονομίας επιλέξαμε να μην παραθέσουμε λεπτομερείς περιγραφές των παραμέτρων και του τρόπου λειτουργίας του κάθε δομικού στοιχείου. Άλλωστε για τα περισσότερα η ονοματολογία από μόνη της είναι αποκαλυπτική της λειτουργίας του. Εκτός αυτού όμως, όπως έχει ήδη αναφερθεί και στα προηγούμενα, ο χρήστης μπορεί να επωφεληθεί από τη δυνατότητα άμεσης βοήθειας (on-line help) που προσφέρει το πρόγραμμα για να πάρει πληροφορίες και καθοδήγηση για οτιδήποτε τον ενδιαφέρει. Επελέγησαν και παραθέτονται μόνο δομικά στοιχεία της κατηγορίας Γενικών Εφαρμογών του SIMULINK και της κατηγορίας των Συστημάτων Ισχύος (Power Systems Blockset), που είναι απαραίτητα για τη μοντελοποίηση των διατάξεων της δικής μας επιστημονικής περιοχής, στα Σχ.(1) εως (15) που ακολουθουν.



Σχήμα Π.1: Δομικά Στοιχεία Γενικών Εφαρμογών SIMULINK

Στα δομικά Στοιχεία Εφαρμογών συμπεριλαμβάνονται και τα στοιχειά:

- Συναρτήσεων Συνεχούς Χρόνου (Continuous)
- Συναρτήσεων Διακριτού Χρόνου (Discrete)
- Συναρτήσεων και Πινάκων (Functions & Tables)
- Μαθηματικών Συναρτήσεων (Math)
- Μη-γραμμικων Συναρτήσεων (Nonlinear)
- Συναρτήσεων Σημάτων και Συστημάτων (Signals & Systems)
- Τερματικών Συναρτήσεων (Sinks)
- Συναρτήσεων Πηγών (Sources)

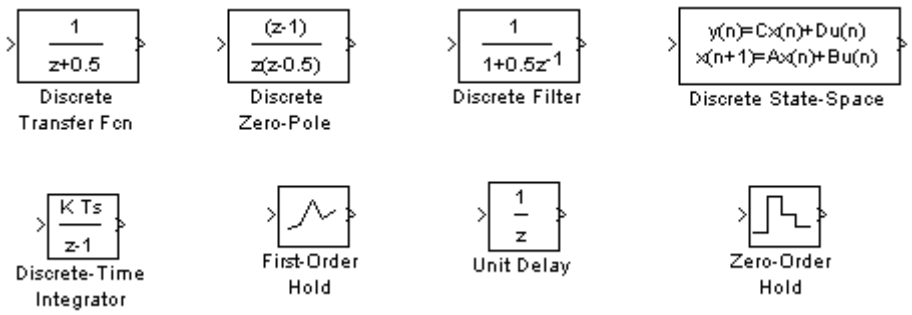


Simulink/Continuous Bolcks

Σχήμα Π.2: Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Συνεχούς Χρόνου

Στα Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Συνεχούς Χρόνου συμπεριλαμβάνονται και τα στοιχεία:

- Συναρτήσεων Διαφορικών Εξισώσεων (Derivative)
- Συναρτήσεων Ολοκλήρωσης (Integrator)
- Συναρτήσεων Μνήμης (Memory)
- Συναρτήσεων Κατάστασης Χώρου (State-Space)
- Συναρτήσεων Μεταφοράς (Transfer Function)
- Συναρτήσεων Καθυστέρησης Μεταφοράς (Transport Delay)
- Συναρτήσεων Μεταβλητής Καθυστέρησης Μεταφοράς (Variable Transport Delay)
- Συναρτήσεων Μηδενικών Πόλων (Zero-Pole)



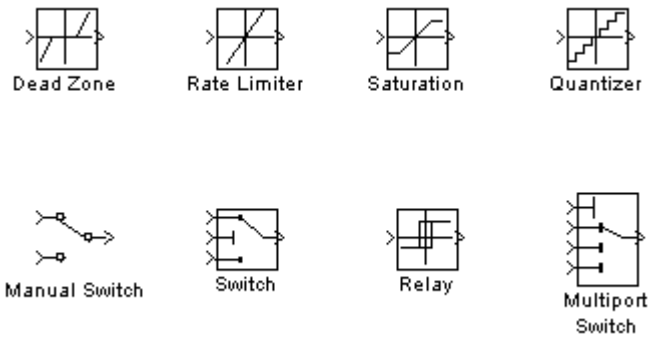
Simulink/Discrete Blocks

Σχήμα Π.3: Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Διακριτού Χρόνου

Στα δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Διακριτού Χρόνου συμπεριλαμβάνονται και τα στοιχεία:

- Συναρτήσεων Μεταφοράς Διακριτού Χρόνου (Discrete Transfer Function)
- Συναρτήσεων Μηδενικών-Πόλων Διακριτού Χρόνου (Discrete Zero-Pole)
- Συναρτήσεων Φίλτρου Διακριτού Χρόνου (Discrete Filter)
- Συναρτήσεων Κατάστασης Χώρου Διακριτού Χρόνου (Discrete State-Space)
- Συναρτήσεων Ολοκλήρωσης Διακριτού Χρόνου (Discrete Integrator)
- Συναρτήσεων Διαφορικών Εξισώσεων Πρώτου Βαθμού Διακριτού Χρόνου (First Order Hold)
- Συνάρτησης Μοναδιαίας Καθυστέρησης (Unit Delay)

- Συναρτήσεων Διαφορικών Εξισώσεων Μηδενικού Βαθμού Διακριτού Χρόνου (Zero Order Hold)

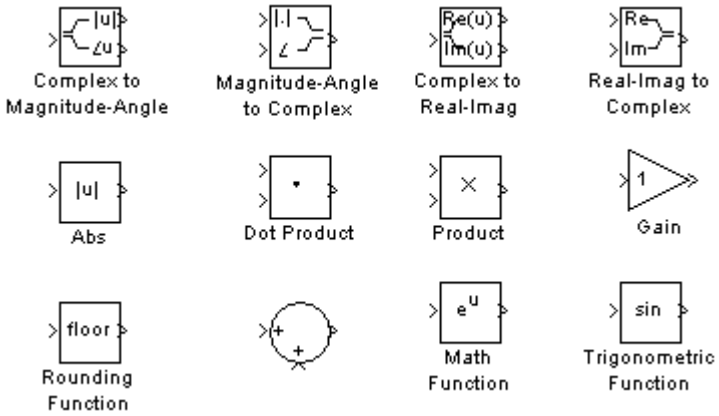


Simulink/Non-Linear Bolcks

Σχήμα Π.4: Δομικα Στοιχεια Μη-Γραμμικων Εξισωσεων

Στα δομικά Στοιχεία Μη-Γραμμικών Συναρτήσεων συμπεριλαμβάνονται και τα στοιχεία:

- Συνάρτησης Νεκράς Ζώνης (Dead Zone)
- Συνάρτησης Περιορισμού Ρυθμού Μεταβολής (Rate Limiter)
- Συνάρτησης Κορεσμού (Saturation)
- Συνάρτησης Κβαντοποίησης (Quantizer)
- Συνάρτησης Κοινού Διακόπτη (Manual Switch)
- Συνάρτησης Διαφορικού Διακόπτη (Switch)
- Συναρτήσεων Ηλεκτρονόμου (Relay)
- Συναρτήσεων Πολλαπλού Διακόπτη (Multiport Switch)



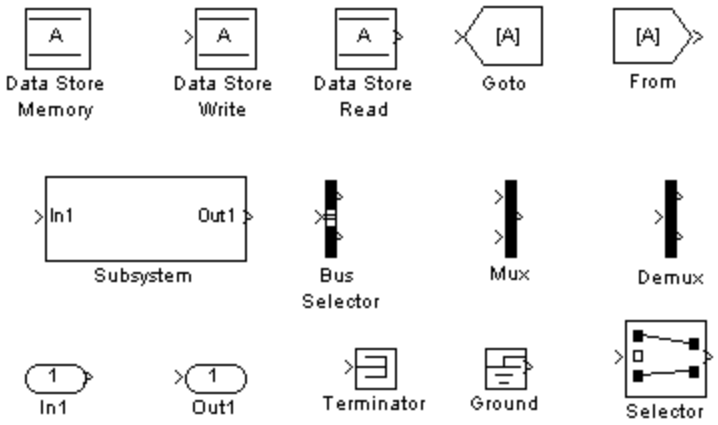
Simulink/Math Blocks

Σχήμα Π.5: Δομικά Στοιχεία Μαθηματικών Συναρτήσεων

Στα δομικά Στοιχεία Μαθηματικών Συναρτήσεων συμπεριλαμβάνονται και τα στοιχεία:

- Συνάρτησης Απόλυτης Τιμής (Abs)
- Συνάρτησης Μετατροπής Μιγαδικού σε Πολική Μορφή (Complex to Magnitude-Angle)
- Συνάρτησης Μετατροπής Πολικής σε Μιγαδική Μορφή (Magnitude-Angle to Complex)
- Συνάρτησης Μετατροπής Μιγαδικού σε Καρτεσιανή Μορφή (Complex to Real-Imaginary)

- Συνάρτησης Μετατροπής Καρτεσιανής Μορφής σε Μιγαδικό (Real-Imaginary to Complex)
- Συνάρτησης Εσωτερικού Γινομένου (Dot Product)
- Γενικής Συνάρτησης Γινομένου (Product)
- Συνάρτησης Αθροίσματος-Διαφοράς (Sum)
- Συνάρτησης Κέρδους (Gain)
- Συνάρτησης Στρογγυλοποίησης(Rounding Function)
- Γενικής Μαθηματικής Συνάρτησης (Math Function)
- Τριγωνομετρικής Συνάρτησης (Trigonometric Function)

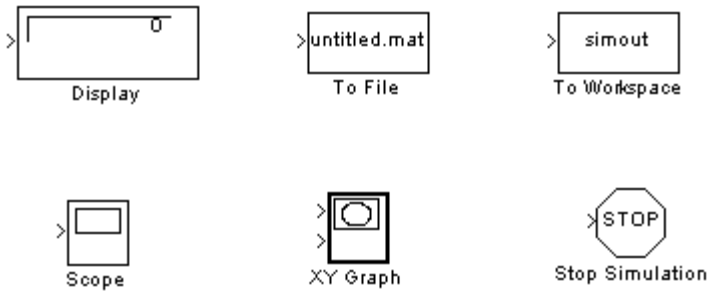


Simulink/Signals and Sytems Blocks

Σχήμα Π.6: Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Σημάτων και Συστημάτων

Στα Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Σημάτων και Συστημάτων συμπεριλαμβάνονται και τα στοιχεία:

- Συνάρτησης Μνημόνευσης Δεδομένων (Data Store Memory)
- Συνάρτησης Εγγραφής Δεδομένων (Data Store Write)
- Συνάρτησης Ανάγνωσης Δεδομένων (Data Store Read)
- Συνάρτησης Μεταφοράς Δεδομένων «προς» (Goto)
- Συνάρτησης Μεταφοράς Δεδομένων «από» (From)
- Συνάρτησης Δημιουργίας Υποσυστήματος (Subsystem)
- Συνάρτησης Ζυγού Συγκέντρωσης (Bus Selector)
- Συνάρτησης Σύμπλεξης (Mux)
- Συνάρτησης Απόπλεξης (Demux)
- Συνάρτησης Ελεγχόμενου Σήματος (In)
- Συνάρτησης Εξερχόμενου Σήματος (Out)
- Συνάρτησης Τερματισμού (Terminator)
- Συνάρτησης Γειώσεως (Ground)
- Συνάρτησης Επιλογής Σήματος (Selector)

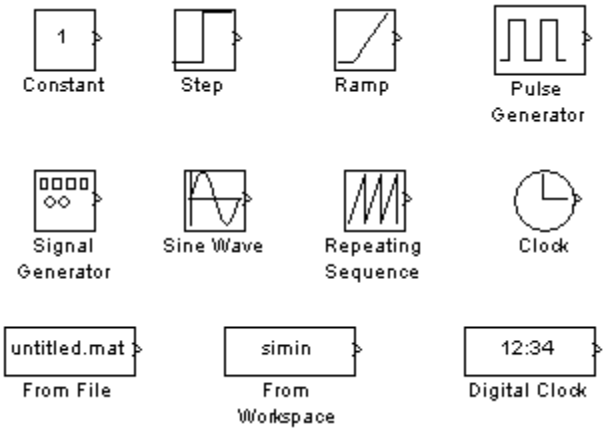


Simulink/Sink Blocks

Σχήμα Π.7: Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Υποδοχέων Σήματος

Στα Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Υποδοχέων Σήματος συμπεριλαμβάνονται και τα στοιχεία:

- Μεταφοράς Δεδομένων σε Ψηφιακή Οθόνη (Display)
- Μεταφοράς Δεδομένων σε Αναλογική Οθόνη (Scope)
- Μεταφοράς Δεδομένων σε Απεικονιστή XY (XY Graph)
- Συνάρτηση Διακοπής Προσομοίωσης (Stop Simulation)
- Μεταφοράς Δεδομένων σε Αρχείο MATLAB (To File)
- Μεταφοράς Δεδομένων στο Χώρο Εργασίας (To Workspace)



Simulink/Sources Blocks

Σχήμα Π.8: Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Πηγών

Στα Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Υποδοχέων Πηγών συμπεριλαμβάνονται και τα στοιχεία:

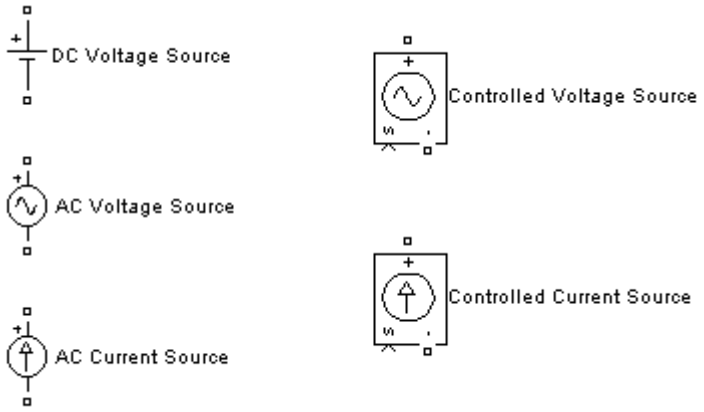
- Συνάρτησης Σταθερής Πηγής (Constant)
- Πηγής Βηματικής Συνάρτησης (Step)
- Πηγής Συνάρτησης Σταθερής Κλίσης (Ramp)
- Συνάρτησης Γεννήτριας Παλμών (Pulse Generator)
- Συνάρτησης Γεννήτριας Σημάτων (Signal Generator)
- Συνάρτησης Γεννήτριας Ημιτονοειδούς Κύματος (Sine Wave)
- Συνάρτησης Γεννήτριας Σήματος Επαναλαμβανόμενης Ακολουθίας (Repeating Sequence)
- Συνάρτησης Μεταφοράς Δεδομένων από Αρχείο (From File)
- Συνάρτησης Μεταφοράς Δεδομένων από το Χώρο Εργασίας (From Workspace)
- Συνάρτησης Ψηφιακού Χρονομέτρου (Digital Clock)
- Συνάρτησης Αναλογικού Χρονομέτρου (Clock)

Power System Blockset

Σχήμα Π.9: Σετ Δομικών Στοιχείων Συστήματος Ισχύος

Στο Σετ Δομικών Στοιχείων Συστήματος Ισχύος συμπεριλαμβάνονται και τα στοιχεία:

- Συναρτήσεων (Function)
- Ηλεκτρικών Πηγών (Electrical Sources)
- Συστημάτων Στοιχείων (Elements)
- Συστημάτων Ηλεκτρονικών Ισχύος (Power Electronics)
- Ηλεκτρικών Μηχανών (Machines)
- Ηλεκτρικών Μετρήσεων (Measurements)

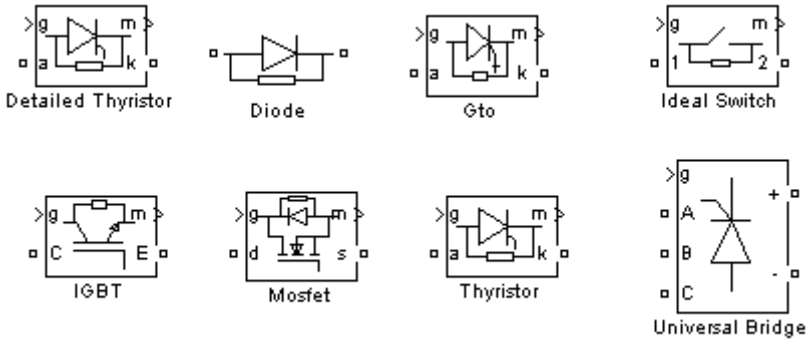


Electrical Resources

Σχήμα Π.10: Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Ηλεκτρικών Πηγών

Στα Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Ηλεκτρικών Πηγών συμπεριλαμβάνονται και τα στοιχεία:

- Πηγής Συνεχούς Τάσης(DC Voltage Source)
- Ελεγχόμενης Πηγής Τάσης (Controlled Voltage Source)
- Πηγής Εναλλασσόμενης Τάσης (AC Voltage Source)
- Πηγής Εναλλασσόμενου Ρεύματος (AC Current Source)
- Ελεγχόμενης Πηγής Ρεύματος (Controlled Current Source)



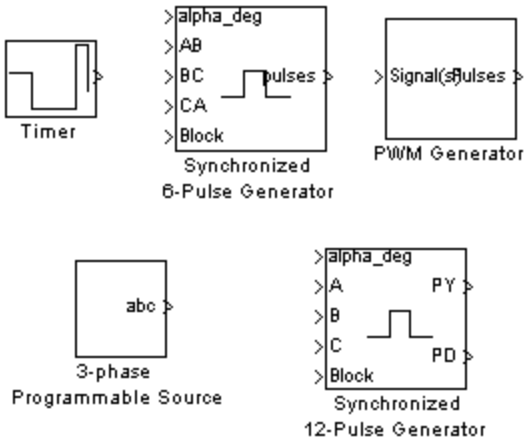
Power Electronics

Σχήμα Π.11: Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Ηλεκτρικών Ισχύος

Στα Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Ηλεκτρονικών Ισχύος συμπεριλαμβάνονται και τα στοιχεία:

- Λεπτομερειακού Θυρίστορ (Detailed Thyristor)
- Διόδου (Diode)
- GTO
- Ιδανικού Διακόπτη (Ideal Switch)
- IGBT
- MOSFET
- Θυρίστορ (Thyristor)

- Γενικής Γεφύρας (Universal Bridge)

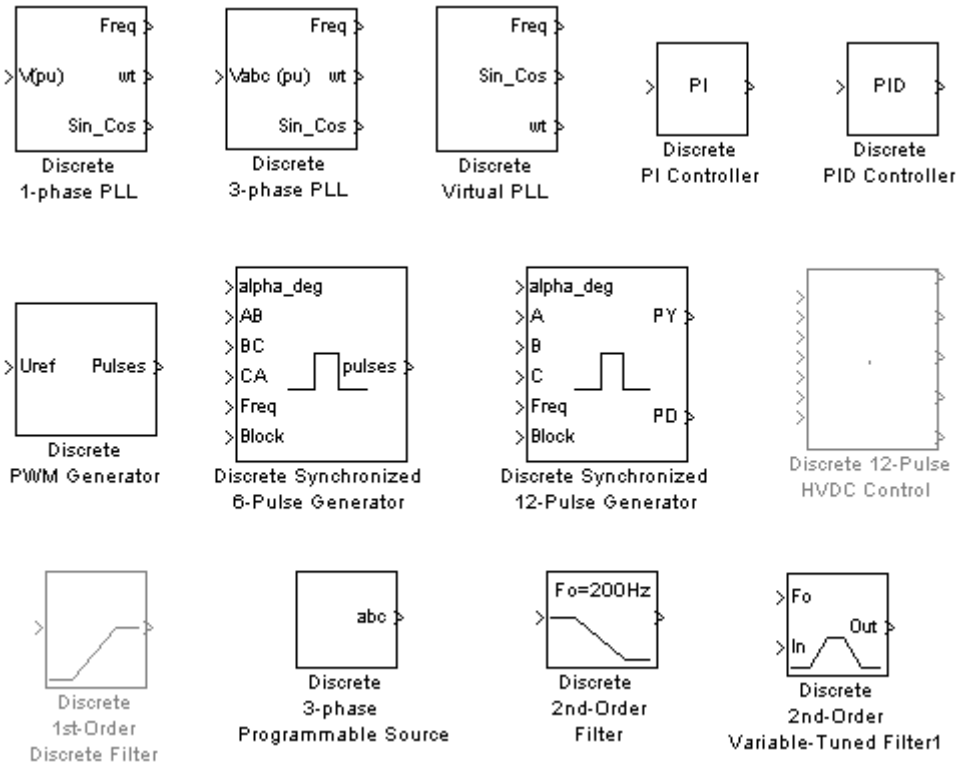


Control Blocks

Σχήμα Π.12: Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Διατάξεων Ελέγχου

Στα Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Διατάξεων Ελέγχου συμπεριλαμβάνονται και τα στοιχεία:

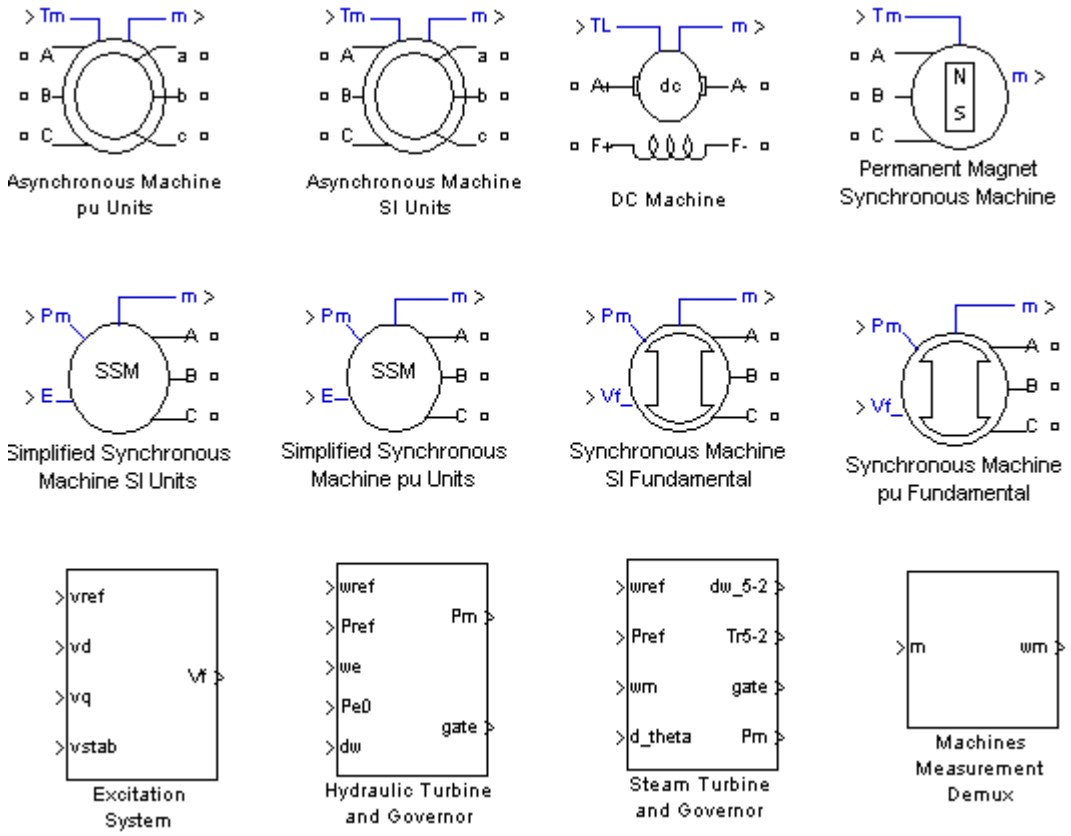
- Χρονοδιακόπτης (Timer)
- Συγχρονισμένης Γεννήτριας 6-Παλμών (Synchronized 6-Pulse Generator)
- Γεννήτριας Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (PWM Generator)
- Προγραμματιζόμενης Τριφασικής Πηγής (3-Phase Programmable Source)
- Συγχρονισμένης Γεννήτριας 12-Παλμων (Synchronized 12-Pulse Generator)



Σχήμα Π.13: Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Διακριτών Διατάξεων Ελέγχου

Στα Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Διακριτών Διατάξεων Ελέγχου συμπεριλαμβάνονται και τα στοιχεία:

- Διακριτής Μονοφασικής Διάταξης Κλειδώματος Φάσης (Discrete 1-phase PLL)
- Διακριτής Τριφασικής Διάταξης Κλειδώματος Φάσης (Discrete 3-phase PLL)
- Διακριτής Εικονικής Διάταξης Κλειδώματος Φάσης (Discrete Virtual PLL)
- Διακριτού Αναλογικού-Ολοκληρωτικού Ελεγκτή (Discrete PI Controller)
- Διακριτού Αναλογικού-Ολοκληρωτικού-Διαφορικού Ελεγκτή (Discrete PID Controller)
- Διακριτής Γεννήτριας Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (Discrete PWM Generator)
- Διακριτής Συγχρονισμένης Γεννήτριας 6-Παλμων (Discrete Synchronized 6-Pulse Generator)
- Διακριτής Συγχρονισμένης Γεννήτριας 12-Παλμων (Discrete Synchronized 12-Pulse Generator)
- Διακριτής Διάταξης Ελέγχου Υψηλής Συνεχούς Τάσης 12-Παλμων (Discrete 12-Pulse HVDC Control)
- Διακριτού Φίλτρου 1ου Βαθμού (Discrete 1st order Filter)
- Διακριτής Προγραμματιζόμενης Τριφασικής Πηγής (Discrete 3-Phase Programmable Source)
- Διακριτού Φίλτρου 2ου Βαθμού (Discrete 2nd order Filter)
- Διακριτού Ρυθμιζόμενου Φίλτρου 2ου Βαθμού (Discrete 2nd order Variable-tuned Filter)

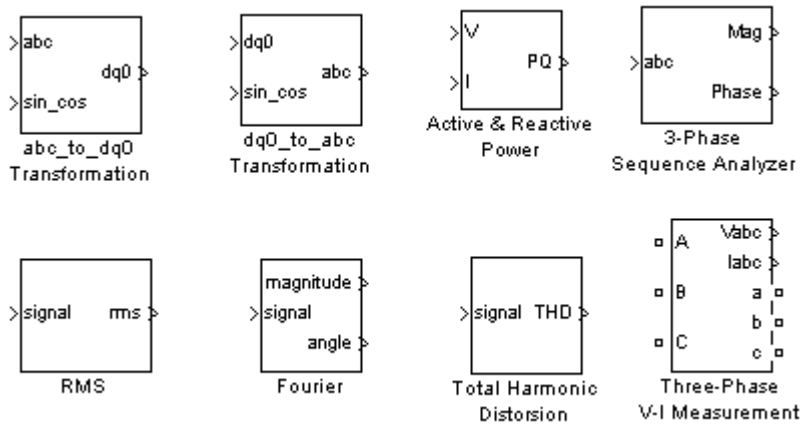


Electric Machines-Prime Movers-Regulators

Σχήμα Π.14: Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Ηλεκτρικών Μηχανών-Κινητήριων Συστημάτων-Ρυθμιστών

Στα Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Ηλεκτρικών Μηχανών-Κινητήρων Συστημάτων-Ρυθμιστών συμπεριλαμβάνονται και τα στοιχεία:

- Ασύγχρονων Μηχανών (ποσότητες α.μ.) (Asynhchronous Machine pu Units)
- Ασύγχρονων Μηχανών (ποσότητες S.I.) (Asynhchronous Machine SI Units)
- Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος (DC Machine)
- Σύγχρονων Μηχανών Μόνιμων Μαγνητών (Permanent Magnet Synhchronous Machine)
- Απλοποιημένων Σύγχρονων Μηχανών (ποσότητες S.I.) (Simplified Synhchronous Machine SI Units)
- Απλοποιημένων Σύγχρονων Μηχανών (ποσότητες α.μ.) (Simplified Synhchronous Machine pu Units)
- Στοιχειωδών Σύγχρονων Μηχανών (ποσότητες S.I.) (Synhchronous Machine SI Fundamental)
- Στοιχειωδών Σύγχρονων Μηχανών (ποσότητες α.μ.) (Synhchronous Machine puI Fundamental)
- Συστήματος Διέγερσης (Excitation System)
- Υδροηλεκτρικού Συστήματος (Hydrolic Turbine Governor)
- Ατμοηλεκτρικού Συστήματος (Steam Turbine Generator)
- Αποπλέκτη Μετρήσεων Μηχανών (Machine Measurement Demux)



Measurements

Σχήμα Π.15: Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Ηλεκτρικών Μετρήσεων

Στα Δομικά Στοιχεία Συναρτήσεων Ηλεκτρικών Μετρήσεων συμπεριλαμβάνονται και τα στοιχεία:

- Μετασχηματισμού abc σε dq0 (abc to dq0 Transformation)
- Μετασχηματισμού dq0 σε abc (dq0 to abc Transformation)
- Ενεργού και Άεργου Ισχύος (Active and Reactive Power)
- Τριφασικού Αναλυτή Ακολουθίας (3-Phase Sequence Analyzer)
- Ενεργού Τιμής (RMS)
- Ανάλυση κατά Fourier (Fourier)
- Συνολικής Αρμονικής Παραμόρφωσης (Total Harmonic Distortion)
- Τριφασικών Μετρήσεων Τάσης-Ρεύματος (Three-phase V-I Measurements)

Η Εφαρμογή που ακολουθεί είναι ένα ολοκληρωμένο και αντιπροσωπευτικό παράδειγμα εφαρμογής του SIMULINK. Το δομικό διάγραμμα του Σχήματος…αντιπροσωπεύει το μοντέλο ενός συστήματος ελέγχου της ταχύτητας ενός

ασύγχρονου κινητήρα ανοιχτού βρόχου με τη μέθοδο ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών (SPWM). Το παράδειγμα αυτό επιλέχθηκε ως αντιπροσωπευτικό διότι πράγματι χρησιμοποιεί δομικά στοιχεία (block) από όλες σχεδόν τις κατηγορίες που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα. Επίσης χαρακτηρίζεται και ως ολοκληρωμένο διότι αφορά μια άρτια βιομηχανικού τύπου υλοποιημένη εφαρμογή.

Αφού δομηθεί το μοντέλο, γίνεται προσδιορισμός των παραμέτρων και των αρχικών συνθηκών των μεταβλητών του συστήματος, είτε με την ανάπτυξη ενός προγράμματος αρχικοποίησης, είτε με την άμεση ενσωμάτωση τους στο αντίστοιχο δομικό στοιχείο, όπως συμβαίνει στην προκείμενη περίπτωση. Στη συνέχεια ορίζονται με την επιλογή "SIMULATION'' από την επιφάνεια εργασίας οι παράμετροι προσομοίωσης, όπως κατάλληλη μέθοδος ολοκλήρωσης, ο επιθυμητός χρόνος προσομοίωσης κ.λ.π. και τέλος με την εντολή ''RUN'' τρέχει και ολοκληρώνεται το πρόγραμμα.

Στα Σχήματα της εφαρμογής για λόγους εποπτικούς αποτυπώνονται αυτούσιες οι απεικονίσεις των αντίστοιχων δομικών στοιχείων απεικόνισης SIMULINK, του μοντέλου.

Π.6.2 ΕΠΙΛΥΤΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ SIMULINK

Μετά την ολοκλήρωση του μοντέλου και πριν αρχίσει η προσομοίωση πρέπει να προσδιοριστεί η μέθοδος ολοκλήρωσης που θα χρησιμοποιηθεί, καθώς και οι παράμετροι ολοκλήρωσης, όπως το μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμητικό σφάλμα (error tolerance) και το ελάχιστο και το μέγιστο αρχικό βήμα (minimum step size, maximum step size). Οι επιλογές αυτές γίνονται από την επιφάνεια εργασίας του SIMULINK και του μενού simulation/parameters. Υπάρχουν οι εξής επιλυτές συνηθισμένων διαφορικών εξισώσεων (ODE solvers) στο SIMULINK.

- **ode45.** Η μέθοδος αυτή είναι βασισμένη στην ρουτίνα Dormand-Prince (4,5), απλού βήματος Runge-Kutta και συνίσταται σα μέθοδος πρώτης επιλογής.
- **ode23.** Η μέθοδος βασίζεται στη ρουτίνα Bogacki-Shampine (2,3) και είναι περισσότερο αποτελεσματική από την ode45 για μεγαλύτερες τιμές ανοχής σφάλματος.
- **ode113.** Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη ρουτίνα πολλαπλού βήματος μεταβλητής τάξης Adams-Bashforth-Moulton. Συνιστάται όταν ο υπολογισμός της συνάρτησης είναι χρονοβόρος και ανοχή σφάλματος μικρή.
- **ode23t.** Παραλλαγή της ode23 βασισμένη στην τραπεζοειδή μέθοδο ολοκλήρωσης.
- **ode15s.** Πρόκειται για επιλύτη επίσης πολλαπλού βήματος μεταβλητής τάξης που βασίζεται στη μέθοδο της ανάδρομης διαφόρισης.
- **ode23s.** Επιλύτης απλού βήματος βασισμένος στη μέθοδο Rosenbrock δεύτερης τάξης.
- **ode23st.** Συνδυασμός της ode23s και ode23t.

Σημειώνεται ότι οι τρεις τελευταίοι επιλύτες συνιστώνται για την επίλυση των λεγόμενων ''άκαμπτων'' προβλημάτων (ο δείκτης **s** προέρχεται από το stiff), δηλαδή συναρτήσεις με οξείες μεταβολές, σε αντίθεση με όλους τους προηγούμενους, που αναφέρονται σε φυσιολογικές περιπτώσεις.

Η παράμετρος ανοχής σφάλματος (error tolerance) εισάγεται για να ελέγχει το σχετικό σφάλμα σε κάθε βήμα ολοκλήρωσης. Μικρότερες τιμές σημαίνουν καλύτερη ακρίβεια αποτελέσματος αλλά και μεγαλύτερο χρόνο προσομοίωσης. Για την κατηγορία των προβλημάτων που επιλύουμε, οι τιμές συνιστάται να κυμαίνονται από 1e-3 έως 1e-6.

Η παράμετρος του ελάχιστου βήματος ολοκλήρωσης αφορά το βήμα εκκίνησης ή επανεκκίνησης και στις μεθόδους μεταβλητού βήματος που χρησιμοποιούμε συνήθως δεν

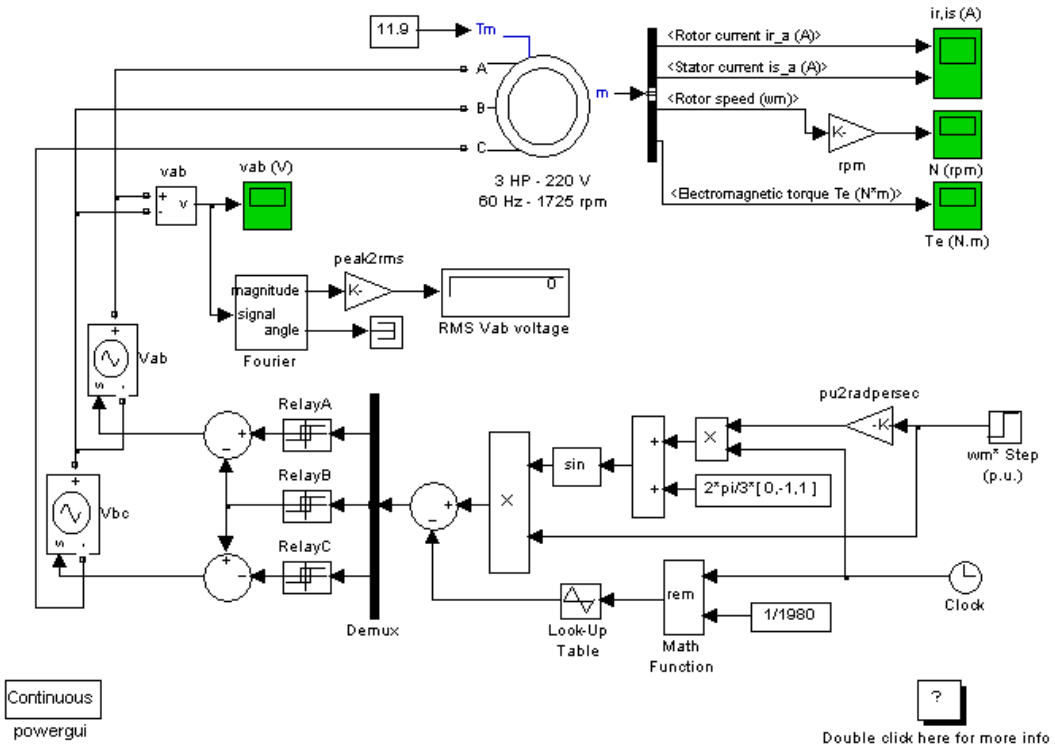
επηρεάζεται η ακρίβεια του αποτελέσματος, παρά μόνο η διακριτότητα της απεικόνισης. Γι' αυτό συνιστάται να ορίζεται η ίδια τιμή για το ελάχιστο και το μέγιστο βήμα ολοκλήρωσης.

Η παράμετρος του μέγιστου βήματος ολοκλήρωσης περιορίζει το βήμα ολοκλήρωσης ώστε να βελτιώνεται η απεικόνιση τη κυματόμορφης εξόδου.

Μπορεί τέλος να γίνει προσομοίωση ενός μοντέλου με σταθερό βήμα ολοκλήρωσης επιλέγοντας τις μεθόδους Runge-Kutta 23 και 45 ή τη μέθοδο του Euler, θέτοντας το ελάχιστο και το μέγιστο βήμα ολοκλήρωσης στην κατάλληλη τιμή.

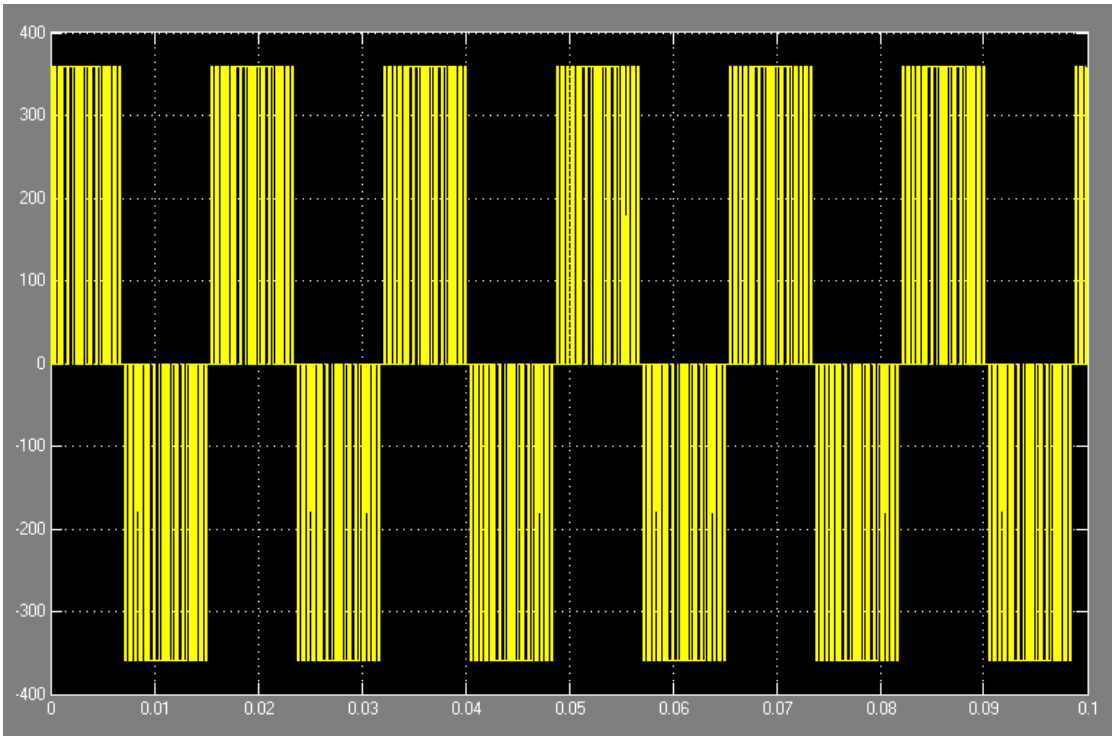
Π.6.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Στο συγκεκριμένο μοντέλο έχουμε ένα τριφασικό ασύγχρονο κινητήρα 3 Hp, 220 V,1725 rpm, ο οποίος τροφοδοτείται μέσω αντιστροφέα Ημιτονοειδούς Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών (SPWM). Η θεμελιώδης συχνότητα της κυματομορφής αναφοράς είναι 60Hz ενώ η συχνότητα της φέρουσας τριγωνικής κυματομορφής είναι 1980Hz. Ο αντιστροφέας είναι δομημένος εξ ολοκλήρου από δομικά διαγράμματα SIMULINK και η έξοδος του διέρχεται από δομικό στοιχείο Ελεγχόμενης Πηγής Τάσης πριν εφαρμοστεί στα τυλίγματα του στάτη του ασύγχρονου κινητήρα. Ο δρομέας του κινητήρα είναι βραχυκυκλωμένος.

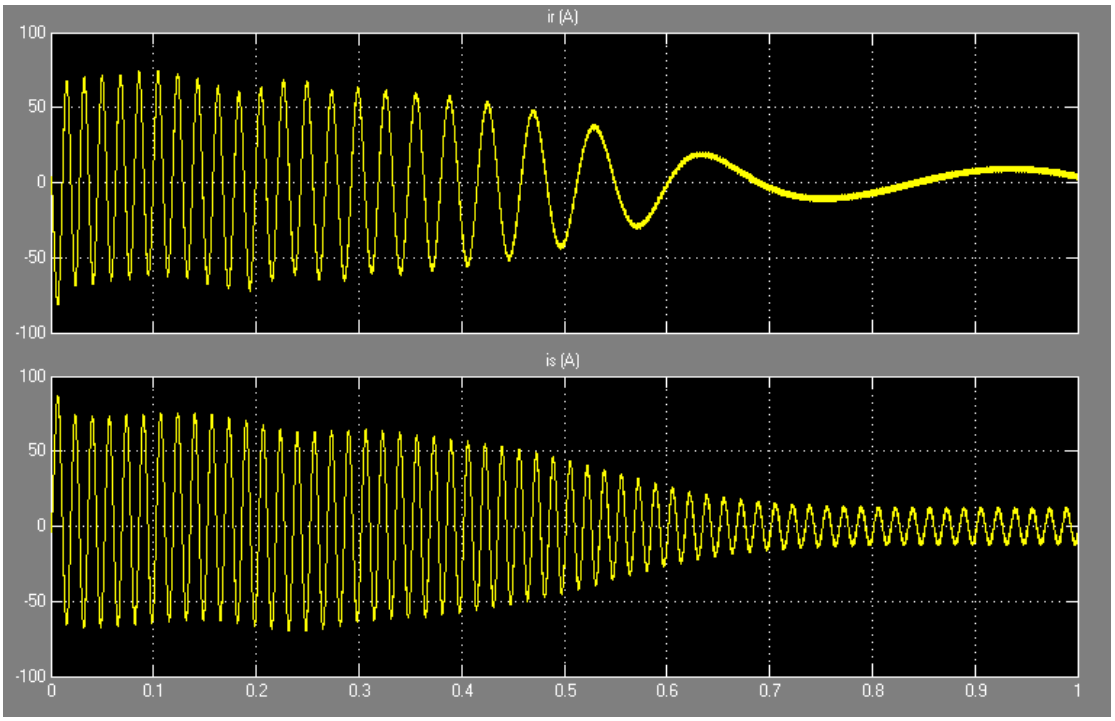


Asynchronous machine fed by PWM Inverter

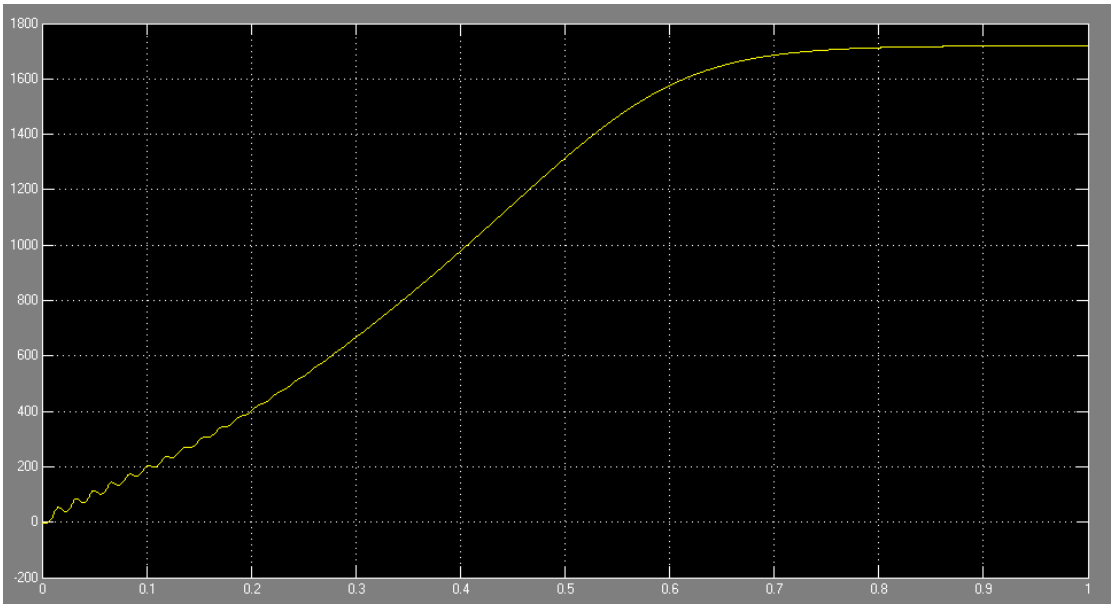
Σχήμα Π.16: Σύστημα ελέγχου ασύγχρονου κινητήρα ανοιχτού βρόχου τροφοδοτούμενου από αντιστροφέα PWM



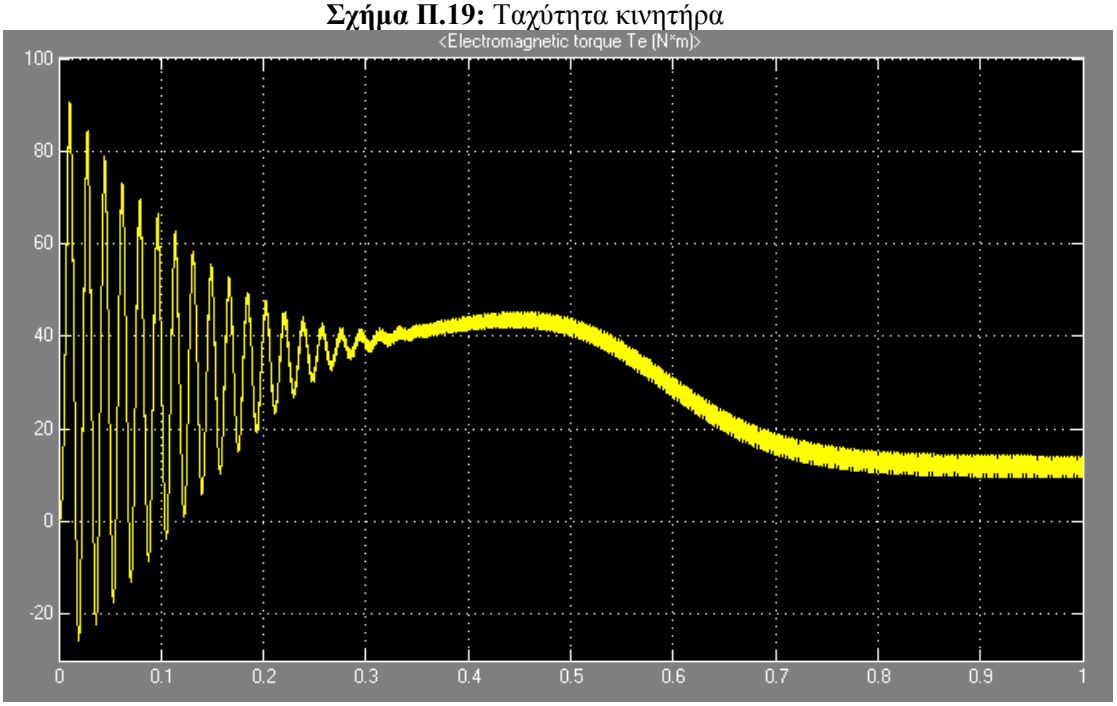
Σχήμα Π.17: Τάση εξόδου αντιστροφέα



Σχήμα Π.18: Ρεύματα δρομέα και στάτη κινητήρα



Σχήμα Π.19: Ταχύτητα κινητήρα



Σχήμα Π.20: Ηλεκτρομαγνητική ροπή κινητήρα

Η αυτεπαγωγή σκέδασης του στάτη ορίστηκε σε τιμή διπλάσια της πραγματικής, έτσι, ώστε να μπορεί να υποκαταστήσει το επαγωγικό φίλτρο εξομάλυνσης (Reactor) που συνήθως παρεμβάλλεται ανάμεσα στον αντιστροφέα και τον κινητήρα. Η ροπή φορτίου που εφαρμόζεται στον άξονα του κινητήρα είναι σταθερή και ίση με ονομαστική τιμή των 11,9Nm. Ο κινητήρας ξεκινά από στάση και η μέγιστη ταχύτατα του είναι 1725rpm.

Π.6.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σχετικά με τις παραμέτρους προσομοίωσης αναφέρουμε ότι η τιμή για την ανοχή σχετικού σφάλματος (relative error tolerance), ορίστηκε αρκετά χαμηλά (1e-7). Αυτό κρίνεται απαραίτητο λόγω της σχετικά υψηλής διακοπτικής συχνότητας (1980Hz) του αντιστροφέα. Επίσης επιλέγουμε κατά προτίμηση την επιλογή επιταχυντής (Accelerator) εάν θέλουμε να μειώσουμε σημαντικά το χρόνο προσομοίωσης.

Παρατηρούμε ότι παρά τη χρήση του φίλτρου, το ρεύμα τόσο του στάτη, όσο και του δρομέα στο σχήμα 18 περιέχουν σημαντικό ποσοστό κυμάτωσης. Αυτό είναι σε ένα βαθμό αναμενόμενο, λόγω της παλμικής τάσης (PWM) τροφοδοσίας του κινητήρα από τον αντιστροφέα. Η κυμάτωση που εισάγει ο αντιστροφέας παρατηρείται επίσης και στην κυματόμορφη της ηλεκτρομαγνητικής ροπής του σχήμα 20. Φυσικά η αδράνεια του κινητήρα αποτρέπει την ανάπτυξη ανάλογης κυμάτωσης στην ταχύτατα του κινητήρα, πράγμα που επιβεβαιώνεται από την κυματόμορφη του σχήματος 19. Επίσης ο χρόνος ανύψωσης της ταχύτητας από τη στάση μέχρι τη μέγιστη τιμή της είναι περίπου 0,9 sec, όπως φαίνεται στην ίδια απεικόνιση.

Η ενεργός τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας της πολικής τάσης του κινητήρα εξάγεται με τη χρήση του δομικού διαγράμματος Fourier από την κατηγορία των στοιχείων Ηλεκτρικών Μετρήσεων. Τέλος, στο σχήμα 17 απεικονίζεται η παλμική τάση εξόδου του αντιστροφέα.

Κλείνοντας το παρόν παράρτημα, πρέπει να αναφέρουμε ότι στόχος ήταν, αφενός να αναδείξουμε την πολύ σημαντική συμβολή του λογισμικού πακέτου MATLAB/SIMULINK στον τομέα της μοντελοποίησης-προσομοιωσης δυναμικών συστημάτων και αφετέρου να προσφέρουμε τη βασική πληροφόρηση στον αναγνώστη και υποψήφιο χρήστη αναφορικά με τη λειτουργία, τη χρήση και τις δυνατότητες που παρέχει το πακέτο, πράγμα που θα βοηθήσει και στην καλύτερη κατανόηση του όλου αντικειμένου που πραγματευόμαστε στην παρούσα εργασία.