

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ
ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ
ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

ΒΑΓΙΑΝΟΣ ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ

Α.Μ. 201100792

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2019



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΔΡΙΤΣΑΣ ΛΕΩΝΙΔΑΣ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονείται στα πλαίσια της πενταετούς υποχρεωτικής φοίτησης στο τμήμα ηλεκτρολογίας του τεχνολογικού και εκπαιδευτικού ιδρύματος της Α.Σ.ΠΑΙ.Τ.Ε. Στόχος της πτυχιακής είναι η μελέτη και η παρουσίαση των σύγχρονων μεθόδων ελέγχου κινητήριων συστημάτων και στην συνέχεια γίνεται ανάλυση των μαθηματικών μοντέλων των μεθόδων αυτών.

Στο πρώτο κεφάλαιο μελετώνται οι βασικές αρχές και η δομή λειτουργίας των κινητήρων εναλλασσομένου ρεύματος και έπειτα αναλύουμε τις δυνατότητες του εναλλασσομένου κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα του οποίου θα μελετήσουμε τις δυνατότητές του και μέσω αυτού θα δούμε την εξέλιξη των μεθόδων ελέγχου του κινητήρα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια παρουσίαση των συστημάτων ελέγχου κινητήρων και μετά από μία ιστορική αναδρομή πως γίνεται η μετάβαση σε ολοκληρωμένα ηλεκτρομηχανικά συστήματα ελέγχου μηχανών των οποίων γίνεται και ανάλυση των λειτουργιών τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο περνάμε στην εξατομίκευση των συστημάτων ελέγχου και γίνεται μια λεπτομερής ανάλυση των μονοφασικών και τριφασικών αντιστροφών που αποτελούν τον κύριο κορμό των συστημάτων αυτών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο της ασύγχρονης μηχανής και οι μαθηματικοί μετασχηματισμοί των εξισώσεων της μηχανής που χρησιμοποιούνται στον διανυσματικό έλεγχο.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται παραδείγματα μηχανημάτων χαμηλής εναλλασσόμενης τάσης από τον κατάλογο της ABB καθώς και μια σύντομη περιγραφή τους.

Θα ήθελα στο σημείο αυτό, να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή της πτυχιακής εργασίας κύριο Λεωνίδα Δρίτσα για την άπογη συνεργασία του, τις εύστοχες παρατηρήσεις του και την πολύτιμη βοήθειά του κατά την διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Πίνακας Περιεχομένων

Περιεχόμενα

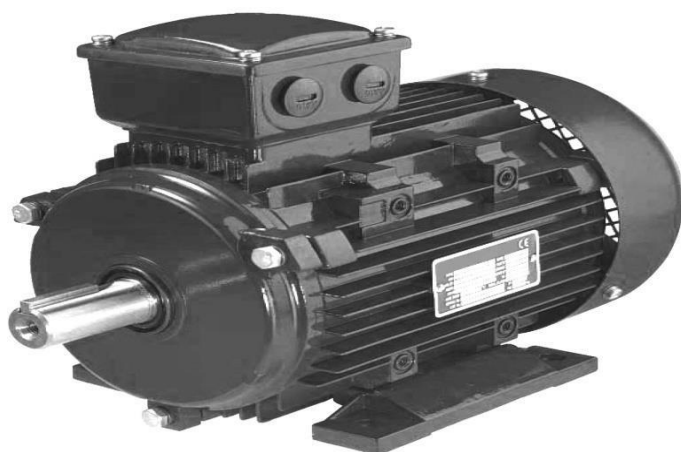
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	4
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	4
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	8
1.3 ΒΑΣΙΚΗ ΔΟΜΗ ΜΙΑΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.....	12
1.4 ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΔΡΟΜΕΑ	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΡΟΦΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ	18
2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ.....	18
2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ	19
2.3 ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ «ΟΔΗΓΗΣΗΣ» (Drives).....	21
2.4 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΥΡΟΥΣ ΠΑΛΜΟΥ (PWM)	25
2.5 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ & PWM.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΚΑΙ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ «ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ».....	30
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	30
3.2 ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ.....	35
3.3 ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ	45
3.4 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΕΥΡΟΥΣ ΠΑΛΜΟΥ	55
3.5 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΩΣ ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΡΟΦΩΝ ΣΤΟΥΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ	60
4.1 ΑΜΕΣΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΟΠΗΣ (DTC/Direct Torque Control)	60
4.2 ΕΜΜΕΣΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ (FOC/Field Oriented Control).....	67
4.3 ΑΜΕΣΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ (DFOC)	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ “AC DRIVES” ΑΠΟ ΚΑΤΑΛΟΓΟ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ (LOW VOLTAGE AC DRIVES ABB)	75
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	81

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ηλεκτρική μηχανή είναι η διάταξη που έχει τη δυνατότητα να μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική και αντίστροφα. Μια τέτοια διάταξη όταν χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ονομάζεται γεννήτρια, ενώ όταν χρησιμοποιείται για την αντίστροφη μετατροπή ονομάζεται κινητήρας. Μια μηχανή η οποία έχει τη δυνατότητα να μετατρέπει ενέργεια και προς τις δύο κατευθύνσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως γεννήτρια είτε ως κινητήρας ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη και τις εφαρμογές για την οποία προορίζεται. Όλες οι υπάρχουσες γεννήτριες και κινητήρες μετατρέπουν ενέργεια από τη μια μορφή στην άλλη μέσω της δράσης ενός μαγνητικού πεδίου.

Οι δύο παραπάνω κατηγορίες ηλεκτρικών μηχανών είναι «πανταχού παρούσες» στη σύγχρονη ζωή. Στο σπίτι οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι το βασικό εξάρτημα των περισσότερων ηλεκτρικών συσκευών. Βρίσκονται στα ψυγεία, στους καταψύκτες, στα πλυντήρια, στα μίξερ, στα συστήματα κλιματισμού, στους ανεμιστήρες και άλλες παρεμφερείς οικιακές συσκευές. Στους χώρους εργασίας και τη βιομηχανική παραγωγή κινούν σχεδόν όλα τα εργαλεία. Τα τελευταία



χρόνια διευρύνεται η χρήση τους σε ηλεκτρικά και υβριδικά αυτοκίνητα. Φυσικά οι γεννήτριες είναι απαραίτητες και για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που κινεί τους παραπάνω κινητήρες.

Ποιος είναι ο λόγος όμως που οι ηλεκτρικές μηχανές είναι τόσο συνηθισμένες στην καθημερινή μας ζωή; Η απάντηση είναι ότι ηλεκτρική ενέργεια είναι μια καθαρή, αλλά και πολύ αποτελεσματική μορφή ενέργειας. Ένας ηλεκτροκινητήρας έχει μεγάλο βαθμό απόδοσης, δεν αποβάλλει καυσαέρια και δεν χρειάζεται συνεχή τροφοδοσία με καύσιμα όπως ένας κινητήρας εσωτερικής καύσεως, πράγμα που τον κάνει κατάλληλο για χώρους όπου τα καυσαέρια θα πρέπει να αποφευχθούν. Ακόμη η θερμότητα και η μηχανική ενέργεια μετατρέπονται σε ηλεκτρική πολύ μακριά από την περιοχή της χρήσης τους. Η μεταφορά της ενέργειας γίνεται εύκολα με αγωγούς και έτσι μπορεί εύκολα και καθαρά να χρησιμοποιηθεί στο σπίτι, στο γραφείο και στο εργοστάσιο. Οι μετασχηματιστές βοηθούν στην όλη διαδικασία μειώνοντας της απώλειες ενέργειας ανάμεσα στα σημεία παραγωγής και κατανάλωσης της.

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. Τα πλεονεκτήματα του ασύγχρονου κινητήρα, με κυριότερο την απλή κατασκευαστική δομή του δρομέα, θα εξηγηθούν στη συνέχεια. Οι επαγωγικές μηχανές χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά ως κινητήρες, εξαιτίας των μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν όταν λειτουργούν ως γεννήτριες.

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. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι ένας σημερινός ασύγχρονος κινητήρας των 100hp, έχει τις ίδιες διαστάσεις με ένα κινητήρα 7.5hp του 1897.

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. Όμως, στη συνέχεια, 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. Ανάμεσα σε πολλούς τύπους ηλεκτρικών μηχανών, η τριφασικές ασύγχρονες μηχανές -μηχανές επαγωγής- συνεχίζουν να έχουν την ίδια εμπιστοσύνη όπως και έναν αιώνα πριν. Τουλάχιστον το 90% των βιομηχανικών κινητήριων συστημάτων χρησιμοποιούν ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες, κατά πλειοψηφία με δρομέα τύπου κλωβού.

Παρότι η αρχή λειτουργίας των μηχανών επαγωγής έχει μείνει αναλλοίωτη, σημαντική τεχνολογική πρόοδος έχει επιτελεστεί, ειδικά τις τελευταίες δεκαετίες. Σε σύγκριση με τους προγόνους τους οι επαγωγικές μηχανές είναι μικρότερες, ελαφρύτερες, πιο αξιόπιστες και αποδοτικές. Οι υψηλής απόδοσης στις οποίες τα τυλίγματα μειωμένης αντίστασης και τα σιδηρομαγνητικά υλικά χαμηλών απωλειών εξασφαλίζουν σημαντική μείωση κατανάλωσης ενέργειας, είναι ευρέως διαθέσιμες. Είναι ακριβότερες από τις συμβατικές μηχανές ωστόσο για τις περισσότερες εφαρμογές οι απλοί περίοδοι αποπληρωμής είναι μικρή. Μια συντηρητική εκτίμηση θέλει τη διάρκεια ζωής μιας επαγωγικής μηχανής να είναι 12 χρόνια. Συνεπώς η αντικατάσταση των συμβατικών συστημάτων με συστήματα αυξημένης αποδόσεως, αγορά που θα έχει καθαρή περίοδο αποπληρωμής λίγα χρόνια (περίπου 2), αποτελεί ζήτημα κοινής λογικής.

Η πλειοψηφία των ασύγχρονων μηχανών λειτουργεί χωρίς έλεγχο καθώς τροφοδοτούνται απευθείας από το εκάστοτε τριφασικό δίκτυο, ωστόσο το ποσοστό των υπό έλεγχο μηχανών που προορίζονται για συστήματα ελέγχου μεταβλητής ταχύτητας αυξάνει σταθερά καθώς οι μηχανές DC χρησιμοποιούνται σπανιότερα. Οι τελευταίες έχουν μειονεκτήματα όπως το υψηλό κόστος αγοράς, η αυξημένη αδράνεια του δρομέα, η κατασκευαστική πολυπλοκότητα και το υψηλό κόστος συντήρησης που προκύπτει λόγω των εγγενών προβλημάτων που συσχετίζονται με τη λειτουργία του συλλέκτη και των ψηκτρών, του συστήματος που πετυχαίνει την ανόρθωση της τάσεως σε μια DC μηχανή.

Τα πλεονεκτήματα αυτών των μηχανών με σημαντικότερα τον απλό έλεγχο τους και την ταχεία απόκτηση ροπής δυσκολεύονται όλο και περισσότερο να αντισταθμίσουν τα μειονεκτήματα καθώς η εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος και των μικροεπεξεργαστών δίνει πλέον τη δυνατότητα υλοποίησης συστημάτων ελέγχου AC μηχανών υψηλής αποδόσεως, με βελτιστοποιημένες αποκρίσεις σε δυναμικές ή στατικές καταστάσεις λειτουργίας.

Αντίθετα, η εξέλιξη στο σχεδιασμό των ηλεκτρικών μηχανών γίνεται με αργά βήματα σε σχέση με τα πεδία των ηλεκτρονικών ισχύος και της αρχιτεκτονικής υπολογιστών, πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι η έρευνα και η ανάπτυξη σε αυτήν την περιοχή ξεκίνησε περισσότερο από εκατό χρόνια πριν, όταν ξεκίνησε και η κατασκευή των ηλεκτρικών μηχανών, και διαφαίνεται πως δεν θα υπάρξει κάποιος κορεσμός σε αυτό το πεδίο. Έτσι τα μειονεκτήματα των DC μηχανών, τα οποία κατά το πλείστον σχετίζονται με κατασκευαστικά ζητήματα φαίνεται να αποκτούν μεγαλύτερο ειδικό βάρος και να καταδικάζουν τις μηχανές συνεχούς ρεύματος σε περιορισμένη και μάλλον εξειδικευμένη χρήση σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος.

Ο έλεγχος των μηχανών επαγωγής είναι πολύ πιο πολύπλοκος από αυτών των DC μηχανών. Οι δύο κύριες πηγές δυσκολιών είναι : η ανάγκη εξόδου μεταβλητής συχνότητας και η μη γραμμικότητα και πολυπλοκότητα του αναλυτικού μοντέλου της μηχανής που εντείνεται ακόμα περισσότερο αν ληφθεί υπόψη η αβεβαιότητα για τις τιμές των παραμέτρων του.

1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

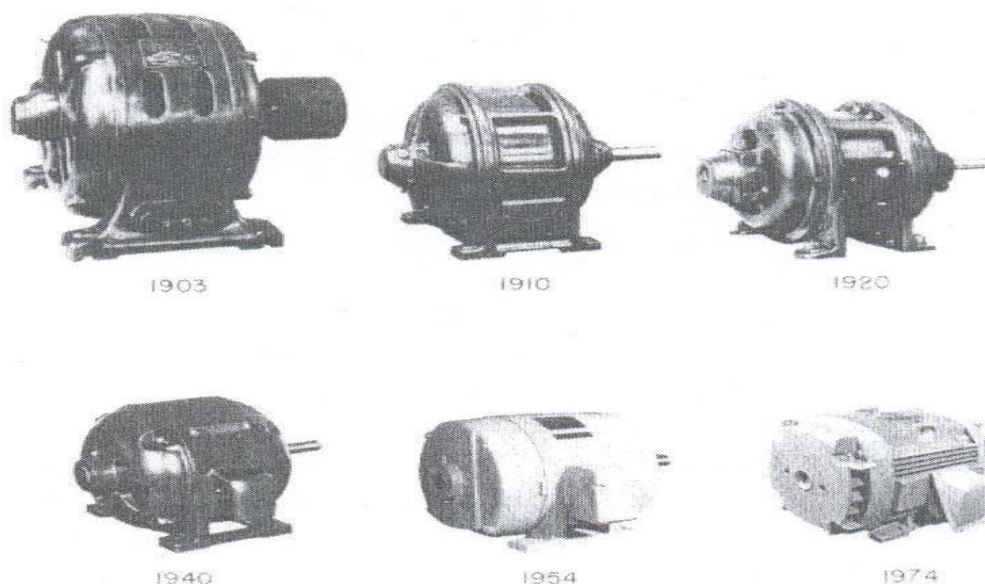
Οι βασικές ιδέες που διέπουν τη λειτουργία των επαγωγικών κινητήρων αναπτύχθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1880 από τον Nicola Tesla, ο οποίος απέκτησε την πατέντα αυτής της ιδέας του το 1888. Εκείνο τον καιρό παρουσίασε μια δημοσίευση στο Αμερικανικό Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων Μηχανικών (American Institute of Electrical Engineers - AIEE, προπομπό της σημερινής IEEE), στο οποίο περιέγραφε τις βασικές αρχές των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα μαζί με τις απόψεις του για δυο ακόμη σημαντικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος - το σύγχρονο κινητήρα και τον κινητήρα μαγνητικής αντίστασης (reluctance motor). Αν και η βασική ιδέα για τον επαγωγικό κινητήρα περιεγράφηκε στα 1888, ο ίδιος ο κινητήρας δεν εξελίχθηκε ως τελική μορφή. Αρχικά, υπήρξε μια περίοδος γρήγορης εξέλιξης που ακολουθήθηκε από μια σειρά καθυστερήσεων και από εξελικτικές βελτιώσεις που συνεχίζονται ακόμη και σήμερα.

Ο επαγωγικός κινητήρας θεωρούνταν αντικειμενικά μοντέρνος μεταξύ του 1888 και του 1895. Εκείνη την περίοδο οι πηγές τάσης δυο και τριών φάσεων είχαν αναπτυχθεί, ώστε να μπορεί να παραχθεί το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής. Ακόμη τα διανεμημένα τυλίγματα είχαν αναπτυχθεί και είχε εισαχθεί ο δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού. Στα 1896 ο τριφασικός επαγωγικός κινητήρας με πλήρεις τις λειτουργίες του και κοινώς αναγνωρισμένος ήταν εμπορικά διαθέσιμος. Από τότε μέχρι τις αρχές του 1970, υπήρξαν συνεχείς βελτιώσεις στην ποιότητα των χαλύβων, στις τεχνικές χύτευσης, στη μόνωση και στα κατασκευαστικά

χαρακτηριστικά των επαγωγικών κινητήρων. Αυτές οι εξελίξεις είχαν ως αποτέλεσμα τη μείωση του μεγέθους του κινητήρα για δεδομένη ισχύ εξόδου, πράγμα που μείωσε το κόστος κατασκευής. Στην πραγματικότητα ένας σημερινός κινητήρας ισχύος 100 hp έχει το ίδιο μέγεθος με τον κινητήρα ισχύος 7,5 hp του 1897.

Όμως, οι παραπάνω βελτιώσεις στη σχεδίαση των επαγωγικών κινητήρων δεν ακολουθήθηκαν από βελτιώσεις στην απόδοση λειτουργίας. Το κύριο βάρος των προσπαθειών στη σχεδίαση κατευθύνθηκε στη μείωση του αρχικού κόστους των υλικών και όχι στην αύξηση της απόδοσης. Οι προσπάθειες στη σχεδίαση οργανώθηκαν σ' αυτή την κατεύθυνση, επειδή η ηλεκτρική ενέργεια ήταν τόσο φθηνή, που ανάγκασε τους κατασκευαστές να επιλέξουν ως βασικό κριτήριο το κόστος παραγωγής του ίδιου του κινητήρα.

Η θεαματική αύξηση της τιμής του πετρελαίου από το 1973 και μετά έκανε όλο και πιο σημαντικό το λειτουργικό κόστος των μηχανών, ενώ το αρχικό κόστος κατασκευής άρχισε να γίνεται μικρότερης σχετικά σημασίας. Αυτές οι εξελίξεις είχαν ως αποτέλεσμα το ενδιαφέρον τόσο των κατασκευαστών όσο και των χρηστών των μηχανών να στραφεί στην αύξηση της απόδοσης των κινητήρων. Παρακάτω βλέπουμε την εξέλιξη μέσα στην ιστορία των εναλλασσόμενων κινητήρων:



Εικόνα 1.1 Η εξέλιξη στην κατασκευή εναλλασσόμενων κινητήρων. Οι κινητήρες του σχήματος έχουν ονομαστική τάση 220 V και ισχύ 15hp. Από το 1890 που κατασκευάστηκαν οι πρώτοι κινητήρες, υπήρξε μια δραματική μείωση του μεγέθους και του υλικού που απαιτεί η κατασκευή τους.

Στις μέρες μας έχουν αναπτυχθεί νέες αλυσίδες παραγωγής επαγωγικών κινητήρων υψηλής απόδοσης απ' όλους σχεδόν τους κατασκευαστές. Αυτοί οι νέοι κινητήρες κερδίζουν συνέχεια όλο και μεγαλύτερο μέρος της αγοράς των επαγωγικών κινητήρων. Με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης των κινητήρων αυτών σε σχέση με τους παραδοσιακούς κινητήρες τυπικής απόδοσης χρησιμοποιούνται αρκετές μέθοδοι κατασκευής. Ανάμεσα σε αυτές είναι:

1. Η χρήση μεγαλύτερης ποσότητας χαλκού στα τυλίγματα του στάτη με σκοπό τη μείωση των απωλειών χαλκού.
2. Η αύξηση του μήκους του πυρήνα στο στάτη και στο δρομέα με σκοπό την αύξηση της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο της μηχανής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του μαγνητικού κορεσμού της μηχανής και τελικά τη μείωση των απωλειών πυρήνα.
3. Η χρήση περισσότερου χάλυβα στο στάτη της μηχανής, πράγμα που επιτρέπει τη μεταφορά μεγαλύτερης ποσότητας θερμότητας από τον κινητήρα προς το περιβάλλον ελαττώνοντας τη θερμοκρασία λειτουργίας. Μετά απ' αυτή την εξέλιξη ο ανεμιστήρας του δρομέα ξανασχεδιάστηκε, ώστε να μειωθούν οι απώλειες εξαερισμού.
4. Ο χάλυβας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του στάτη παρουσιάζει μικρές απώλειες υστέρησης.
5. Ο χάλυβας της μηχανής παράγεται σε εξαιρετικά μικρά πάχη (δηλαδή τα δυναμοελάσματα βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους) και διαθέτει μεγάλη εσωτερική ειδική αντίσταση. Οι δυο αυτές ιδιότητες τείνουν να μειώσουν τις απώλειες των δινορευμάτων.
6. Η κατασκευή του κινητήρα γίνεται με μεγάλη προσοχή, ώστε το διάκενο να είναι ομοιόμορφο και να μειώνονται έτσι οι κατανεμημένες απώλειες του φορτίου.

Στις γενικές τεχνικές που παρουσιάστηκαν πιο πάνω μπορούν να προστεθούν και οι ιδιαίτερες μέθοδοι που χρησιμοποιεί ο κάθε κατασκευαστής με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης του κινητήρα.

Η NEMA έχει υιοθετήσει μια τυποποιημένη μέθοδο που βοηθά στη σύγκριση της απόδοσης των κινητήρων. Αυτή βασίζεται στη Μέθοδο Β της τυποποίησης 112 της IEEE που ονομάζεται "Διαδικασία Δοκιμής Πολυφασικών Επαγωγικών Κινητήρων και Γεννητριών ". Επίσης, η NEMA έχει εισάγει μια νέα προδιαγραφή που ονομάζεται ονομαστική απόδοση και θ' αναγράφεται στις πινακίδες των μελλοντικών κινητήρων κλάσης Α, Β και C. Η ονομαστική απόδοση προσδιορίζει τη μέση απόδοση ενός μεγάλου αριθμού κινητήρων συγκεκριμένων προδιαγραφών και εγγυάται κάποια ελάχιστη απόδοση για όλους αυτούς τους κινητήρες.

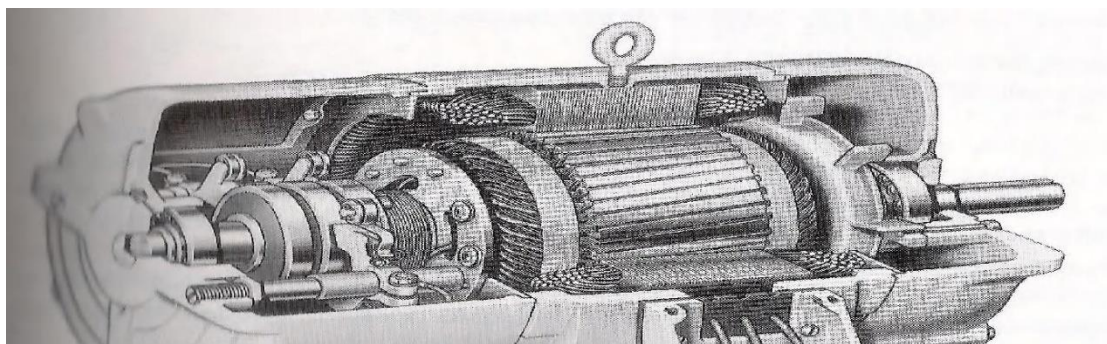
Άλλοι οργανισμοί τυποποίησης έχουν επίσης εκδώσει κανονισμούς για την απόδοση των επαγωγικών κινητήρων. Οι πιο σημαντικοί απ' αυτούς είναι ο Βρετανικός κανονισμός (BS-269), ο κανονισμός της IEC (IEC 34-2) και ο Ιαπωνικός κανονισμός (JEC-37). Όμως, οι τεχνικές μετρήσεις της απόδοσης που περιγράφηκαν είναι διαφορετικές για κάθε τυποποίηση και δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα για την ίδια μηχανή. Η τυποποίηση της NEMA (Μέθοδος Β, IEEE- 112) είναι η πιο συντηρητική από τις τέσσερις μεθόδους μέτρησης της απόδοσης κι αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη σύγκριση των κινητήρων που εξετάζονται σε διαφορετικά συστήματα. Αν εξετάζονται δυο κινητήρες με ονομαστική απόδοση 82,5%, από τους οποίους ο ένας αναλύθηκε με την τυποποίηση της NEMA και ο άλλος με την Ιαπωνική τυποποίηση, αυτός που αναλύθηκε με την τυποποίηση της NEMA έχει στην πραγματικότητα μεγαλύτερη απόδοση.

1.3 ΒΑΣΙΚΗ ΔΟΜΗ ΜΙΑΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Όπως όλες οι μηχανές, έτσι και οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος αποτελούνται από δύο βασικά μέρη. Το ένα είναι σταθερό και ονομάζεται στάτης, ενώ το δεύτερο βρίσκεται επί του άξονος της μηχανής, ονομάζεται δρομέας και όπως γίνεται εύκολα κατανοητό είναι το μέρος της μηχανής που έχει τη δυνατότητα να στρέφεται. Πολλές φορές ο στάτης ή ο δρομέας αναφέρονται ως τύμπανο της μηχανής, με αυτόν τον όρο εννοούμε το μέρος εκείνο που αναπτύσσεται η τάση εξ' επαγωγής, εφ' όσον η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια.

Στον στάτη της μηχανής είναι τοποθετημένα τυλίγματα των οποίων ο αριθμός ποικίλει ανάλογα με τον αριθμό των φάσεων. Τα τυλίγματα αυτά τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενη τάση είτε από το δίκτυο είτε μέσω αντιστροφέα και είναι υπεύθυνα για τη δημιουργία του κύριου μαγνητικού πεδίου της μηχανής.

Ο στάτης κατασκευάζεται από ελάσματα με σκοπό τη μείωση των απωλειών ισχύος λόγω ανάπτυξης δινορευμάτων. Ο δρομέας των μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος, είναι το κινούμενο μέρος της μηχανής. Καθώς περιστρέφεται προσφέρει κινητική ενέργεια στην περίπτωση που η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας, ενώ δέχεται κινητική ενέργεια στην περίπτωση που έχουμε λειτουργία γεννήτριας. Όπως και ο στάτης, έτσι και ο δρομέας συνήθως κατασκευάζεται από δυναμοελάσματα για τη μείωση των απωλειών ενέργειας λόγω δινορευμάτων, αλλά σε αντίθεση με το στάτη και ανάλογα με το είδος της μηχανής ο δρομέας δεν έχει πάντα τυλίγματα στην επιφάνειά του.

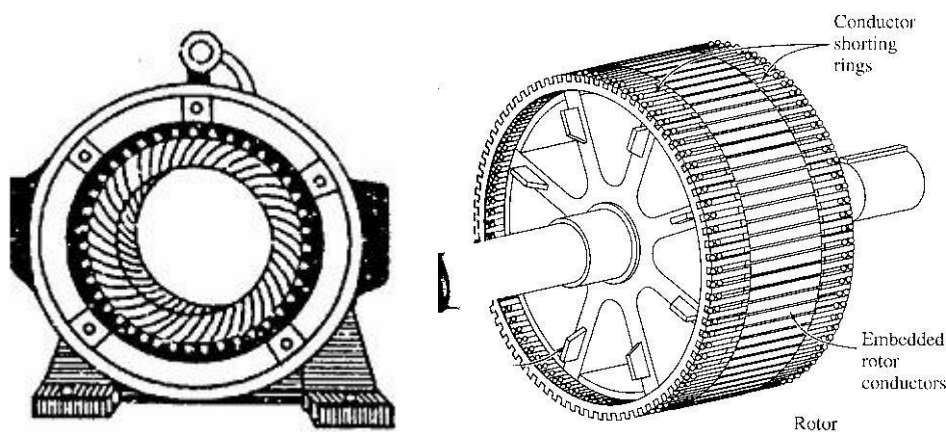


Εικόνα 1.2 Τομή ενός ασύγχρονου κινητήρα

Για παράδειγμα οι ασύγχρονες μηχανές δακτυλιοφόρου δρομέα έχουν ένα ολοκληρωμένο τύλιγμα επί του δρομέα, αντιθέτως οι ασύγχρονες μηχανές βραχυκυκλωμένου κλωβού δεν έχουν τύλιγμα επί του δρομέα, αλλά μια σειρά αγωγίων ράβδων που βραχυκυκλώνονται στα άκρα τους μέσω μεγάλων δακτυλίων βραχυκύκλωσης. Οι σύγχρονες μηχανές έχουν στην επιφάνεια του δρομέα τύλιγμα διέγερσης το οποίο τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα. Ενώ οι βηματικοί κινητήρες (stepper motors), οι κινητήρες υστέρησης (hysteresis motors) και οι κινητήρες μαγνητικής αντίδρασης (reluctance motors) δεν έχουν τυλίγματα στον δρομέα τους.

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό που συναντάται στους δρομείς των μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος είναι η πολυμορφία ως προς την κατασκευή τους. Μπορεί να συναντήσει κανείς απόλυτα λείους κυλινδρικούς δρομείς χωρίς οδοντώσεις και προεξοχές σε κινητήρες υστέρησης, κυλινδρικούς δρομείς με αυλακώσεις στην επιφάνειά τους σε σύγχρονες και ασύγχρονες μηχανές, δρομείς έκτυπων πόλων σε σύγχρονες μηχανές και κινητήρες μαγνητικής αντίδρασης τύπου switched reluctance, καθώς και ειδικής κατασκευής δρομείς όπως είναι για παράδειγμα οι δρομείς με «οδηγούς ροής» στην επιφάνειά τους για βελτίωση των χαρακτηριστικών τους σε σύγχρονους κινητήρες μαγνητικής αντίδρασης ή οι δρομείς με μόνιμους μαγνήτες στην επιφάνειά τους σε κινητήρες μόνιμου μαγνήτη ή βηματικούς κινητήρες.

Στις παρακάτω εικόνες βλέπουμε τον στάτη και τον δρομέα ενός ασύγχρονου κινητήρα:



Εικόνα 1.3 Στάτης και δρομέας ενός ασύγχρονου κινητήρα

Στους σύγχρονους κινητήρες η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι σταθερή και ίση με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη. Αντίθετα στους ασύγχρονους κινητήρες, η ταχύτητα του δρομέα είναι πάντα μικρότερη από την σύγχρονη ταχύτητα (από κει προέρχεται κ ο όρος ασύγχρονοι κινητήρες) και εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου που είναι συνδεδεμένο στον άξονα της μηχανής.

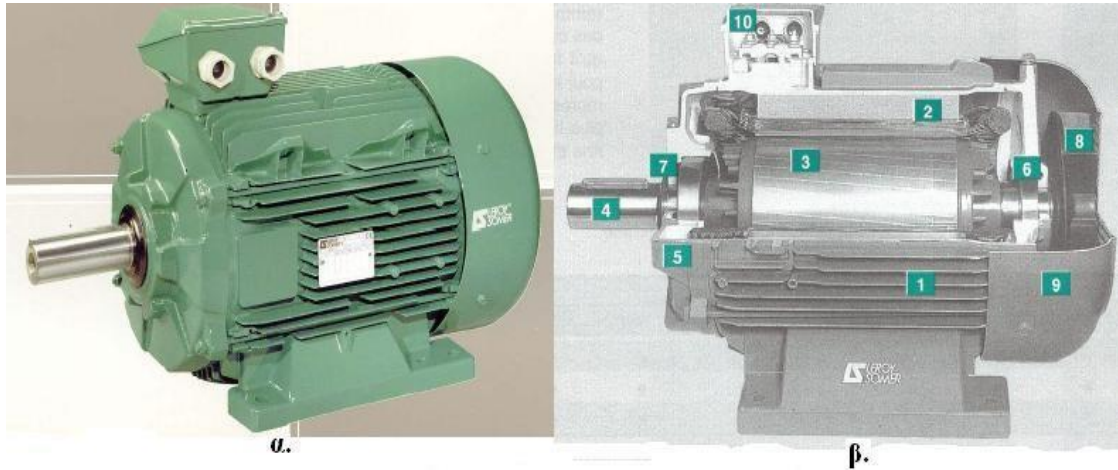
1.4 ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΔΡΟΜΕΑ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία το μοντέλο κινητήρα που θα εξετάσουμε και θα γίνει ο έλεγχος του θα είναι ο εναλλασσόμενος κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα τον οποίο θα αναλύσουμε τις δυνατότητες του και τον λόγο επιλογής αυτού.

Ο δρομέας των κινητήρων αυτών αποτελείται από ελάσματα μεμονωμένα μεταξύ τους, τα οποία προσαρμόζονται στον άξονα. Τα ελάσματα φέρουν οδοντώσεις οι οποίες σχηματίζουν αυλάκια κατά μήκος του δρομέα. Η γεωμετρική αυτή μορφή των αυλακώσεων καθορίζει την ηλεκτρική συμπεριφορά του κινητήρα, δηλαδή την χαρακτηριστική ταχύτητας ροπής. Στα αυλάκια αυτά τοποθετούνται ράβδοι από χαλκό η ορείχαλκο. Τα άκρα των οποίων συνδέονται μεταξύ τους με δακτυλίους βραχυκύκλωσης. Έτσι σχηματίζεται το τύλιγμα κλωβού του δρομέα.

Στους επαγωγικούς κινητήρες μικρής ισχύος χρησιμοποιούμε αλουμίνιο αντί του χαλκού. Στην περίπτωση αυτή, οι δακτύλιοι βραχυκύκλωσης και τα πτερύγια εξαερισμού χυτεύονται μαζί με τους αγωγούς του κλωβού, οι οποίοι δεν είναι μονωμένοι ως προς το σίδηρο του δρομέα. Όμως τα ρεύματα κυκλοφορούν κυρίως από τον κλωβό, καθώς η αγωγιμότητα του αλουμινίου είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του σιδήρου. Οι κινητήρες αυτού του τύπου είναι και οι πιο διαδεδομένοι.

Στο παρακάτω σχήμα στην εικόνα α βλέπουμε την τυπική εξωτερική δομή ενός κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα υψηλής απόδοσης και στην εικόνα β βλέπουμε την τομή του κινητήρα κ με αρίθμηση τα βασικά μέρη του τα οποία θα αναλύσουμε παρακάτω.



Εικόνα 1.4 Τυπική εξωτερική δομή και τομή ενός ασύγχρονου κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα.

Στην εικόνα β διακρίνονται τα παρακάτω μέρη:

- 7. πτερύγια ψύξης του στάτη
- 8. ελάσματα του στάτη και το τύλιγμα
- 9. δρομέας
- 10. άξονας
- 11. και 9. κέλυφος
- 12. και 7. ρουλεμάν
- 8. ανεμιστήρας
- 10. κιβώτιο ηλεκτρικής σύνδεσης

Μερικά από τα πλεονεκτήματα που έκαναν αυτό τον τύπο κινητήρων να χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές είναι τα εξής:

- μικρός συγκριτικά όγκος (ο οποίος διαρκώς μειώνεται με την πρόοδο της τεχνολογίας στον τομέα των μαγνητικών υλικών).
- αντοχή σε σκληρές συνθήκες εργασίας.
- μεγάλη διάρκεια ζωής.
- χαμηλό κόστος συντήρησης
- απλός στην κατασκευή του

Φυσικά ως μηχανή παρουσιάζει και τα μειονεκτήματα της:

- χαμηλό συντελεστή ισχύος.
- μεγάλο ρεύμα εκκίνησης.
- δυσχέρεια στην ρύθμιση της ταχύτητας του.

Ο κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα θεωρείται από τους πιο διαδεδομένους κινητήρες στην αγορά διότι βρίσκει εφαρμογή σε πολλές λειτουργίες όπως μεταφορικές ταινίες, πιεστικά μηχανήματα, γκαραζόπορτες, αντλίες, κυκλοφορητές, ανυψωτικά μηχανήματα, εξαεριστήρες, το ηλεκτρικό αυτοκίνητο και πλήθος άλλων .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΡΟΦΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ

Τα συστήματα ελέγχου κινητήρων και ηλεκτρικής κίνησης αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα αλλά και πλέον ενδιαφέροντα πεδία στην επιστήμη του ηλεκτρολόγου 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.

Τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης και συστήματα ελέγχου βρίσκονται εκεί σε κάθε έκφανση της καθημερινότητάς μας. Το φάσμα είναι ευρύτατο και περιλαμβάνει ηλεκτρικά τρένα, λεωφορεία, εφαρμογές ανύψωσης, μεταφοράς, περιστροφής και ποικίλες άλλες εφαρμογές. Το αντικείμενο της μελέτης των συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης έχει αναρίθμητες πρακτικές εφαρμογές, οι οποίες μεταφράζονται σε οικονομικά και κοινωνικά οφέλη. Σε λίγες γραμμές ορισμένα από αυτά είναι η βελτίωση των μέσων μεταφοράς των 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 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 πιο αποδοτικά και αποτελεσματικά στην 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. Ως εκ τούτου το ενδιαφέρον βαίνει αυξανόμενο, ενώ η διαρκώς διογκούμενη πολυπλοκότητά τους απαιτεί από το μελετητή βαθιά γνώση όλου σχεδόν του φάσματος της επιστήμης της ηλεκτρολογίας.

2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η γέννηση των συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης ήρθε με την σχεδόν ταυτόχρονη θεμελίωση από τους Michael Faraday και Joseph Henry των αρχών του ηλεκτρομαγνητισμού το 1831. Στη συνέχεια στα 1888 κατασκευάζονται βάσει των αρχών αυτών οι πρώτοι ηλεκτρικοί κινητήρες, με τους Thomas Edison και Nikola Tesla να έχουν μια επιστημονική διαμάχη υποστηρίζοντας τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος και τον κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος αντίστοιχα. Ο κινητήρας εναλλασσομένου ρεύματος επικράτησε τελικά, όμως και τα δύο είδη κινητήρων εξελίχθηκαν και βελτιώθηκαν, βρίσκοντας πάμπολλες εφαρμογές, κυρίως μετά τον δεύτερο Παγκόσμιο πόλεμο.

Η πραγματική επανάσταση όμως, στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης, ήρθε όταν αποκτήθηκε η δυνατότητα για ακριβή έλεγχο των ηλεκτρικών αυτών κινητήρων, ώστε να επιτυγχάνουν το επιθυμητό αποτέλεσμα και μάλιστα αυτόματα. Αρχικά επιχειρήθηκε ο έλεγχος με απλά μηχανικά ή ηλεκτρικά συστήματα (όπως π.χ. οι λυχνίες κενού) τα οποία δεν είχαν αρκούντως ικανοποιητικά αποτελέσματα, ενώ η απόδοσή τους ήταν εξαιρετικά χαμηλή.

Η εφεύρεση που άλλαξε εντελώς το τοπίο δίνοντας πρωτόγνωρες μέχρι τότε δυνατότητες ελέγχου ήταν το τρανζίστορ, που παρουσιάστηκε από τους William Shockley, John Bardeen και Walter Brattain στις 22/01/1947. Η εξέλιξη του τρανζίστορ και η εμφάνιση τα αμέσως επόμενα χρόνια των απογόνων του όπως το θυρίστορ (1957), το MOFSET (1969), και η αμέσως επόμενες εξελίξεις τους για εφαρμογές ισχύος όπως το SCR, το GTO, και το IGBT έδωσαν τη δυνατότητα διαχείρισης μεγάλων ηλεκτρικών ισχύων με εξαιρετικά μεγάλες διακοπτικές συχνότητες, αλλάζοντας το τοπίο και δημιουργώντας ένα νέο και ραγδαία εξελισσόμενο αντικείμενο στην επιστήμη της ηλεκτρολογίας. Το πεδίο αυτό δεν είναι άλλο από τα ηλεκτρονικά ισχύος.

Με την έλευση των ηλεκτρονικών ισχύος δόθηκε στους μηχανικούς η δυνατότητα να κατασκευάσουν προηγμένες διατάξεις ελέγχου και να αναπτύξουν

τους απαραίτητους για αυτές αλγορίθμους. Ιδιαίτερα με τους μετατροπείς ισχύος δόθηκε η δυνατότητα τροφοδοσίας των κινητήρων με τάσεις μεταβλητού πλάτους και συχνότητας, γεγονός που επέτρεψε τον πλήρη έλεγχο τους με ιδιαίτερα αποδοτικό τρόπο. Σημαντικό ρόλο βεβαίως διαδραμάτισε και η εισαγωγή νέων και διαρκώς εξελισσόμενων τεχνικών ελέγχου, οι οποίες σήμερα επιτρέπουν τον έλεγχο με ηλεκτρονικό τρόπο όπως π.χ. μέσω ενός ψηφιακού ή ενός αναλογικού υπολογιστή. Κάθε σύγχρονο σύστημα ηλεκτρικής κίνησης υψηλών προδιαγραφών συνοδεύεται απαραίτητως από τον κατάλληλο μετατροπέα ισχύος για τον οποίο έχει εγκατασταθεί και αναπτυχθεί το κατάλληλο υλικό και λογισμικό έλεγχου.

2.3 ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ «ΟΔΗΓΗΣΗΣ» (Drives)

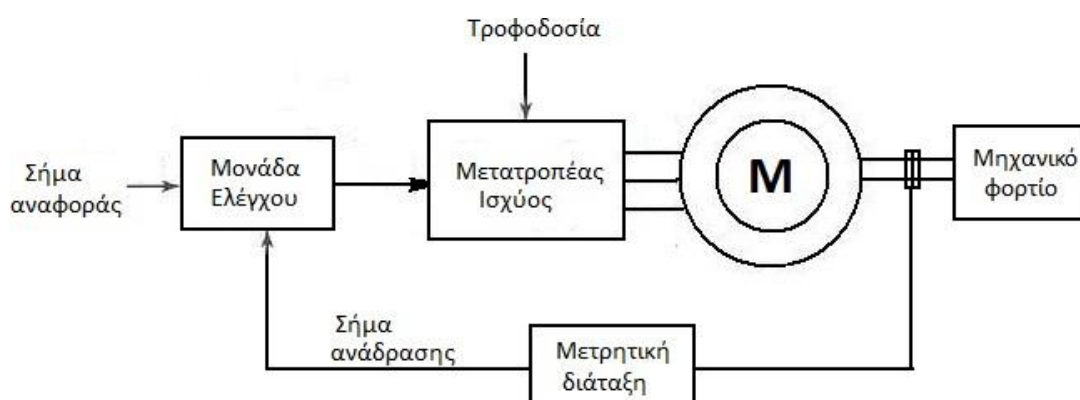
Τα τμήματα που αποτελούν ένα τυπικό κινητήριο σύστημα είναι :

- Η μονάδα ελέγχου, περιέχει ελεγκτές οι οποίοι συγκρίνοντας το σήμα αναφοράς και το σήμα ανάδρασης δημιουργούν τον κλειστό βρόγχο ανάδρασης. Η μονάδα αυτή υλοποιεί κάποιον αλγόριθμο ελέγχου, την “λογική” που οδηγεί το κινητήριο σύστημα στην επιθυμητή κατάσταση λειτουργίας. Η έξοδος της μονάδας ελέγχου είναι ένα σήμα τάσεως, ρεύματος ή συχνότητας, που ελέγχει τον μετατροπέα ισχύος.
- Ο μετατροπέας ισχύος, τροφοδοτεί τον κινητήρα με ρεύμα και τάση. Ο μετατροπέας ισχύος τροφοδοτείται με DC τροφοδοσία, που προκύπτει από το δίκτυο με την μεσολάβηση ανορθωτικής διάταξης. Ο έλεγχος των διακοπτικών του στοιχείων γίνεται με την χρήση του σήματος που λαμβάνεται από την έξοδο της μονάδας ελέγχου.
- Αισθητήρες , χρησιμοποιούνται για την δημιουργία σημάτων ανάδρασης. Ανάλογα τις ανάγκες για τη λειτουργία της μονάδας ελέγχου, μετρούνται μεγέθη όπως ταχύτητα δρομέα, ρεύμα, μαγνητική ροή, τάση κλπ.

Οι μετρητικές διατάξεις μετατρέπουν τις μετρήσεις αυτές σε σήματα τάσης ώστε να επεξεργασθούν από την μονάδα ελέγχου.

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

- Πηγή ισχύος
- Μετατροπέας ισχύος
- Ηλεκτρική μηχανή
- Φορτίο
- Σύστημα μέτρησης και αυτομάτου ελέγχου



Εικόνα 2.1 Τυπικό κύκλωμα ισχύος

Το κύκλωμα ισχύος περιλαμβάνει επίσης τις βαθμίδες της πηγής ισχύος, του μετατροπέα ισχύος, της ηλεκτρικής μηχανής και του φορτίου. Το κύκλωμα ελέγχου, περιλαμβάνει και την βαθμίδα του συστήματος παρακολούθησης και ελέγχου.

Μεταξύ τους αυτές οι βαθμίδες διασυνδέονται διότι μέσω του κυκλώματος ισχύος έχουμε ροή μεγάλης ποσότητας ενέργειας (συγκριτικά με το κύκλωμα ελέγχου) και η ενέργεια αυτή υπό προϋποθέσεις μπορεί να είναι αμφίδρομη μεταξύ των βαθμίδων. Είναι δυνατόν δηλαδή η ηλεκτρική ενέργεια να μετατρέπεται και να μεταφέρεται προς την ηλεκτρική μηχανή, η οποία τώρα λειτουργεί ως ηλεκτρικός

κινητήρας και αποδίδει ως μηχανική στο φορτίο με κατάλληλες ανορθωτικές διατάξεις . Στη συνέχεια, περίσσεια μηχανικής ενέργειας που διαθέτει το φορτίο μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της ηλεκτρικής μηχανής, η οποία μέχρι τώρα λειτουργούσε ως ηλεκτρική γεννήτρια και επιστρέφει μέσω του μετατροπέα προς την πηγή ηλεκτρικής ισχύος (regenerative braking) .

Το κύκλωμα ελέγχου από την άλλη, περιλαμβάνει όλο εκείνο το υλικό και το λογισμικό που είναι απαραίτητο για την παρακολούθηση και τις δράσεις ελέγχου του συστήματος ηλεκτρικής κίνησης. Το κύκλωμα ελέγχου λαμβάνει μετρήσεις(αναδράσεις) από κατάλληλα αισθητήρια (π.χ. για τα ρεύματα ή τις τάσεις των φάσεων, την ταχύτητα του δρομέα, την μαγνητική ροή εντός της μηχανής κ.α.) παρατηρεί, συγκρίνει και εκτιμά χαρακτηριστικά και κρίσιμα μεγέθη του συστήματος και μέσω ενός αλγορίθμου 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 σύγχρονη τάση μάλιστα για συστήματα ηλεκτρικής κίνησης υψηλών απαιτήσεων προστάζει το συνολικό σύστημα να λειτουργεί βέλτιστα. Η σύγχρονη τάση μάλιστα για συστήματα ηλεκτρικής κίνησης υψηλών απαιτήσεων προστάζει το συνολικό σχεδιασμό και βελτιστοποίηση του συστήματος μετατροπέα-μηχανής-συστήματος ελέγχου, έτσι ώστε η αλληλεπίδρασή τους κατά την λειτουργία να δίνει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

Με την τεχνολογική ανάπτυξη και βελτίωση των ηλεκτρονικών ισχύος έχει μειωθεί το κόστος των ηλεκτρονικών στοιχείων οδήγησης των κινητήριων συστημάτων ενώ έχει αυξηθεί η αξιοπιστία τους. Ως αποτέλεσμα, ο έλεγχος των κινητήριων συστημάτων συμφέρει οικονομικά σε όλο και περισσότερες εφαρμογές, ενώ προσφέρει μεγάλες δυνατότητες για την αντιμετώπιση σχεδόν οποιουδήποτε προβλήματος ελέγχου. Πλέον χρησιμοποιούνται σε μια πολύ ευρεία περιοχή ισχύος, από συστήματα μεταβλητής ταχύτητας αντλιών για την ρύθμιση της ροής, μέχρι πολύ ακριβείς ελεγκτές θέσης των ρομπότ.

Οι λόγοι που επιβάλλουν την χρήση ελεγχόμενων κινητήριων συστημάτων σε όλο και περισσότερες εφαρμογές είναι:

- προσφέρουν εξοικονόμηση ενέργειας, αύξηση της παραγωγής και παράλληλη μείωση του κόστους της.
- πολλές εφαρμογές απαιτούν την λειτουργία του κινητήρα σε μεταβλητή ταχύτητα ή απαιτούν έλεγχο θέσης.
- Τα συστήματα ελέγχου προσφέρουν βελτίωση τις δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος, ελέγχοντας τον ρυθμό επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων των μηχανών

Η επιλογή του κινητήριου συστήματος εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής καθώς διαφορετικές τεχνικές και συστήματα ελέγχου φέρουν άλλα χαρακτηριστικά ακρίβειας και απόκρισης, φυσικά με διαφορετικό οικονομικό κόστος και πολυπλοκότητα. Ακόμη, το είδος και το μέγεθος του κινητήρα που χρησιμοποιείται στην εκάστοτε εφαρμογή επηρεάζει σημαντικά την απόκριση του ελεγχόμενου συστήματος.

2.4 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΕΥΡΟΥΣ ΠΑΛΜΟΥ (PWM)

Η διαμόρφωση εύρους παλμού (pulse-width modulation-PWM) είναι μια διαδικασία στην οποία ρυθμίζεται το εύρος

(η διάρκεια) των παλμών μιας παλμοσειρας ανάλογα με το πλάτος ενός μικρού σήματος ελέγχου. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος της τάσης ελέγχου, τόσο μεγαλύτερο εύρος έχουν οι παλμοί που παράγονται. Με τη χρήση ενός ημιτονου επιθυμητής συχνότητας στη θέση της τάσης ελέγχου ενός κυκλώματος PWM είναι δυνατή η παραγωγή μιας κύματομορφης ισχύος, της οποίας η μεση τιμή της τάσης μεταβάλλεται ημιτονοειδως και με τρόπο κατάλληλο για την οδήγηση κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος.

Ο συγκριτής (comparator) είναι κάποιο εξάρτημα που συγκρίνει την τάση εισόδου $V_{in}(t)$ με κάποιο σήμα αναφοράς και δίνει παλμό εναυσης ή σβεσης στα transistor ανάλογα με το αποτέλεσμα της σύγκρισης. Ο συγκριτής A, συγκρίνει την $V_{in}(t)$ με την τάση αναφοράς $V_x(t)$ και ελέγχει τα IGBT T1 και T2 με βάση το αποτέλεσμα σύγκρισης. Ομοίως, ο Συγκριτής B συγκρίνει την $V_{in}(t)$ με την τάση αναφοράς $V_y(t)$ και ελέγχει τα IGBT T3 και T4 με βάση το αποτέλεσμα σύγκρισης. Αν η $V_{in}(t)$ είναι μεγαλύτερη από την $V_x(t)$ σε οποιοδήποτε χρονική στιγμή t , ο συγκριτής A δίνει παλμό εναυσης στο T1 και παλμό σβεσης στο T2. Στην αντίθετη περίπτωση δίνει παλμό σβεσης στο T1 και παλμό εναυσης στο T2. Παρόμοια, αν η $V_{in}(t)$ είναι μεγαλύτερη από την $V_y(t)$ σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή t , ο συγκριτής B δίνει εναυσης στο T3 και παλμό σβεσης στο T4. Στην αντίθετη περίπτωση δίνει παλμό σβεσης στο T3 και παλμό εναυσης στο T4.

Για την κατανόηση της λειτουργίας αυτού του κυκλώματος αντιστροφέα PWM εξετάζεται το τι συμβαίνει, όταν εφαρμόζονται διαφορετικές τάσεις ελέγχου σ'αυτό. Ας υποθεθεί αρχικά ότι η τάση ελέγχου είναι 0V. Τότε, οι τάσεις $V_u(t)$ και $V_v(t)$ είναι ακριβώς ίσες και η τάση εξόδου στο φορτίο $V_{load}(t)$ είναι ίση με μηδέν.

Κατόπιν ας υποθεθεί ότι η τάση ελέγχου που εφαρμόζεται στο κύκλωμα είναι σταθερή, θετική και ίση με το μισό με της μέγιστης τάσης αναφοράς.

Ας υποθεθεί, τελικά, ότι η τάση ελέγχου είναι ημιτονοειδης. Το εύρος της παλμοσειρας που παράγεται, μεταβάλλεται ημιτονοειδως με την τάση ελεγχου. Το αποτελεσμα είναι μια κυματομορφη εξοδου, της οποιας η μεση τάση σε οποιαδήποτε μικρή περιοχή της κύματομορφης είναι ανάλογη της μέσης τάσης του σήματος ελέγχου

στην ίδια περιοχή. Η βασική συχνότητα της κύματομορφης εξόδου είναι η ίδια με τη συχνότητα της τάσης ελέγχου. Όπως είναι φυσικό, στην τάση εξόδου υπάρχουν αρμονικές συνιστώσες, που συνήθως δεν αφορούν τις εφαρμογές ελέγχου κινητήρων. Αυτές οι αρμονικές συνιστώσες ίσως προκαλέσουν αύξηση της θερμοκρασίας του κινητήρα που οδηγείται από τον αντιστροφέα, αλλά αυτή η αύξηση μπορεί να αντισταθμιστεί με την αγορά ενός

ειδικά σχεδιασμένου κινητήρα ή με τον υποβιβασμό (derating) ενός συμβατικού κινητήρα (με λειτουργία σε ισχύ μικρότερη από την ονομαστική).

Ένας πλήρως τριφασικός αντιστροφέας PWM αποτελείται από τρεις μονοφασικούς αντιστροφείς ομοίους μ'αυτόν που περιγράφηκε παραπάνω, ενώ οι τάσεις ελέγχου του είναι ημίτονα με διάφορα φάσης 120° μεταξύ τους. Ο έλεγχος συχνότητας σ'έναν τέτοιο αντιστροφέα PWM πραγματοποιείται με την μεταβολή στη συχνότητα της τάσης ελέγχου.

Ο αντιστροφέας PWM μεταβαίνει πολλές φορές από την μια κατάσταση στην άλλη κατά τη διάρκεια μιας περιόδου

της παραγόμενης τάσης εξόδου. Την εποχή που γράφεται το βιβλίο, στους αντιστροφείς PWM οι τάσεις αναφοράς έφταναν σε συχνότητες μέχρι 12kHz κι έτσι τα διακοπτικά στοιχεία ενός αντιστροφέα πρέπει να αλλάζουν κατάσταση μέχρι τις 2400 στροφές το δευτερόλεπτο. Αυτές οι ταχύτατες αλλαγές καταστάσεων οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι αντιστροφείς PWM απαιτούν ταχύτερα διακοπτικά στοιχεία από τους κοινούς αντιστροφείς πηγών ρεύματος και τάσης. Για να λειτουργούν σωστά οι αντιστροφείς PWM απαιτούν διακοπτικά στοιχεία υψηλής συχνότητας, όπως τα IGBT, τα GTO και ή τα transistor ισχύος. Η τάση ελέγχου που τροφοδοτεί τα κυκλώματα των συγκριτών συχνά υλοποιείται ψηφιακά με την βοήθεια ενός μικροεπεξεργαστή που τοποθετείται σε μια κάρτα στο εσωτερικό της μονάδας ελέγχου του κινητήρα. Η τάση ελέγχου είναι δυνατό να ελέγχεται από τον μικροεπεξεργαστή με κάποιον πιο βελτιωμένο τρόπο από αυτόν που περιγράφηκε παραπάνω. Ο μικροεπεξεργαστής έχει την δυνατότητα να μετατραπεί την τάση ελέγχου, ώστε να πετυχαίνει διαφορετικά επίπεδα συχνότητας και τάσης με οποιονδήποτε επιθυμητό τρόπο.

Για παράδειγμα ο μικροεπεξεργαστής αυτός θα μπορούσε να περιλαμβάνει ράμπες μεταβλητής επιτάχυνσης και επιβράδυνσης, περιορισμούς ρευμάτων και καμπύλες τάσης συχνότητας με την απλή μεταβολή κάποιων παραμέτρων στο πρόγραμμα του.

2.5 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ & PWM

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η μέθοδος που προτιμάται στις μέρες για την ρύθμιση της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων είναι διάταξεις οδήγησης μεταβλητής συχνότητας με ηλεκτρονικούς διακοπτες. Η συγκεκριμένη διάταξη είναι πολύ ευέλικτη: η είσοδος της μπορεί να είναι μονοφασική ή τριφασική, με συχνότητα 50 ή 60Hz και πλάτος από 208 έως 230V. Η έξοδος της διάταξης είναι ένα τριφασικό σύστημα τάσεων με συχνότητα που μεταβάλλεται από 0-120Hz και πλάτος που μεταβάλλεται από 0V έως την ονομαστική τάση του κινητήρα. Η τάση και η συχνότητα εξόδου στην παραπάνω διάταξη ρυθμίζεται με τις τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών, που περιγράφηκαν στο κεφ.3. Στη διαμόρφωση εύρους παλμών τόσο η τάση, όσο και η συχνότητα της εξόδου μεταβάλλονται ανεξάρτητα, μεταξύ τους. Η διάταξη οδήγησης PWM ρυθμίζει την συχνότητα εξόδου διατηρώντας σταθερή την ενεργό τιμή της τάσης.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 7.9, συχνά είναι επιθυμητή η γραμμική μεταβολή της ενεργού τιμής της τάσης με ταυτόχρονη μεταβολή της συχνότητας εξόδου.

Το μέγεθος της ενεργού τιμής της τάσης ρυθμίζεται ανάλογα με το κλάσμα του χρόνου στο οποίο εμφανίζεται τάση στην έξοδο του κινητήρα, ενώ η συχνότητα ρυθμίζεται από τον ρυθμό που μεταβάλλεται η πολικότητα των παλμών από θετική σε αρνητική και αντίστροφα.

Η τυπική συσκευή οδήγησης επαγωγικού κινητήρα του διαθέτει από κατασκευής πολλές ιδιότητες που βελτιώνουν την ικανότητα ρύθμισης και την ευκολία χρήσης. Μερικές από αυτές συνοψίζονται παρακάτω.

Ρύθμιση της συχνότητας (ταχύτητα)

Η συχνότητα εξόδου της διάταξης οδήγησης μπορεί να ελέγχεται χειροκίνητα από ένα σύστημα ελέγχου τοποθετημένο πάνω στο σασί της διάταξης ή να ελέγχεται από απόσταση με κάποιο σήμα ρεύματος ή τάσης. Η ικανότητα ρύθμισης της συχνότητας εξόδου μιας διάταξης οδήγησης με κάποιο εξωτερικό σήμα ελέγχου είναι πολύ σημαντική, επειδή επιτρέπει τη χρήση ενός εξωτερικού υπολογιστή ή ενός

ελεγκτή διαδικασίας για τον έλεγχο της ταχύτητας του κινητήρα σε συνδυασμό με τις συνολικές ανάγκες της βιομηχανικής μονάδας.

Επιλογή της Μορφής της Τάσης και της Συχνότητας

Οι τύποι των μηχανικών φορτίων που εφαρμόζονται σ έναν επαγωγικό κινητήρα παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία. Μερικά φορτία, όπως οι ανεμιστήρες , απαιτούν μικρή ροπή κατά την εκκίνηση που αυξάνεται με το τετράγωνο της ταχύτητας. Κάποια άλλα φορτία μπορεί να είναι πιο δύσκολα στην εκκίνηση τους και να απαιτούν μεγαλύτερη ροπή από την ονομαστική υπο πλήρες φορτίο για να αρχίσουν να κινούνται. Η συγκεκριμένη συσκευή οδήγησης παράγει μεγάλη ποικιλία καμπυλών τάσης - συχνότητας , από τις οποίες μπορεί να επιλέγει η πιο κατάλληλη, με σκοπό η ροπή του κινητήρα να ανταποκρίνεται στην απαιτούμενη ροπή του φορτιού.

Σ' αυτή τη μέθοδο η τάση εξόδου μεταβάλλεται γραμμικά με τις μεταβολές της συχνότητας για ταχύτητες μικρότερες από την βασική και παραμένει σταθερή για ταχύτητες μεγαλύτερες από την βασική.

Η καμπύλη τάσης – συχνότητας χρησιμοποιείται για φορτία με υψηλή ροπή εκκίνησης. Σ' αυτή τη μέθοδο η τάση και πάλι μεταβάλλεται γραμμικά με τη συχνότητα για ταχύτητες μικρότερες από την βασικό αλλά η κλίση της καμπύλης είναι μικρότερη για συχνότητες μικρότερες από 30hz. Για κάθε δεδομένη συχνότητα η τάση εξόδου της διάταξης θα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τάση της προηγούμενης μεθόδου. Αυτή η αύξηση της τάσης προσφέρει μεγαλύτερες ροπές με μειονέκτημα αυξημένου μαγνητικού κορεσμού και αυξημένου ρεύματος μαγνήτισης. Όμως , ο αυξημένος μαγνητικός κορεσμός και τα μεγάλα ρεύματα μαγνήτισης είναι αποδεκτά για τις μικρές χρονικές περιόδους που διαρκεί η εκκίνηση των ισχυρών φορτίων. . Ας σημειωθεί εδώ η αυξημένη ροπή που είναι διαθέσιμη στις χαμηλές συχνότητες.

Η καμπύλη τάσης - συχνότητας που χρησιμοποιείται για φορτία με μικρές ροπές εκκίνησης , που ονομάζονται φορτία ομαλής εκκίνησης . Σ' αυτή τη μέθοδο η τάση μεταβάλλεται παραβολικά με τη συχνότητα για ταχύτητες μικρότερες από τη βασική. Για κάθε δεδομένη συχνότητας κάτω από τα 60hz η τάση εξόδου της συσκευής θα είναι μικρότερη από την αντίστοιχη τάση τα βασικής μεθόδου.

Αυτή η μειωμένη τάση παράγει μικρότερη ροπή και προφέρει αργή και ομαλή εκκίνηση για φορτία χαμηλής φορτία. Οι χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας του

επαγωγικού κινητήρα για κάποιες συχνότητες λειτουργίας είναι κάτω από τη βασική ταχύτητα. Ας σημειωθεί ότι η ροπή που είναι διαθέσιμη στις χαμηλές συχνότητες είναι μειωμένη.

Ανεξάρτητα Ρυθμιζόμενες Επιταχύνσεις και Επιβραδύνσεις

Όταν η ταχύτητα του κινητήρα θα πρέπει να μεταβληθεί, η συσκευή οδήγησης που τον ελέγχει θα πρέπει να μεταβάλλει τη συχνότητα της, ώστε η ταχύτητα να πάρει τη νέα τιμή της. Αν η μεταβολή της ταχύτητας είναι ξαφνική

η συσκευή οδήγησης δεν προσπαθεί να μεταβάλλει στιγμιαία την ταχύτητα από τη προηγούμενη επιθυμητή τιμή στη νέα επιθυμητή τιμή. Αντίθετα, οι ρυθμοί της επιτάχυνσης ή της επιβράδυνσης του κινητήρα περιορίζονται σε κάποιο επίπεδο ασφάλειας με τη βοήθεια ειδικών κυκλωμάτων που περιλαμβάνονται στα ηλεκτρονικά της συσκευής οδήγησης.

Προστασία κινητήρα

Η συσκευή οδήγησης του επαγωγικού κινητήρα περιλαμβάνει ποικίλες ιδιότητες που έχουν σκοπό την προστασία του κινητήρα που συνδέεται στη συσκευή οδήγησης. Η συσκευή μπορεί να ανιχνεύσει ισχυρά μόνιμα ρεύματα, ισχυρά στιγμιαία, κατστάσεις υπερτάσεων και καταστάσεις μειωμένης τάσης. Σε καθεμιά από τις προηγούμενες περιπτώσεις η συσκευή οδήγησης διακόπτει τη λειτουργία του κινητήρα.

Συσκευές οδήγησης επαγωγικών κινητήρων όπως οι προηγούμενες είναι τόσο ευέλικτες και αξιόπιστες στις μέρες μας, που οι επαγωγικοί κινητήρες σε πολλές εφαρμογές, όπου απαιτούνται μεγάλοι εύρους μεταβολές της ταχύτητας, άρχισαν να αντικαθιστούν τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΛΕΤΗ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΚΑΙ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ «ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ»

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα προηγούμενα κεφάλαια αναλύσαμε τα πλεονεκτήματα των ασύγχρονων κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα και τους λόγους για τους οποίους είναι πλέον διαδεδομένοι και χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές της καθημερινής μας ζωής.

Λόγω των παραπάνω τα τελευταία χρόνια έγιναν προσπάθειες ώστε να καταστεί εφικτή, αποτελεσματική και πρακτικά εφαρμόσιμη η ρύθμιση στροφών αυτών των κινητήρων. Τα αποτελέσματα είναι εντυπωσιακά. Με την χρήση των αντιστροφών (inverters) όχι μόνο επιτευχθεί η ρύθμιση των στροφών των ασύγχρονων κινητήρων αλλά ταυτοχρόνως βελτιώθηκαν ή και εξαφανίσθηκαν τα μειονεκτήματά τους.

Πράγματι χρησιμοποιώντας ένα αντιστροφή επιτυγχάνουμε εκτός από την πλήρη ρύθμιση στροφών και τα εξής επίσης σημαντικά:

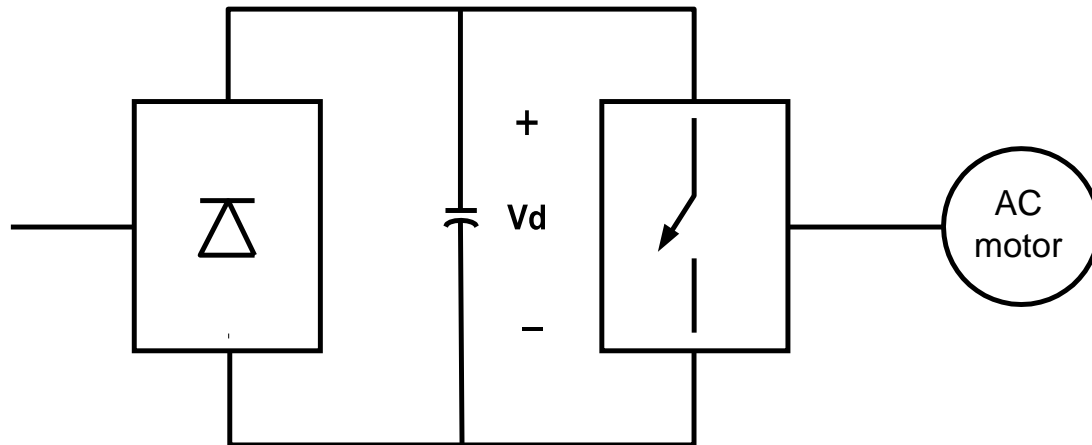
- Ομαλή εκκίνηση και μάλιστα ρυθμιζόμενη με μικρό ρεύμα εκκίνησης
- Ομαλή πέδηση
- Αύξηση της ροπής εκκινήσεως
- Δυνατότητα αυτόματης ή προγραμματιζόμενης ρύθμισης
- Πλήρη έλεγχο των στροφών

- Εξοικονόμηση ενέργειας
- Δυνατότητα αλλαγής φοράς περιστροφής χωρίς επιπλέον διακόπτες
- Αυξημένη προστασία του κινητήρα

Η απαρίθμηση αυτών και μόνο των πλεονεκτημάτων, τα οποία μέχρι προ ολίγων ετών εθεωρούντο φαντασία, καταδεικνύει την μεγάλη υπεροχή της ρυθμίσεως στροφών μέσω αντιστροφέων (inverter) έναντι όλων των άλλων παλαιών μεθόδων. Η χρήση αντιστροφέων καθιστά τους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα πλεονεκτικούς και έναντι των άλλων τύπων κινητήρων π.χ. κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα-κινητήρες συνεχούς ρεύματος ακόμα και σε ειδικές εφαρμογές.

Συμπερασματικά λοιπόν στο πρόβλημα της δημιουργίας μιας πηγής εναλλασσόμενης τάσης με μεταβλητή συχνότητα και πλάτος αποτελεί η μετατροπή της συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη με τη βοήθεια των αντιστροφέων. Οι αντιστροφείς μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον αριθμό των φάσεων σε δύο κατηγορίες:

- Μονοφασικούς αντιστροφείς σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας (με δύο ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία) ή σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας (με τέσσερα ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία)
- Τριφασικούς αντιστροφείς (με έξι ελεγχόμενα ημιαγωγικά διακοπτικά στοιχεία).



Εικόνα 3.1 αντιστροφείας διακοπτικού τύπου σε κινητήριο σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος

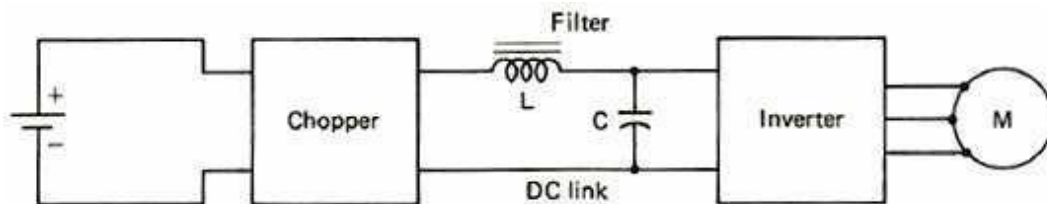
Οι αντιστροφείς που συναντώνται συχνότερα σε εφαρμογές τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς τάσης, που προέρχεται από ανορθωτικό σύστημα αποτελούμενο από διόδους ή από θυρίστορ. Ονομάζονται αντιστροφείς πηγής τάσης (VSI, voltage source inverters). Οι αντιστροφείς διακοπτικού τύπου βρίσκουν εφαρμογή, σε κινητήρια συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος και σε τροφοδοτικά αδιάλειπτης λειτουργίας εναλλασσόμενου ρεύματος, όπου ο αντικειμενικός σκοπός είναι η παραγωγή μιας ημιτονοειδούς εναλλασσόμενης τάσης εξόδου, με ελεγχόμενα τόσο το πλάτος όσο και τη συχνότητά της.

Οι αντιστροφείς σταθερής πηγής τάσης(VSI) μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω τρεις γενικές κατηγορίες:

- **Αντιστροφείς με διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM)**, στους οποίους η συνεχής τάση εισόδου του αντιστροφέα έχει σταθερό πλάτος, ενώ το πλάτος και η συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου ελέγχεται με διαμόρφωση του εύρους των παλμών των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα.
- **Αντιστροφείς με τετραγωνική κυματομορφή**, στους οποίους για τον έλεγχο του πλάτους της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου, ελέγχεται το πλάτος της συνεχούς τάσης εισόδου. Έτσι ο αντιστροφέας ελέγχει μόνο τη συχνότητα της τάσης εξόδου. Η εναλλασσόμενη τάση εξόδου έχει μια κυματομορφή

παρόμοια με τετραγωνική και για αυτόν το λόγο ονομάζονται αντιστροφείς με τετραγωνική κυματομορφή.

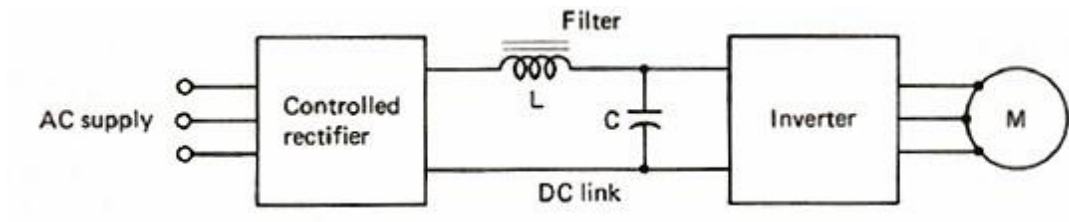
- **Μονοφασικοί αντιστροφείς** στους οποίους είναι δυνατός ο έλεγχος του πλάτους και της συχνότητας της τάσης εξόδου του μετατροπέα, αν και η είσοδος του αντιστροφέα είναι μια σταθερή συνεχή τάση και στους διακόπτες δεν επιβάλλεται διαμόρφωση PWM (η κυματομορφή της τάσης εξόδου είναι σχεδόν τετραγωνική). Επομένως, οι αντιστροφείς αυτοί συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά των δυο προηγούμενων αντιστροφέων.



Εικόνα 3.2 Μετατροπέας σταθερής πηγής τάσης

Αντιστροφείς σταθερής πηγής ρεύματος(CSI). Η αυτεπαγωγή σε σειρά με την τροφοδοσία είναι τόσο μεγάλη που διατηρεί το ρεύμα εισόδου σταθερό. Το ρεύμα στην έξοδο καθορίζεται από τον inverter, ενώ η τάση εξόδου εξαρτάται από το είδος του φορτίου.

Αντιστροφείς DC ζεύξης(DC link). Είναι διατάξεις μετατροπής δύο βαθμίδων. Η εναλλασσόμενη τάση του δικτύου μετατρέπεται σε συνεχή μέσω ανορθωτή. Η ανορθωμένη τάση μετατρέπεται πάλι σε εναλλασσόμενη μέσω inverter με δυνατότητα ρύθμισης της συχνότητας. Για την ανόρθωση χρησιμοποιείται ελεγχόμενος ανορθωτής ο οποίος τροφοδοτεί τον inverter με μεταβλητή συνεχή τάση.



Εικόνα 3.3 Μετατροπείας DC ζεύξης με μη ελεγχόμενο ανορθωτή και chopper στην είσοδο

3.2 ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ

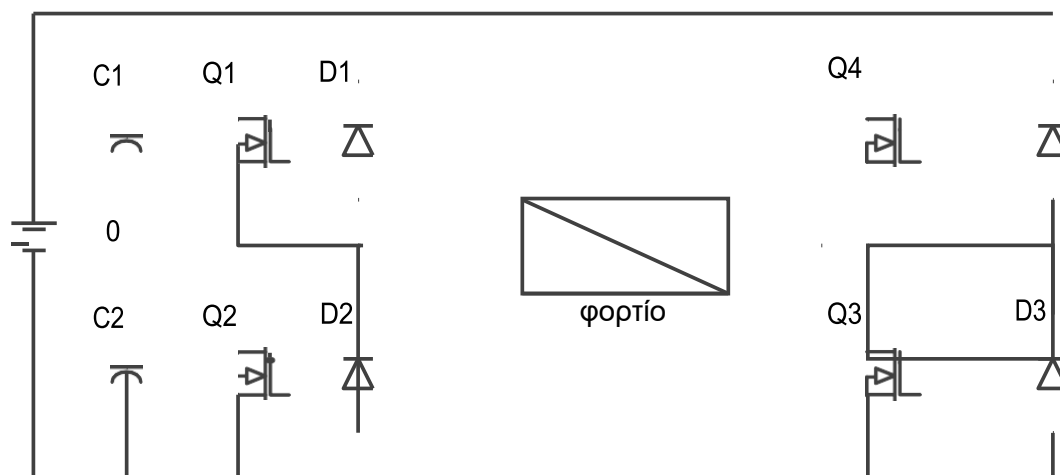
3.2.1. ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΣ ΑΝΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΜΕ ΠΛΗΡΗ ΓΕΦΥΡΑ

Για την παραγωγή ενός εναλλασσόμενου ρεύματος από μια πηγή συνεχούς, χρησιμοποιούνται στρεφόμενοι ή στατικοί αντιστροφείς. Οι πρώτοι είναι ζεύγη μηχανών (κινητήρας συνεχούς-ασύγχρονη ή σύγχρονη γεννήτρια), ενώ οι δεύτεροι είναι διατάξεις ηλεκτρονικής ισχύος, χωρίς κινούμενα μέρη με διόδους, θυρίστορ ή τρανζίστορ ισχύος. Με την ραγδαία εξέλιξη της ηλεκτρονικής ισχύος η χρήση των στατικών αντιστροφέων απλώνεται όλο και περισσότερο.

Αν η συχνότητα της τάσης εξόδου ρυθμίζεται αυτοδύναμα από το κύκλωμα ελέγχου, τότε πρόκειται για αντιστροφή με εξαναγκασμένη οδήγηση. Αν το φορτίο είναι σειριακός ταλαντωτής, τότε το κύκλωμα ελέγχου μπορεί να συγχρονιστεί με την ιδιοσυχνότητα του φορτίου, η οποία καθορίζει τη συχνότητα της τάσης εξόδου. Στην περίπτωση αυτή πρόκειται για οδήγηση φορτίου. Η συχνότητα, σύμφωνα με την οποία ανοίγουν και κλείνουν τα θυρίστορ, δίνεται στην περίπτωση της εξαναγκασμένης οδήγησης από το κύκλωμα ελέγχου. Η συχνότητα αυτή είναι και η συχνότητα εξόδου του αντιστροφέα. Στο ισοδύναμο, κατά την αντικατάσταση των θυρίστορ με ζεύγη διακοπών-διόδων (ιδανικά θυρίστορ) δεν λήφθηκαν υπόψη ορισμένα φαινόμενα των πραγματικών θυρίστορ, τα οποία επηρεάζουν αρνητικά τη λειτουργία του αντιστροφέα.

Για την λειτουργία του κυκλώματος πρέπει όμως να ληφθούν υπόψη οι εξής ιδιότητες των πραγματικών θυρίστορ:

1. Η έναυση ενός θύριστορ είναι δυνατή μόνον όταν εφαρμόζεται σε αυτό θετική τάση και δοθεί ένας παλμός έναυσης στο ηλεκτρόδιο ελέγχου.
2. Η σβέση ενός αναμμένου θύριστορ μπορεί να γίνει μόνο με την εφαρμογή μιας αρνητικής τάσης.
3. Μόλις το ρεύμα γίνει μηδέν, το θυρίστορ χρειάζεται έναν χρόνο ανάκτησης μέχρι να μπορέσει να ανακτήσει την ικανότητα αποκοπής, ακόμα και αν εφαρμόζεται θετική τάση πάνω του. Ο χρόνος ανάκτησης κυμαίνεται μεταξύ 10 και 100μsec



Εικόνα 3.4 τυπικό σχέδιο μονοφασικού αντιστροφέα με πλήρη γέφυρα.

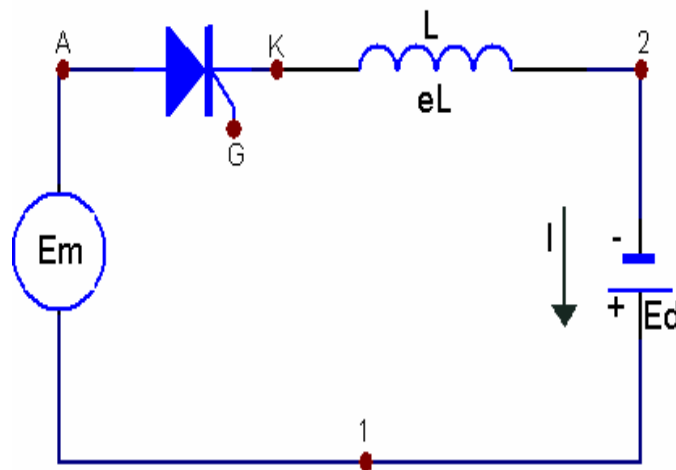
Εξετάζοντας το κύκλωμα του παραπάνω σχήματος συμπεραίνονται τα ακόλουθα.

- Όταν το ρεύμα και η τάση εξόδου έχουν ταυτόχρονα θετικές τιμές (δηλ. το γινόμενο $V_0 \cdot i_0$ είναι θετικό), τότε άγουν οι διακόπτες Q1 και Q3 και έτσι ενεργός ισχύς μεταφέρεται από την είσοδο του αντιστροφέα προς την έξοδο.

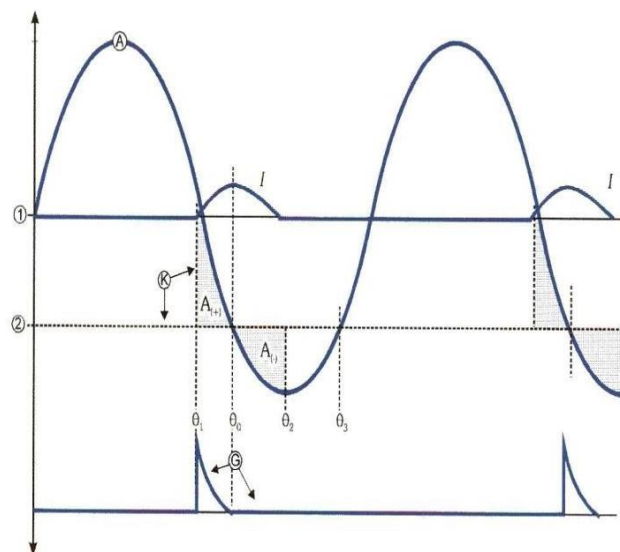
- Όταν το ρεύμα και η τάση εξόδου έχουν ταυτόχρονα αρνητικές τιμές (δηλ. το γινόμενο $V_0 \cdot i_0$ είναι θετικό), τότε άγουν οι διακόπτες Q2 και Q4 και έτσι ενεργός ισχύς μεταφέρεται από την είσοδο του αντιστροφέα προς την έξοδο.
- Όταν η τάση εισόδου έχει μηδενική τιμή και ταυτόχρονα το ρεύμα εξόδου έχει θετική τιμή (δηλ. το γινόμενο $V_0 \cdot i_0$ είναι μηδέν), τότε μπορεί να άγει ένα από τα ζεύγη των ημιαγωγών [Q3, D2], [Q1, D4] και έτσι επιτυγχάνεται η κυκλοφορία του ρεύματος εξόδου. Δηλαδή αν στην περίπτωση αυτή άγει ο διακόπτης Q3 τότε το ρεύμα εξαναγκάζει τη δίοδο D2 να άγει και έτσι το ρεύμα κυκλοφορεί στο υποκύκλωμα Q3-φορτίο- D2. Το ρεύμα αυτό, το οποίο κυκλοφορεί στο υποκύκλωμα ονομάζεται ανακυκλούμενο ρεύμα.
- Όταν η τάση εισόδου έχει μηδενική τιμή και ταυτόχρονα το ρεύμα εξόδου έχει αρνητική τιμή (δηλ. το γινόμενο $V_0 \cdot i_0$ είναι μηδέν), τότε άγει ένα από τα ζεύγη των ημιαγωγών [Q4, D1], [Q2, D3] και έτσι επιτυγχάνεται η κυκλοφορία του ρεύματος εξόδου. Δηλαδή αν στην περίπτωση αυτή άγει ο διακόπτης Q4 τότε το ρεύμα εξαναγκάζει τη δίοδο D1 να άγει και έτσι το ρεύμα κυκλοφορεί στο κύκλωμα Q4-φορτίο- D1. Το ρεύμα αυτό, το οποίο κυκλοφορεί στο υποκύκλωμα ονομάζεται επίσης ανακυκλούμενο ρεύμα.
- Όταν η τάση εξόδου έχει αρνητική τιμή και ταυτόχρονα το ρεύμα εξόδου αρνητική τιμή (δηλ. το φορτίο είναι επαγωγικό και το γινόμενο $V_0 \cdot i_0$ είναι αρνητικό), τότε οι δίοδοι ελεύθερης διέλευσης D1 και D3 εξαναγκάζονται να άγουν και έτσι το ρεύμα κυκλοφορεί μέσω του υποκυκλώματος πηγή - D1-φορτίο - D3.
- Όταν η τάση εξόδου έχει αρνητική τιμή και ταυτόχρονα το ρεύμα εξόδου θετική τιμή (δηλ. το φορτίο είναι χωρητικό και το γινόμενο $V_0 \cdot i_0$ είναι αρνητικό), τότε οι δίοδοι ελεύθερης διέλευσης D2 και D4 εξαναγκάζονται να άγουν και έτσι το ρεύμα κυκλοφορεί μέσω του υποκυκλώματος πηγή - D2-φορτίο - D4. Στην περίπτωση αυτή ενεργός ισχύς μεταφέρεται από τον πυκνωτή του φορτίου προς την πηγή εισόδου.

3.2.2. ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ

Ένας αντιστροφέας εξορισμού μετατρέπει μια DC ισχύ σε μια AC ισχύ. Δηλαδή κάνει την αντίστροφη λειτουργία ενός ανορθωτή. Υπάρχουν δύο τύποι αντιστροφέων. Ο αντιστροφέας φυσικής μεταγωγής και ο αντιστροφέας εξαναγκασμένης μεταγωγής. Εδώ θα εξετασθεί η λειτουργία ενός αντιστροφέα φυσικής μεταγωγής που το κύκλωμα του είναι ίδιο ακριβώς με αυτό του ελεγχόμενου ανορθωτή με τη διαφορά ότι τα άκρα της μπαταρίας τώρα έχουν αντιστραφεί. Έτσι το δυναμικό του σημείου 2 βρίσκεται κάτω από το σημείο 1 γιατί το ρεύμα μπορεί να ρέει μόνο από την άνοδο προς την κάθοδο και η πηγή E_d δίνει ισχύ όταν το thyristor άγει. Στις εικόνες παρακάτω βλέπουμε το κύκλωμα φυσικής μεταγωγής και τις χαρακτηριστικές τάσης και ρεύματος.



εικόνα 3.5 κύκλωμα φυσικής μεταγωγής



εικόνα 3.6 χαρακτηριστικές ρεύματος και τάσης για το κύκλωμα φυσικής μεταγωγής

Από την άλλη μεριά η ισχύς αυτή πρέπει να απορροφηθεί από τα άκρα της AC πλευράς επειδή δεν έχουμε απώλειες στο πηνίο και το θυρίστορ. Επομένως το κύκλωμα αυτό είναι δυναμικά ικανό να μετατρέψει DC ισχύ σε AC ισχύ. Για να επιτευχθεί αυτή η μετατροπή το θυρίστορ πρέπει να σκανδαλιστεί μέσα σε μία ακριβώς ορισμένη περιοχή.

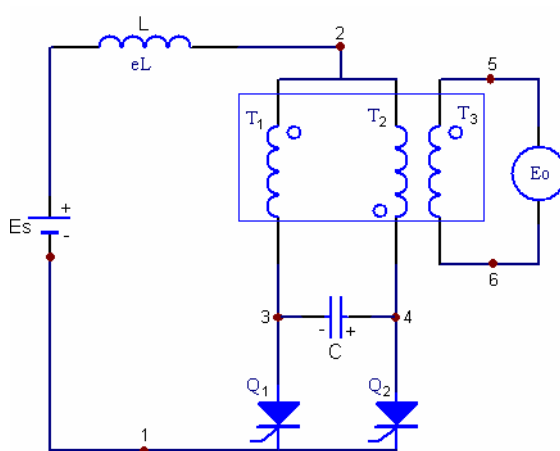
Πρώτα για την έναρξη της αγωγής το A πρέπει να είναι θετικό σε σχέση με το K. Απ' όταν το K είναι στο ίδιο δυναμικό με το σημείο 2, οι παλμοί σκανδαλισμού πρέπει επομένως να εφαρμοστούν ή πριν από την Θ_0 ή μετά την Θ_3 . Ας υποθέσουμε ότι το θυρίστορ σκανδαλίζεται στην γωνία Θ_1 . Τότε το K μεταβαίνει από το επίπεδο 2 στο επίπεδο A και το πηνίο συσσωρεύει θετικά $V \cdot S$ μέχρι την γωνία Θ_0 . Έτσι το συνολικό ρεύμα φθάνει ένα μέγιστο στην γωνία Θ_0 και η περιοχή $A_{(+)}$ είναι μέγιστη. Βαθμίδων μετά πέφτει στο μηδέν και η αγωγή σταματά στην γωνία Θ_2 όταν $A_{(-)} = A_{(+)}$. Για την αύξηση του ρεύματος και επομένως ροή της ενεργούς ισχύος πρέπει να αυξήσουμε την γωνία έναυσης Θ_1 .

Για την μείωση της αγωγής η $A_{(-)}$ πρέπει να είναι ίση με $A_{(+)}$. Επομένως η μέγιστη περιοχή που μπορεί να έχει η $A_{(-)}$ είναι αυτή που βρίσκεται μεταξύ του ημιτονικού σήματος και του επιπέδου του σημείου 2. Καθώς αυξάνουμε την γωνία έναυσης η $A_{(+)}$ γίνεται όλο και μεγαλύτερη, αλλά αν αυτή ξεπεράσει τη μέγιστη διαθέσιμη τιμή $A_{(-)}$ η αγωγή δεν θα σταματήσει ποτέ. Το DC ρεύμα τότε δεν θα δημιουργείται με κάθε περίοδο μέχρι που η ασφάλεια του κυκλώματος "καεί".

Για αυτόν τον λόγο η αγωγή δεν μπορεί να αρχίσει αμέσως μετά την γωνία Θ_3 . Τα μέγιστα του ρεύματος καθυστερούν των θετικών μεγίστων της τάσης και έτσι η AC πηγή πρέπει ακόμη να τροφοδοτήσει με άεργη ισχύ Q τον αντιστροφέα. Επομένως P και Q ρέουν σε αντίθετες διευθύνσεις σε ένα αντιστροφέα.

3.2.3. ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗΣ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ

Ο αντιστροφέας αυτός μετατρέπει DC σε AC ισχύ. Υπάρχουν πολλοί τύποι αναστροφέων εξαναγκασμένης μεταγωγής και όλοι στηρίζουν την λειτουργία τους στην δυναμική μεταγωγή. Η συχνότητα εξόδου μπορεί να φθάσει μέχρι και τα 20KHz εξαρτώμενη από την ικανότητα switching (ανοιγοκλεισίματος) των θυρίστρος. Το φορτίο μπορεί να είναι παθητικό όπως μια αντίσταση ή ένα πηνίο ή ενεργό όπως ένας AC κινητήρας.

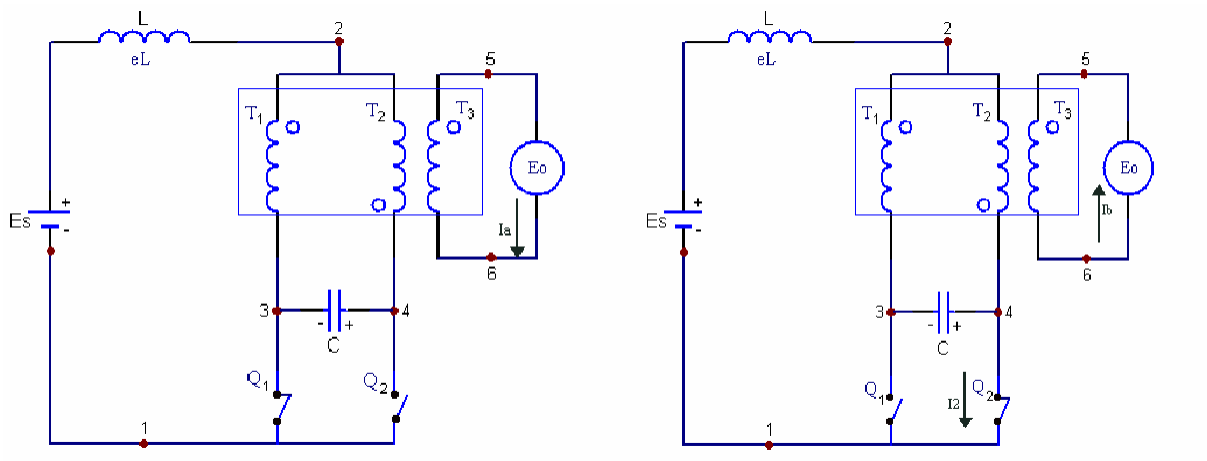


Εικόνα 3.7 τυπικός αντιστροφέας εξαναγκασμένης μεταγωγής

Ο αντιστροφέας αυτός αποτελείται από:

4. την πηγή DC E.
5. τα θυρίστρος Q1,Q2.
6. το πηνίο εξομάλυνσης για την διατήρηση σταθερού ρεύματος πηγής
7. τον πυκνωτή μεταγωγής C.
8. ένα M\T με δύο πρωτεύοντα T₁ και T₂ και ένα δευτερεύον T₃ και ο οποίος θεωρούμε πως είναι ιδανικός.
9. το φορτίο R.
10. ένα σύστημα ελέγχου εξωτερικό για τον σκανδαλισμό των θυρίστρος Q1,Q2.

Για να καταλάβουμε την λειτουργία του αντιστροφέα υποθέτουμε ότι αρχικά το Q₁ βρίσκεται σε αγωγή και το Q₂ είναι μανδαλωμένο. Το σταθερό ρεύμα I₁ ρέει στο πρωτεύον T₁ και ο πυκνωτής C είναι πλήρως φορτισμένος.



Εικόνα 3.8 Η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος και η λειτουργία του αντιστροφέα εξαναγκασμένης μεταγωγής

Στις παραπάνω εικόνες βλέπουμε την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος και την λειτουργία του αντιστροφέα εξαναγκασμένης μεταγωγής.

Το σταθερό ρεύμα I_1 επάγει ένα σταθερό ρεύμα I_a στο δευτερεύον τύλιγμα. Η κατάσταση αυτή διατηρείται έως όταν εφαρμόσουμε ένα παλμό στην πύλη του Q_2 αρχίζοντας την αγωγή του. Καθώς το Q_2 θα αρχίσει να άγει το δυναμικό του σημείου 4 πέφτει το δυναμικό του σημείου 1. Αμέσως ο πυκνωτής εκφορτίζεται παράγοντας ένα ρεύμα μεταγωγής I_c το οποίο ρέει αντίθετα από το I_1 . Το ρεύμα I_c αυξάνεται πολύ γρήγορα και όταν $I_c = I_1$, το ρεύμα Q_1 γίνεται μηδέν και τότε ενεργεί σαν ένας ανοικτός διακόπτης. Με το Q_1 τώρα μανδαλωμένο, ο πυκνωτής φορτίζεται γρήγορα μέσω του πρωτεύοντος T_1 και επομένως το σημείο 3 γρήγορα γίνεται θετικό σε σχέση με το σημείο 4. Καθώς το ρεύμα φορτίσεως I_1 ελαττώνεται στο τύλιγμα T_2 . Όταν οι συνθήκες αυτές σταθεροποιηθούν, το T_2 μεταφέρει το ίδιο ρεύμα όπως το T_1 μετέφερε πριν. Αυτό είναι συνοδευόμενο από ένα ρεύμα δευτερεύοντος I_b .

Ο επόμενος παλμός αρχίζει την αγωγή στο Q_1 προξενώντας την πτώση δυναμικού του σημείου 3 στο δυναμικό του σημείου 1. Ο πυκνωτής ξανά πάλι εκφορτίζεται και έτσι μανδαλώνεται το Q_2 ξαναγυρνώντας πάλι στο ίδιο σημείο που ξεκινήσαμε. Ουσιαστικά δηλαδή οι εναλλασσόμενοι παλμοί πύλης που μεταφέρουν

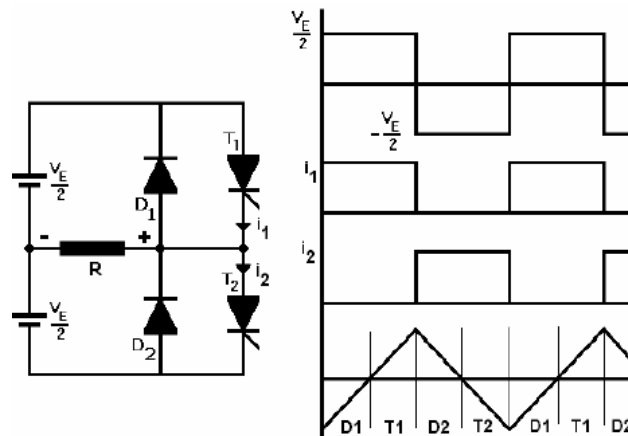
την αγωγή από το ένα θυρίστορ στο άλλο οφείλονται στην παρουσία του πυκνωτή μεταγωγής C.

Σε σχέση με το M/T , όταν το Q_1 άγει ρεύμα I_1 επάγει ένα ρεύμα δευτερεύοντος I_0 . Βασιζόμενοι στις πολικότητες το I_a πρέπει να ρέει στη διεύθυνση που φαίνεται. Όμοια όταν το Q_2 άγει το I_2 επάγει ένα ρεύμα δευτερεύοντος I_b . Το αποτέλεσμα είναι τα δύο δευτερεύοντα ρεύματα I_a και I_b είναι ίσα αλλά ρέουν σε αντίθετες διευθύνσεις. Επομένως το φορτίο διαρρέεται από ένα εναλλασσόμενο ρεύμα.

Για την αλλαγή της συχνότητας πρέπει απλά να μεταβάλουμε τη συχνότητα των παλμών στις πύλες Q_1 , Q_2 . Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να δημιουργήσουμε συχνότητες από 4Hz έως 5000Hz ανάλογα με τον σχεδιασμό του M/Tα και τον SCR_s. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι αντιστροφείς αυτοί μπορούν να τροφοδοτούν με AC ισχύ ωμικά ή και επαγωγικά φορτία. Έτσι βρίσκονται σε πλήρη αντίθεση με τους αντιστροφείς φυσικής μεταγωγής οι οποίοι απορροφούν άεργη ισχύ από την AC πλευρά.

3.2.4. ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ ΤΥΠΟΥ ΗΜΙΓΕΦΥΡΑΣ

Η αρχή λειτουργίας του μονοφασικού αντιστροφέα εξηγείται με την βοήθεια του παρακάτω σχήματος το οποίο αποτελείται από δύο chopper. Όταν είναι αναμμένο το thyristor T1 για μισή περίοδο ($T/2$) η στιγμιαία τιμή της τάσης στο φορτίο θα είναι $V_E/2$.



Εικόνα 3.9 Μονοφασικός αντιστροφέας με τοπολογία ημιγέφυρας

Όταν αναμμένο μόνο το thyristor T2 για άλλη μισή περίοδο τότε η στιγμιαία τιμή της τάσης στο φορτίο θα είναι $-V_E/2$. Το κύκλωμα είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε τα T1, T2 να μην είναι ποτέ αναμμένα διότι η πηγή θα βραχυκυκλώνεται. Επίσης στις παραπάνω κυματομορφές της τάσης εξόδου και των ρευμάτων φαίνονται τα δύο thyristor με φορτίο καθαρά ωμικό. Ο αναστροφέας αυτός απαιτεί DC πηγή τριών καλωδίων. Σε κάθε thyristor όταν αυτό είναι ανοικτό η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του είναι V_E . Η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου δίνεται από την σχέση:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\pi} \left(\frac{V_e}{2}\right) d\omega\tau + \int_{\pi}^{2\pi} \left(-\frac{V_e}{2}\right) d\omega\tau \right]} = \frac{V_e}{2}$$

Εάν το φορτίο είναι επαγωγικό το ρεύμα δεν μπορεί να αλλάζει ακαριαία φορά μαζί με την τάση εξόδου. Εάν λοιπόν το T_1 σβήσει την χρονική στιγμή $t=T/2$ τότε το ρεύμα φορτίου εξακολουθεί να ρέει μέχρις ότου να μηδενιστεί μέσω της διόδου $D2$ και του κάτω μισού τμήματος της DC πηγής. Παρόμοια εάν το $T/2$ σβήσει την χρονική στιγμή $t=T$ τότε το ρεύμα φορτίου εξακολουθεί να ρέει μέχρις ότου μηδενιστεί μέσω της διόδου $D1$ και του πάνω μισού τμήματος της DC πηγής. Όταν οι διόδοι $D1$ και $D2$ άγουν τότε ένα μέρος της αποθηκευμένης στην αυτεπαγωγή του φορτίου ενέργειας επιστρέφει στην πηγή. Παράλληλα στις κυματομορφές μας φαίνεται το ρεύμα στο φορτίο και τα διαστήματα στα οποία άγουν οι διόδοι και τα θυρίστορ για καθαρά επαγωγικό φορτίο.

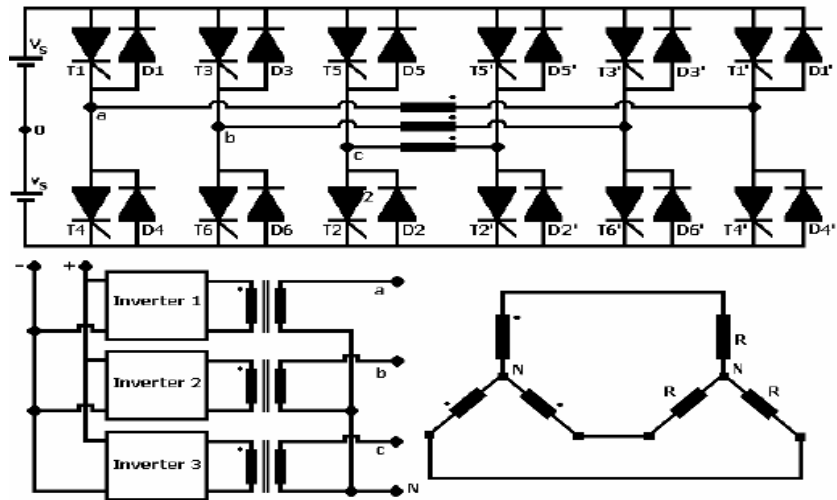
Για καθαρά επαγωγικό φορτίο κάθε θυρίστορ άγει μόνο για $T/2$. Ανάλογα με τον συντελεστή ισχύος του φορτίου, η περίοδος αγωγής ενός θυρίστορ κυμαίνεται από 90 έως 180 μοίρες. Στην πράξη αν t_q είναι ο χρόνος σβέσης ενός θυρίστορ, θα πρέπει να υπάρχει μια ελάχιστη χρονική καθυστέρηση t_q , ανάμεσα στο θυρίστορ που τείνει να σβήσει και στο επόμενο που τείνει να ανάψει, διαφορετικά το αποτέλεσμα θα είναι βραχυκύκλωμα μέσω των θυρίστορ. Συνεπώς η μέγιστη αγωγή ενός θυρίστορ σε χρόνο θα είναι $T/2-t_q$

3.3 ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ

Την τελευταία δεκαετία έχουν κατασκευασθεί για τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης τριφασικοί αντιστροφεείς των οποίων τα ημιαγώγιμα στοιχεία είναι G.T.O(Gate-turn-off) θυρίστορ ή IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor).Στα ημιαγώγιμα αυτά στοιχεία μπορεί ευκολότερα και με χαμηλότερο κόστος να εφαρμοσθεί η μέθοδος παλμοδότησης με P.W.M. Επίσης αυτά τα ημιαγώγιμα στοιχεία μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλότερη συχνότητα από τα κοινά θυρίστορ. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μέγιστες χαρακτηριστικές τιμές ορισμένων από τα ημιαγώγιμα στοιχεία τα οποία βρίσκουν εφαρμογή σε τριφασικούς αντιστροφεείς. Οι τιμές του πίνακα ισχύουν για το 1991.

ΣΤΟΙΧΕΙΑ	U/V	I/A	T _{off} /μs
MOS-FET	1000	28	0,3-0,5
IGBT	1200	400	1-4
Dip-transistors	1200	300	15-25
GTO-thyristor	4500	3000	10-25

Οι τριφασικοί αντιστροφεείς χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές υψηλής ισχύος. Όπως θα δούμε στο παρακάτω σχήμα τρεις μονοφασικοί αντιστροφεείς μπορούν να συνδεθούν παράλληλα για να σχηματίσουν έναν σκόπιμα παραληφθεί προκειμένου να απλουστευθεί το σχήμα. Τα διάφορα κυκλώματα μεταγωγής των θυρίστορς έχουν παραληφθεί για την κατανόηση του κυκλώματος :

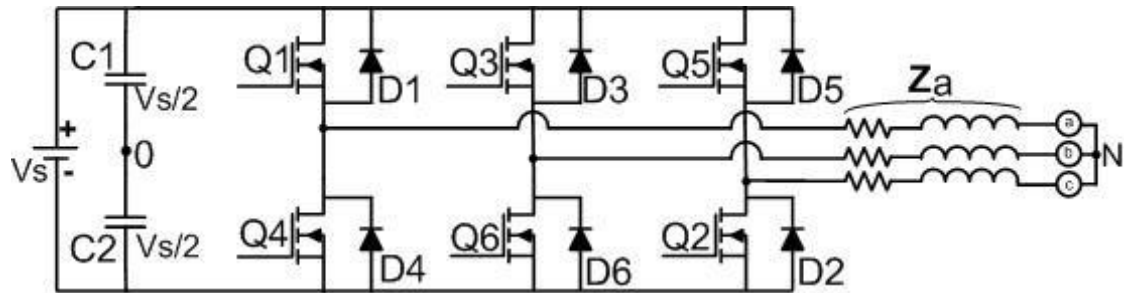


εικόνα 3.10 Τυπικός τριφασικός αντιστροφέα

Στην συνέχεια θα μελετήσουμε δύο τύπους ελέγχου που μπορούν να εφαρμοστούν στα θυρίστωρ με αγωγή 180 και 120 μοίρες.

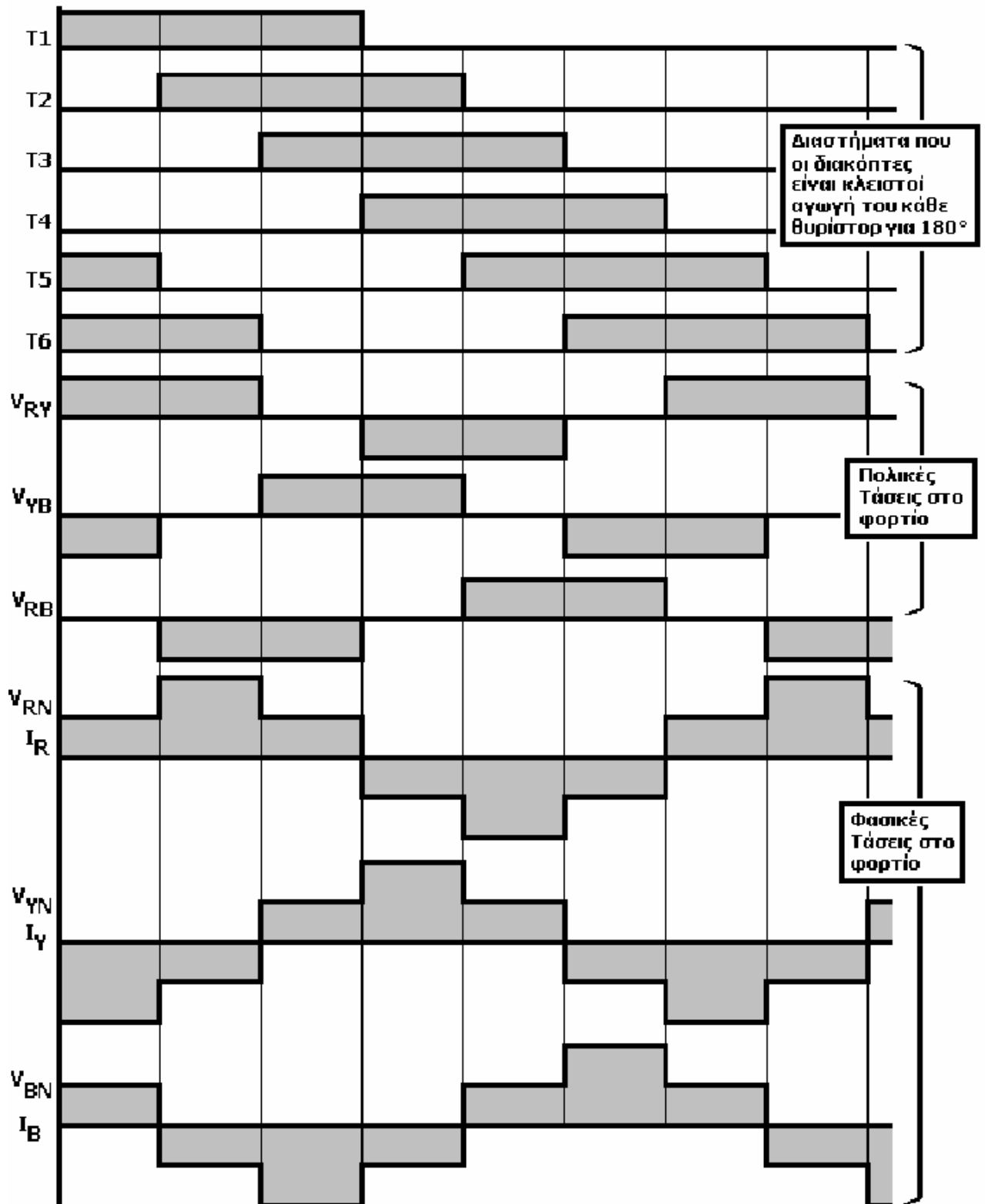
ΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΘΥΡΙΣΤΟΡ ΓΙΑ 180°.

Στην περίπτωση αυτή τρία θυρίστωρ είναι αναμμένα σε κάθε χρονική στιγμή. Όταν το θυρίστωρ T1 πυροδοτείται, το άκρο R είναι συνδεδεμένο στο θετικό άκρο της DC πηγής εισόδου. Όταν το θυρίστωρ T4 πυροδοτείται τότε το άκρο R οδηγείται στο αρνητικό άκρο της DC πηγής. Υπάρχουν έξι φάσεις λειτουργίας για κύκλο στην έξοδο διάταξης και κάθε μία από αυτές διαρκεί 60 μοίρες.



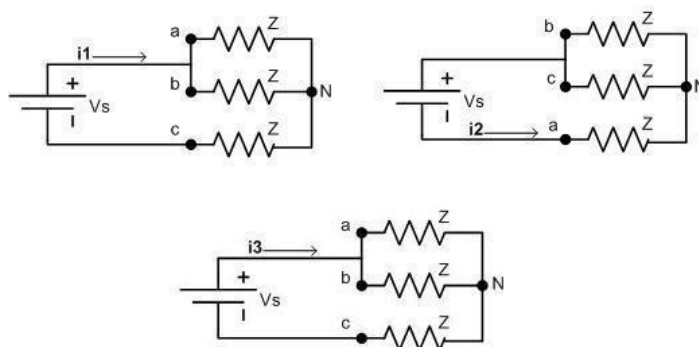
Εικόνα 3.11 Λειτουργία τριφασικού αντιστροφέα σε αγωγή του θυρίστορ για 180°.

Τα θυρίστορ αριθμούνται σύμφωνα με τον ρυθμό πυροδότησης(123, 234, 345, 561, 612). Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα διαστήματα που άγουν τα θυρίστορς μετατοπισμένα το ένα ως προς το άλλο κατά 60 μοίρες καθώς οι κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων στο φορτίο το οποίο είναι ωμικό σε συνδεσμολογία αστέρα. Για συνδεσμολογία φορτίου σε τρίγωνο τα φασικά ρεύματα μπορούν να υπολογισθούν κατευθείαν από τις αντίστοιχες πολικές τάσεις και στην συνέχεια να υπολογιστούν τα ρεύματα των γραμμών.



Εικόνα 3.12 κυματομορφές φασικών και πολικών τάσεων στο φορτίο τριφασικού inverter αποτελούμενου από τρεις μονοφασικούς inverters μισής γέφυρας με διόδους ελεύθερης ροής και φορτίο σε συνδεσμολογία αστέρα. Η διάρκεια αγωγής του κάθε διακόπτη είναι 180° .

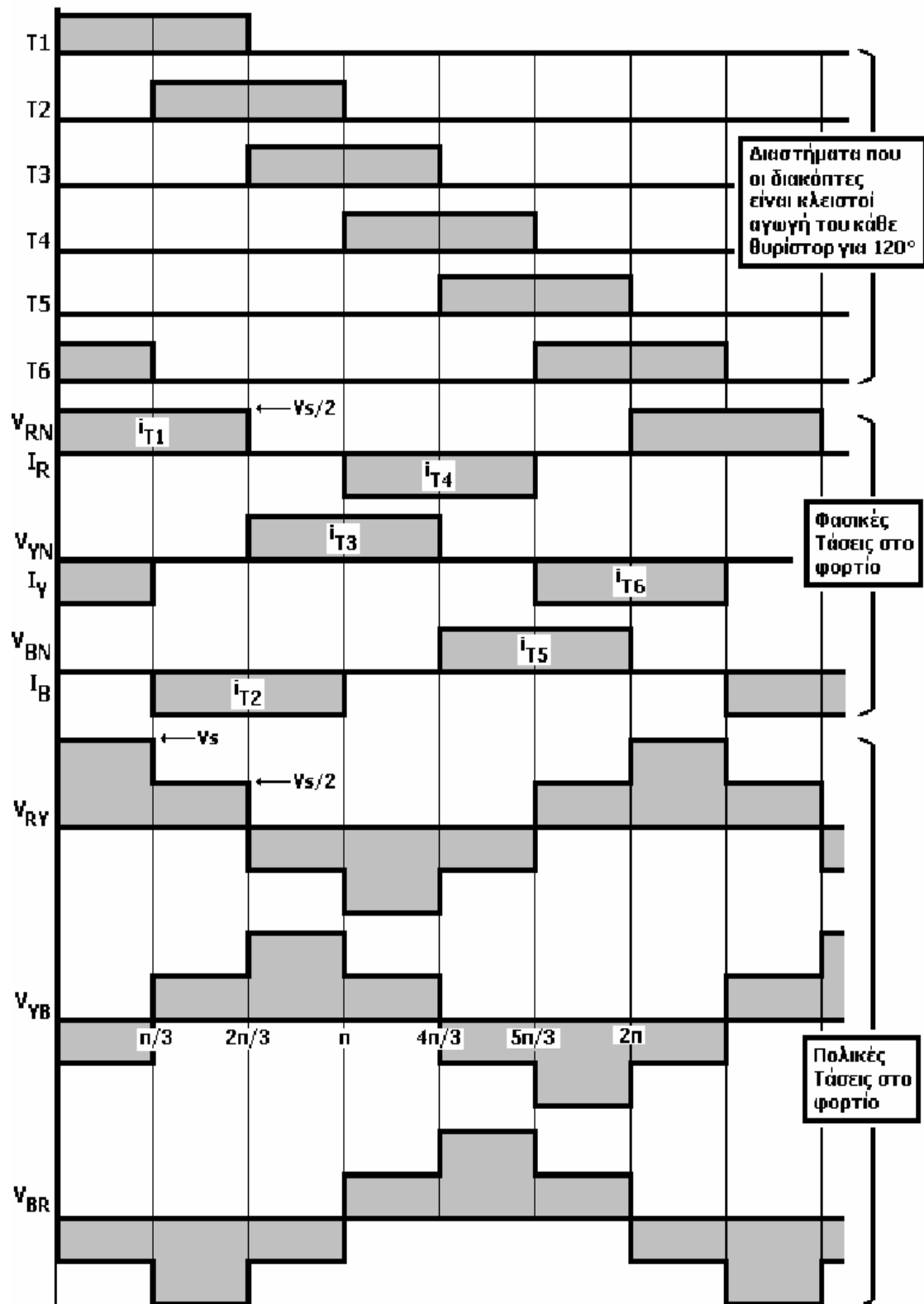
Για συνδεσμολογία φορτίου σε αστέρα πρέπει πρώτα να υπολογιστούν οι τάσεις γραμμής-ουδετέρου(φασικές) και στην συνέχεια να υπολογίσουμε τα ρεύματα. Υπάρχουν έξι φάσεις λειτουργίας για κάθε κύκλο και τα ισοδύναμα κυκλώματα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα για συνδεσμολογία φορτίου σε αστέρα:



Εικόνα 3.13 ισοδύναμα κυκλώματα για συνδεσμολογία φορτίου σε αστέρα.

ΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΚΑΘΕ ΘΥΡΙΣΤΟΡ ΓΙΑ 120°.

Στην περίπτωση αυτή δύο thyristors είναι αναμμένα σε κάθε χρονική στιγμή. Όταν το thyristor T1 πυροδοτείται, το άκρο R είναι συνδεδεμένο στο θετικό άκρο της DC πηγής εισόδου, ενώ όταν πυροδοτείται το thyristor T4, τότε το άκρο R οδηγείται στο αρνητικό άκρο της DC πηγής. Υπάρχουν έξι φάσεις λειτουργίας για ένα κύκλο στην έξοδο της διάταξης και κάθε μία από αυτές διαρκεί 60 μοίρες όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 3.14 κυματομορφές φασικών και πολικών τάσεων στο φορτίο τριφασικού inverter αποτελούμενου από τρεις μονοφασικούς inverters μισής γέφυρας με διόδους ελεύθερης ροής και φορτίο σε συνδεσμολογία αστέρα. Η διάρκεια αγωγής του κάθε διακόπτη είναι 120 μοίρες.

Τα θυρίστορς αριθμούνται σύμφωνα με την σειρά πυροδότησης (16, 21, 32, 43, 54, 65) και στο παραπάνω σχήμα φαίνονται τα διαστήματα που άγουν τα θυρίστορς μετατοπισμένα το ένα προς το άλλο κατά 60 μοίρες και οι κυματομορφές τάσεων και ρευμάτων στο φορτίο το οποίο είναι ωμικό συνδεδεμένο σε αστέρα.

3.3.1 ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΩΡΟΥ

Μέχρι τώρα εξετάσθηκαν κυρίως οι κυματομορφές των τάσεων του τριφασικού αντιστροφέα συναρτήσει του χρόνου. Είναι όμως χρήσιμο να εξετασθούν για έναν τριφασικό αντιστροφέα και τα διανύσματα χώρου της τριφασικής τάσεως. Αυτά τα διανύσματα χώρου μπορούν να περιγράψουν τις συμπεριφορές των τριφασικών μηχανών όταν αυτές τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ισχύ μέσω αντιστροφέων για την ηλεκτρική κίνηση.

Σ' ένα συμμετρικό τριφασικό φορτίο, το οποίο είναι συνδεδεμένο σε τρίγωνο ή σε αστέρα χωρίς γη, μπορεί η τριφασική τάση να μετασχηματιστεί σε διφασική, δηλαδή να μετασχηματιστεί από τριφασικό σύστημα σε διφασικό. Έτσι μπορούμε να έχουμε ένα ορθογώνιο σύστημα χρησιμοποιώντας σαν σύστημα αναφοράς τους άξονες α, β και επομένως να παρατηρούμε τις τάσεις U_{uv} , U_{uw} , U_{vw} του αντιστροφέα με το διάνυσμα χώρου u σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$u = \begin{bmatrix} Va \\ V\beta \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 2/3 & 1/3 \\ 0 & \sqrt{3}/3 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} U_{uv} \\ U_{vw} \end{bmatrix}$$

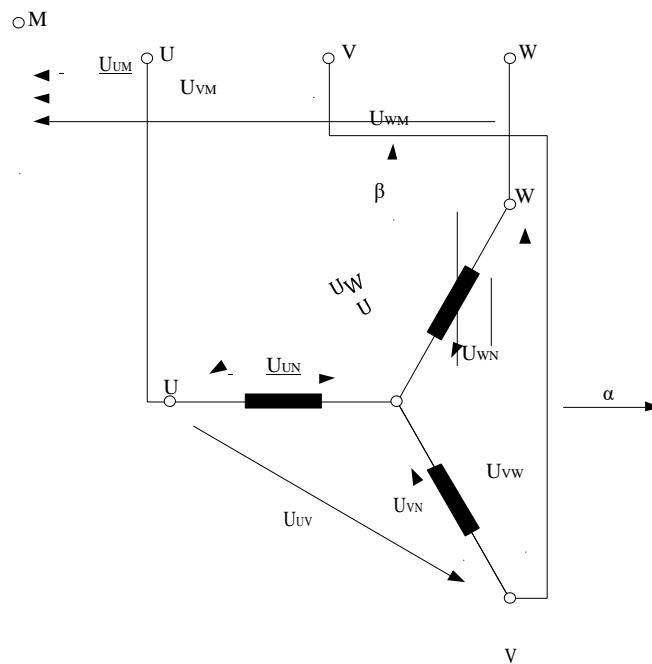
$$u = \begin{bmatrix} Va \\ V\beta \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} U_{uv} \\ U_{uw} \\ U_{vw} \end{bmatrix}$$

Κατά το μετασχηματισμό αυτό θεωρούμε ότι οι ωμικές αντιστάσεις και οι επαγωγικές αντιδράσεις (σε αναγόμενα μεγέθη) δεν μεταβάλλονται. Για τον υπολογισμό ισχύος όταν γίνεται αυτός ο μετασχηματισμός πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο συντελεστής

$$3/2 (P_{\text{UNW}}=3/2 P_{\alpha\beta}).$$

Στο σχήμα α φαίνεται ένα τριφασικό συμμετρικό φορτίο (τόσο από άποψη τιμής όσο και γωνίας) το οποίο θεωρούμε ότι τροφοδοτείται στους ακροδέκτες του U, V, W με τρεις ημιτονοειδείς συμμετρικές τάσεις. Έτσι το ορθογώνιο σύστημα α, β θα έχουμε ένα διάνυσμα χώρου u το οποίο θα περιστρέφεται με το χρόνο.

Όταν όμως οι τάσεις τροφοδοσίας είναι τρεις συμμετρικές τάσεις αλλά για ορισμένα σταθερά χρονικά διαστήματα μέσα σε μια περίοδο έχουν σταθερές τιμές όπως είναι οι τάσεις εξόδου ενός αντιστροφέα τις οποίες εξετάσαμε, τότε το διάνυσμα χώρου τις τάσεως δεν περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα αλλά παίρνει σταθερές συγκεκριμένες θέσεις στο χώρο. Δηλαδή το διάνυσμα χώρου παίρνει συγκεκριμένες θέσεις ή συγκεκριμένες τιμές τόσο σαν μέτρο όσο και σαν γωνία. Ο αριθμός των θέσεων του διανύσματος της τάσεως μέσα σε μια περίοδο ισούται με τον αριθμό των λειτουργικών καταστάσεων του αντιστροφέα στην ίδια περίοδο. Το μέτρο και η γωνία του διανύσματος εξαρτώνται από την λειτουργική κατάσταση. Σε κάθε καινούργια λειτουργική κατάσταση το διάνυσμα χώρου μετατοπίζεται απότομα στη νέα του θέση τόσο σαν μέτρο όσο και σαν γωνία. Το α, β σύστημα αξόνων είναι έτσι ώστε ο α-άξονας να συμπίπτει με τη διεύθυνση του διανύσματος της φασικής τάσεως u_{UN} (σχήμα 3.16).



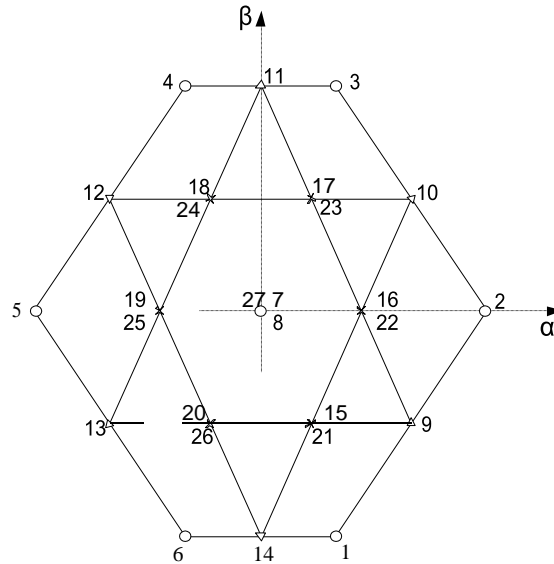
Εικόνα 3.15 Διάγραμμα της φασικής τάσεως u_{UN} .

Για έναν τριφασικό αντιστροφέα δύο σημείων με συμμετρική ρύθμιση, το διάγραμμα χώρου της τάσεως u του σχήματος (3.17) προκύπτουν από τον παρακάτω πίνακα και αριθμούνται από το 1 μέχρι το 6.

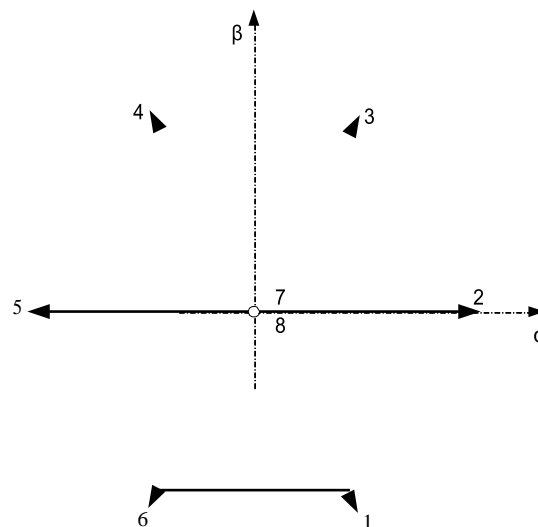
	Λειτουργικές καταστάσεις			u_{UM}/U_d	u_{VM}/U_d	u_{WM}/U_d	u_{UV}/U_d	u_{VM}/U_d	u_{WU}/U_d
1	10	01	10	1/2	-1/2	1/2	1	-1	0
2	10	01	01	1/2	-1/2	-1/2	1	0	-1
3	10	10	10	1/2	1/2	-1/2	0	1	-1
4	01	10	01	-1/2	1/2	-1/2	-1	1	0
5	01	10	10	-1/2	1/2	1/2	-1	0	1
6	01	01	10	-1/2	-1/2	1/2	0	-1	1

Σε μια συμμετρική ρύθμιση υπάρχουν και οι λειτουργικές καταστάσεις 7 και 8 στη διάρκεια των οποίων οι τάσεις εξόδου του αντιστροφέα είναι μηδέν. Στην περίπτωση αυτή έχουμε 8 δυνατές λειτουργικών καταστάσεων όπως προκύπτει και από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος (3.16) και όπως φαίνονται στο διανυσματικό διάγραμμα χώρου του σχήματος (3.17). Στην περίπτωση αντιστροφέων τριών

βαθμίδων οι δυνατές λειτουργικές καταστάσεις είναι 27 όπως φαίνονται και στο διανυσματικό διάγραμμα χώρου του σχήματος (3.16).



Εικόνα 3.16 Διανύσματα χώρου τάσεως αντιστροφεία δύο και τριών βαθμίδων.



Εικόνα 3.17 Διανύσματα χώρου τάσεως αντιστροφεία δύο βαθμίδων.

ο: θέσεις διανύσματος αντιστροφεία δύο σημείων.

Δ: θέσεις διανύσματος αντιστροφεία τριών σημείων σύμφωνα με τον πίνακα.

Χ: θέσεις διανύσματος αντιστροφεία τριών σημείων σύμφωνα με τον πίνακα.

3.4 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΙΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΕΥΡΟΥΣ ΠΑΛΜΟΥ

Η διαμόρφωση εύρους παλμού (pulse-width modulation-PWM) είναι μια διαδικασία στην οποία ρυθμίζεται το εύρος (η διάρκεια) των παλμών μιας παλμοσειρας ανάλογα με το πλάτος ενός μικρού σήματος ελέγχου. Όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος της τάσης ελέγχου, τόσο μεγαλύτερο εύρος έχουν οι παλμοί που παράγονται. Με τη χρήση ενός ημιτονου επιθυμητής συχνότητας στη θέση της τάσης ελέγχου ενός κυκλώματος PWM είναι δυνατή η παραγωγή μιας κύματομορφης ισχύος, της οποίας η μέση τιμή της τάσης μεταβάλλεται ημιτονοειδως και με τρόπο κατάλληλο για την οδήγηση κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος.

Οι καταστάσεις λειτουργίας των IGBT έως IBGT στο κύκλωμα ρυθμίζονται από τους δύο συγκριτες .

Ο συγκριτης (comparator) είναι κάποιο εξάρτημα που συγκρίνει την τάση εισόδου $V_{in}(t)$ με κάποιο σήμα αναφοράς και δίνει παλμό έναυσης η σβέσης στα transistor ανάλογα με το αποτέλεσμα της σύγκρισης.

Για την κατανόηση της λειτουργίας αυτού του κυκλώματος αντιστροφέα PWM εξετάζεται το τι συμβαίνει, όταν εφαρμόζονται διαφορετικές τάσεις ελέγχου σ'αυτό. Ας υποθεθεί αρχικά ότι η τάση ελέγχου είναι 0V. Τότε, οι τάσεις $V_u(t)$ και $V_v(t)$ είναι ακριβώς ίσες και η τάση εξόδου στο φορτίο $V_{load}(t)$ είναι ίση με μηδέν.

Κατόπιν ας υποθεθεί ότι η τάση ελέγχου που εφαρμόζεται στο κύκλωμα είναι σταθερή, θετική και ίση με το μισό με της μέγιστης τάσης αναφοράς. Η τάση εξόδου, που παράγεται τώρα, είναι μια παλμοσειρα με σχετική διάρκεια παλμών 50% .

Ας υποθεθεί, τελικά, ότι η τάση ελέγχου είναι ημιτονοειδης το εύρος της παλμοσειράς που παράγεται, μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με την τάση ελέγχου. Το αποτέλεσμα είναι μια κυματομορφή εξόδου , της οποίας η μέση τάση σε οποιαδήποτε μικρή περιοχή της κυματομορφής είναι ανάλογη της μέσης τάσης του σήματος ελέγχου στην ίδια περιοχή. Η βασική συχνότητα της κυματομορφής εξόδου είναι η ίδια με τη συχνότητα της τάσης ελέγχου. Όπως είναι φυσικό, στην τάση εξόδου υπάρχουν αρμονικές συνιστώσες , που συνήθως δεν αφορούν τις εφαρμογές ελέγχου κινητήρων. Αυτές οι αρμονικές συνιστώσες ίσως προκαλέσουν αύξηση της θερμοκρασίας του κινητήρα που οδηγείται από τον αντιστροφέα αλλά αυτή η αύξηση μπορεί να αντισταθμιστεί με την αγορά ενός

ειδικά σχεδιασμένου κινητήρα ή με τον υποβιβασμό (derating) ενός συμβατικού κινητήρα (με λειτουργία σε ισχύ μικρότερη από την ονομαστική).

Ένας πλήρως τριφασικός αντιστροφέας PWM αποτελείται από τρεις μονοφασικούς αντιστροφής όμοιους μ' αυτόν που περιεγράφηκε παραπάνω, ενώ οι τάσεις ελέγχου του είναι ημίτονα με διάφορα φάσης 120° μεταξύ τους. Ο έλεγχος συχνότητας σ' έναν τέτοιο αντιστροφέα PWM πραγματοποιείται με την μεταβολή στη συχνότητα της τάσης ελέγχου.

Ο αντιστροφέας PWM μεταβαίνει πολλές φορές από την μια κατάσταση στην άλλη κατά τη διάρκεια μιας περιόδου της παραγόμενης τάσης εξόδου. Την εποχή που γράφεται το βιβλίο, στους αντιστροφείς PWM οι τάσεις αναφοράς έφταναν σε συχνότητες μέχρι 12kHz κι έτσι τα διακοπτικά στοιχεία ενός αντιστροφέα πρέπει να αλλάζουν κατάσταση μέχρι τις 2400 στροφές το δευτερόλεπτο. Αυτές οι ταχύτατες αλλαγές καταστάσεων οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι αντιστροφείς PWM απαιτούν ταχύτερα διακοπτικά στοιχεία από τους κοινούς αντιστροφείς πηγών ρεύματος και τάσης. Για να λειτουργούν σωστά οι αντιστροφείς PWM απαιτούν διακοπτικά στοιχεία υψηλής συχνότητας, όπως τα IGBT, τα GTO και ή τα transistor ισχύος. Η τάση ελέγχου που τροφοδοτεί τα κυκλώματα των συγκριτών συχνά υλοποιείται ψηφιακά με την βοήθεια ενός μικροεπεξεργαστή που τοποθετείται σε μια κάρτα στο εσωτερικό της μονάδας ελέγχου του κινητήρα. Η τάση ελέγχου είναι δυνατό να ελέγχεται από τον μικροεπεξεργαστή με κάποιον πιο βελτιωμένο τρόπο από αυτόν που περιγράφηκε παραπάνω. Ο μικροεπεξεργαστής έχει την δυνατότητα να μετατραπεί την τάση ελέγχου, ώστε να πετυχαίνει διαφορετικά επίπεδα συχνότητας και τάσης με οποιονδήποτε επιθυμητό τρόπο. Για παράδειγμα ο μικροεπεξεργαστής αυτός θα μπορούσε να περιλαμβάνει ράμπες μεταβλητής επιτάχυνσης και επιβράδυνσης, περιορισμούς ρευμάτων και καμπύλες τάσης συχνότητας με την απλή μεταβολή κάποιων παραμέτρων στο πρόγραμμα του.

3.5 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ ΩΣ ΔΙΑΚΟΠΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η μέθοδος που προτιμάται στις μέρες για την ρύθμιση της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων είναι διάταξεις οδήγησης μεταβλητής συχνότητας με ηλεκτρονικούς διακοπτες. Η συγκεκριμένη διάταξη είναι πολύ ευέλικτη: η είσοδος της μπορεί να είναι μονοφασική η τριφασική, με συχνότητα 50 η 60Hz και πλάτος από 208 έως 230V. Η έξοδος της διάταξης είναι ένα τριφασικό σύστημα τάσεων με συχνότητα που μεταβάλλεται από 0-120Hz και πλάτος που μεταβάλλεται από 0V έως την ονομαστική τάση του κινητήρα. Η τάση και η συχνότητα εξόδου στην παραπάνω διάταξη ρυθμίζεται με τις τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών, που περιγράφηκαν στο κεφ.3. Στη διαμόρφωση εύρους παλμών τόσο η τάση, όσο και η συχνότητα της εξόδου μεταβάλλονται ανεξάρτητα, μεταξύ τους.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 7.9, συχνά είναι επιθυμητή η γραμμική μεταβολή της ενεργού τιμής της τάσης με ταυτόχρονη μεταβολή της συχνότητας εξόδου.

Ρυθμίζουμε την συχνότητα της τάσης εξόδου στα 60Hz και την ενεργό τιμή της τάσης στα 120V, στη συνέχεια την συχνότητα της τάσης εξόδου στα 30Hz και την ενεργό τιμή της τάσης στα 60V και τέλος την συχνότητα της τάσης εξόδου στα 20Hz και την ενεργό τιμή της τάσης στα 40V. Ας σημειωθεί ότι και στις 3 περιπτώσεις το πλάτος της τάσης στην έξοδο της διάταξης οδήγησης παραμένει σταθερό. Το μέγεθος της ενεργού τιμής της τάσης ρυθμίζεται ανάλογα με το κλάσμα του χρόνου στο οποίο εμφανίζεται τάση στην έξοδο του κινητήρα, ενώ η συχνότητα ρυθμίζεται από τον ρυθμό που μεταβάλλεται η πολικότητα των παλμών από θετική σε αρνητική και αντίστροφα.

Η τυπική συσκευή οδήγησης επαγωγικού κινητήρα, διαθέτει από κατασκευής πολλές ιδιότητες που βελτιώνουν την ικανότητα ρύθμισης και την ευκολία χρήσης. Μερικές από αυτές συνοψίζονται παρακάτω.

Ρύθμιση της συχνότητας (ταχύτητα)

Η συχνότητα εξόδου της διάταξης οδήγησης μπορεί να ελέγχεται χειροκίνητα από ένα

σύστημα ελέγχου τοποθετημένο πάνω στο σασί της διάταξης η να ελέγχεται από απόσταση με κάποιο σήμα ρεύματος η τάσης . Η ικανότητα ρύθμισης της συχνότητας εξόδου μιας διάταξης οδήγησης με κάποιο εξωτερικό σήμα ελέγχου είναι πολύ σημαντική, επειδή επιτρέπει τη χρήση ενός εξωτερικού υπολογιστή η ενός ελεγκτή διαδικασίας για τον έλεγχο της ταχύτητας του κινητήρα σε συνδυασμό με τις συνολικές ανάγκες της βιομηχανικής μονάδας.

Επιλογή της Μορφής της Τάσης και της Συχνότητας

Οι τύποι των μηχανικών φορτίων που εφαρμόζονται σ έναν επαγωγικό κινητήρα παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία. Μερικά φορτία, όπως οι ανεμιστήρες , απαιτούν μικρή ροπή κατά την εκκίνηση που αυξάνεται με το τετράγωνο της ταχύτητας. Κάποια άλλα φορτία μπορεί να είναι πιο δύσκολα στην εκκίνηση τους και να απαιτούν μεγαλύτερη ροπή από την ονομαστική υπο πλήρες φορτίο για να αρχίσουν να κινούνται. Η συγκεκριμένη συσκευή οδήγησης παράγει μεγάλη ποικιλία καμπυλών τάσης - συχνότητας , από τις οποίες μπορεί να επιλέγει η πιο κατάλληλη, με σκοπό η ροπή του κινητήρα να ανταποκρίνεται στην απαιτούμενη ροπή του φορτιού.

Η καμπύλη τάσης – συχνότητας που χρησιμοποιείται για φορτία με υψηλή ροπή εκκίνησης δείχνει πως η τάση μεταβάλλεται γραμμικά με τη συχνότητα για ταχύτητες μικρότερες από την βασικό αλλά η κλίση της καμπύλης είναι μικρότερη για συχνότητες μικρότερες από 30hz. Για κάθε δεδομένη συχνότητα η τάση εξόδου της διάταξης θα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τάση της προηγούμενης μεθόδου. Αυτή η αύξηση της τάσης προσφέρει μεγαλύτερες ροπές με μειονέκτημα αυξημένου μαγνητικού κορεσμού και αυξημένου ρεύματος μαγνήτισης. Όμως , ο αυξημένος μαγνητικός κορεσμός και τα μεγάλα ρεύματα μαγνήτισης είναι αποδεκτά για τις μικρές χρονικές περιόδους που διαρκεί η εκκίνηση των ισχυρών φορτίων.

Η καμπύλη τάσης - συχνότητας χρησιμοποιείται για φορτία με μικρές ροπές εκκίνησης τα οποία ονομάζονται φορτία ομαλής εκκίνησης . Σ' αυτή τη μέθοδο η τάση μεταβάλλεται παραβολικά με τη συχνότητα για ταχύτητες μικρότερες από τη βασική. Για κάθε δεδομένη συχνότητας κάτω από τα 60hz η τάση εξόδου της συσκευής θα είναι μικρότερη από την αντίστοιχη τάση τα βασικής μεθόδου. Αυτή η μειωμένη τάση παράγει μικρότερη ροπή και προφέρει αργή και ομαλή εκκίνηση για φορτία χαμηλής

φορτία.

Ανεξάρτητα Ρυθμιζόμενες Επιταχύνσεις και Επιβραδύνσεις

Όταν η ταχύτητα του κινητήρα θα πρέπει να μεταβληθεί , η συσκευή οδήγησης που τον ελέγχει θα πρέπει να μεταβάλλει τη συχνότητα της, ώστε η ταχύτητα να πάρει τη νέα τιμή της. Αν η μεταβολή της ταχύτητας είναι ξαφνική

η συσκευή οδήγησης δεν προσπαθεί να μεταβάλλει στιγμιαία την ταχύτητα από τη προηγούμενη επιθυμητή τιμή στη νέα επιθυμητή τιμή. Αντίθετά , οι ρυθμοί της επιτάχυνσης η της επιβράδυνσης του κινητήρα περιορίζονται σε κάποιο επίπεδο ασφάλειας με τη βοήθεια ειδικών κυκλωμάτων που περιλαμβάνονται στα ηλεκτρονικά της συσκευής οδήγησης.

Προστασία κινητήρα

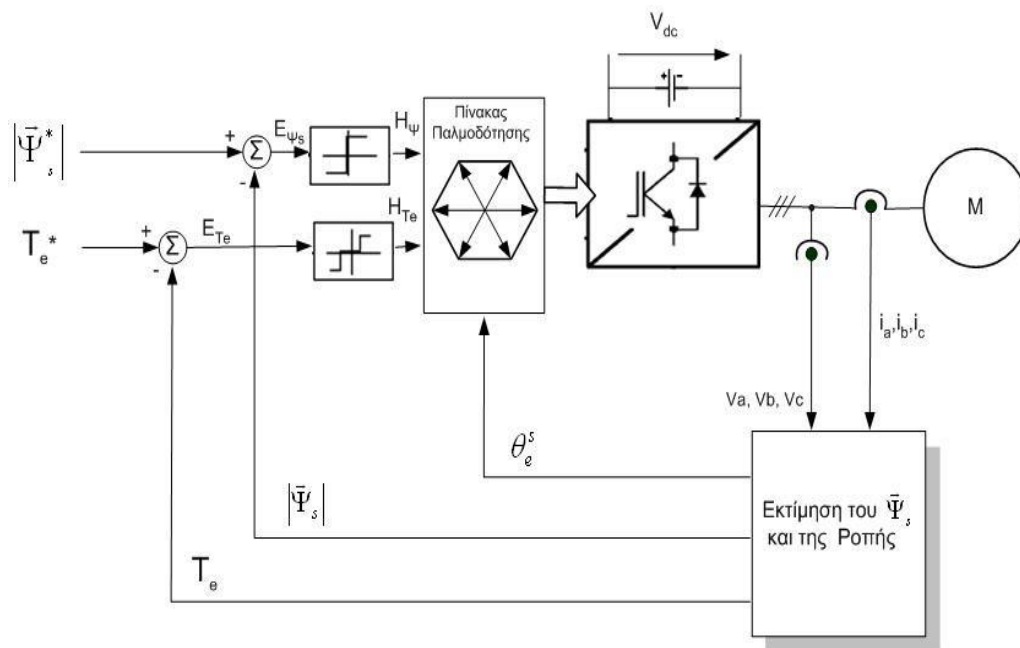
Η συσκευή οδήγησης του επαγωγικού κινητήρα περιλαμβάνει ποικίλες ιδιότητες που έχουν σκοπό την προστασία του κινητήρα που συνδέεται στη συσκευή οδήγησης. Η συσκευή μπορεί να ανιχνεύσει ισχυρά μόνιμα ρεύματα , ισχυρά στιγμιαία , κασιδιάσεις υπερτάσεων και καταστάσεις μειωμένης τάσης. Σε καθεμιά από τις προηγούμενες περιπτώσεις η συσκευή οδήγησης διακόπτει τη λειτουργία του κινητήρα.

Συσκευές οδήγησης επαγωγικών κινητήρων όπως οι προηγούμενες είναι τόσο ευέλικτες και αξιόπιστες στις μέρες μας , που οι επαγωγικοί κινητήρες σε πολλές εφαρμογές, όπου απαιτούνται μεγάλου εύρους μεταβολές της ταχύτητας , άρχισαν να αντικαθιστούν τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΣΥΓΧΡΟΝΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΡΟΦΩΝ ΣΤΟΥΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

4.1 ΑΜΕΣΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΟΠΗΣ (DTC/Direct Torque Control)

Το βασικό διάγραμμα της μεθόδου άμεσου ελέγχου ροπής (DTC) ενός επαγωγικού κινητήρα φαίνεται στο σχήμα (5.1).



Εικόνα 5.1 Διάγραμμα άμεσου ελέγχου ροπής (DTC).

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1, από το στάτη του κινητήρα μετράμε τις συνιστώσες v_a , v_b , v_c του διανύσματος της τάσης του στάτη V_s και τις συνιστώσες i_a , i_b , i_c του διανύσματος του ρεύματος του στάτη I_s , οι οποίες φυσικά αναφέρονται στο τριφασικό σύστημα αναφοράς abc. Στη μέθοδο άμεσου ελέγχου ροπής (DTC)

χρησιμοποιούμε το σύστημα αναφοράς αβ, για να εκφράσουμε το μαθηματικό μοντέλο του κινητήρα. Έτσι λοιπόν, από το σύστημα αναφοράς abc στο οποίο γίνονται οι μετρήσεις, πηγαίνουμε στο σύστημα αναφοράς αβ, με τη βοήθεια του μετασχηματισμού Clarke. Κατά συνέπεια οι εξισώσεις του επαγωγικού κινητήρα, εκφρασμένες στο σύστημα αναφοράς αβ, με τις οποίες θα εκτιμάται το διάνυσμα της ροής του στάτη Ψ_s και το μέτρο της ηλεκτρομαγνητικής ροπής T_e του κινητήρα, θα είναι:

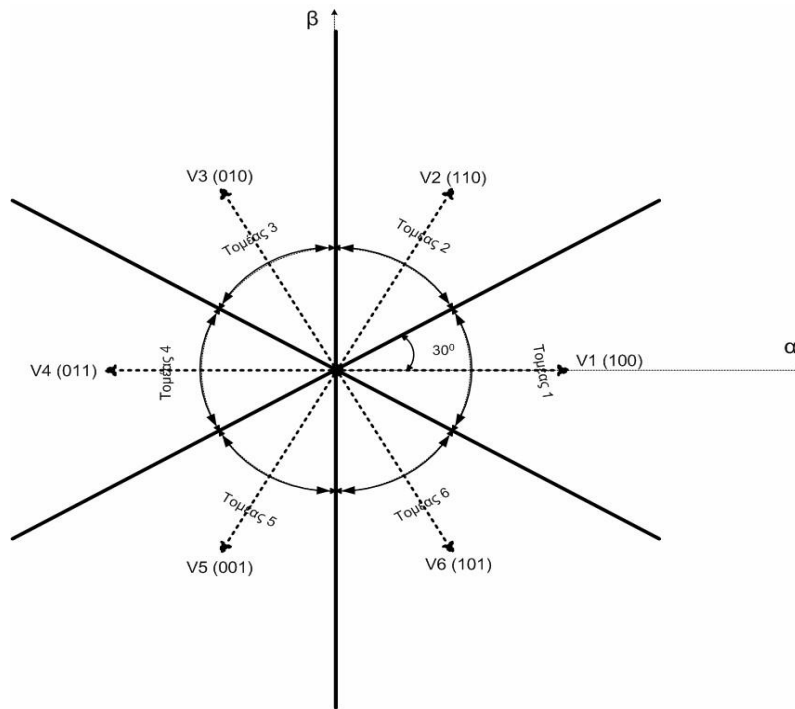
$$\Psi = \int (Vs - Rs * Is) dt \quad \text{ή} \quad \begin{bmatrix} \Psi_{as} \\ \Psi_{bs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \int (V_{as} - R_{sias}) dt \\ \int (V_{bs} - R_{sib_s}) dt \end{bmatrix}$$

$$T_e = \frac{3}{2} * \left(\frac{P}{2}\right) * (\Psi_{as} i_{bs} - \Psi_{bs} i_{as})$$

Όπου P είναι ο αριθμός πόλων του κινητήρα. Η μόνη παράμετρος που πρέπει να γνωρίζουμε για την παραπάνω εκτίμηση είναι η ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη R_s . Το μέτρο ροής του στάτη θα είναι, προφανώς:

$$|\vec{\Psi}_s| = \sqrt{\Psi_{as}^2 + \Psi_{bs}^2}$$

$$\theta^3 = \sin^{-1} \frac{\Psi_{bs}}{|\vec{\Psi}_s|}$$



Εικόνα 5.2 Τομείς του διανύσματος της μαγνητικής ροής του στάτη Ψ_s .

Η θέση του διανύσματος της μαγνητικής ροής του στάτη Ψ_s καθορίζεται με τη γωνία θ_e ως προς τον άξονα a και αντιστοιχεί στη σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ω_e . Για να διευκολυνθούμε στον πίνακα παλμοδότησης, χωρίζουμε την κυκλική διαδρομή της μαγνητικής ροής του στάτη σε έξι ίσα τμήματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2. Επομένως, υπολογίζοντας τη γωνία θ_e μπορούμε να βρούμε σε ποιο τομέα (*sector*) κινείται το διάνυσμα της ροής του στάτη Ψ_s .

Για να κατανοήσουμε τη λειτουργία του μπλοκ του πίνακα παλμοδότησης (σχήμα 5.1), πρέπει να έχουμε υπόψη ότι πρέπει να επιλεγεί ένα κατάλληλο διάνυσμα τάσης το οποίο θα οδηγήσει τον κινητήρα έτσι ώστε να παράγει την επιθυμητή ροπή και ροή.

Η σχέση (5.1) γράφεται:

$$\vec{V}_s = \frac{d}{dt} \vec{\Psi} + R_s$$

Αμελώντας την πτώση τάσης πάνω στην ωμική αντίσταση R_s του στάτη, επειδή αυτή είναι αρκετά μικρή, η (5.4) γράφεται:

$$\vec{V}_s = \frac{d}{dt} \vec{\Psi}$$

ή

$$\Delta \vec{\Psi}_s = \vec{V}_s \Delta t$$

Από την εξίσωση (5.5) μπορούμε εύκολα να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι το διάνυσμα της μαγνητικής ροής του στάτη Ψ_s μπορεί να μεταβάλλεται σταδιακά, με τη σταδιακή εφαρμογή κατάλληλου διανύσματος τάσης V_s από τον αντιστροφέα.

Τα παραπάνω συνδέονται άμεσα και με την ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα. Η διανυσματική έκφραση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής είναι (από σχέση 5.2):

$$Te = \frac{3}{2} * \left(\frac{\rho}{2}\right) * \vec{\Psi}_s * I_s \quad (5.6)$$

--

Επίσης οι διανυσματικές εκφράσεις των μαγνητικών ροών του στάτη και του δρομέα είναι:

$$\Psi_s = L_s I_s + L_m I_r \quad (5.7)$$

$$\vec{\Psi}_r = L_r \vec{I}_r + L_m \vec{I}_s \quad (5.8)$$

Επομένως, αν απαλείψουμε το I_s από την εξίσωση (5.2) με την βοήθεια των (5.7) και (5.8) θα έχουμε την παρακάτω έκφραση για την ηλεκτρομαγνητική ροπή:

$$Te = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2}\right) \frac{L_m}{L_r L_s} |\Psi_s| |\Psi_r| \sin \delta \psi \quad (5.9)$$

Εάν παρατηρήσουμε την (5.9), θα δούμε ότι είναι ίδια με την γενική σχέση της μεθόδου ελέγχου του PWM αντιστροφέα. Όπου, $L_s = L_s L_r - L_m^2$ και η $\delta\psi$ η γωνία μεταξύ των διανυσμάτων των μαγνητικών ροών Ψ_s και Ψ_r . Είναι προφανές από την παραπάνω εξίσωση ότι αν τα μέτρα των μαγνητικών ροών του στάτη και του δρομέα διατηρηθούν σταθερά, η ροπή του κινητήρα μπορεί να ρυθμιστεί αλλάζοντας μόνο την γωνία $\delta\psi$. Η γωνία $\delta\psi$ να αλλάξει άμεσα αλλά μπορεί να μεταβληθεί έμμεσα αλλάζοντας απότομα την γωνία του διανύσματος της μαγνητικής ροής του στάτη, όπως αναλύσαμε και στην προηγούμενη παράγραφο, εφαρμόζοντας ένα κατάλληλο διάνυσμα τάσης στον στάτη.

Αυτό γίνεται διότι, η σταθερά χρόνου του διανύσματος της ροής του στάτη είναι πολύ πιο γρήγορη από τη σταθερά χρόνου του διανύσματος της ροής του δρομέα. Μ' αυτό τον τρόπο ένα η γωνία του διανύσματος της μαγνητικής ροής του στάτη αλλάζει γρήγορα, η γωνία του διανύσματος της ροής του δρομέα θα αργοπορήσει να αλλάξει και έτσι το αποτέλεσμα είναι να μεταβληθεί η μεταξύ τους γωνία $\delta\psi$, δηλαδή η ροπή T_e . Επομένως, εάν $\Delta\delta\psi$ είναι η μεταβολή στη γωνία $\delta\psi$ τότε η μεταβολή στη ροπή ΔT_e θα είναι:

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \frac{L_m}{L_r L_s} |\vec{\Psi}_s| |\vec{\Psi}_r + \Delta\vec{\Psi}_s| \sin \Delta\delta\psi$$

Έχοντας υπόψη το διάγραμμα ελέγχου του σχήματος 5.1 η στρατηγική ελέγχου φαίνεται στα σχήματα 5.3 και 5.4. Οι εντολές των επιθυμητών τιμών της ροής του στάτη Ψ_s και της ροπής του κινητήρα T_e συγκρίνονται με τις εκτιμώμενες τιμές και οι αποκλίσεις τους $E\psi$ και $E T_e$ (σφάλματα) επεξεργάζονται μέσω ειδικών ρελαί, που δεν είναι τίποτα άλλο από ελεγκτές δύο και τριών σημείων, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1. Ο ελεγκτής του βρόγχου της ροής του στάτη έχει δυο επίπεδα εξόδου $H\psi$ σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$H\psi = 1 \text{ για } E\psi > +HB\psi$$

$$H_{te} = 1 \text{ για } E_{te} > +HB_{te}$$

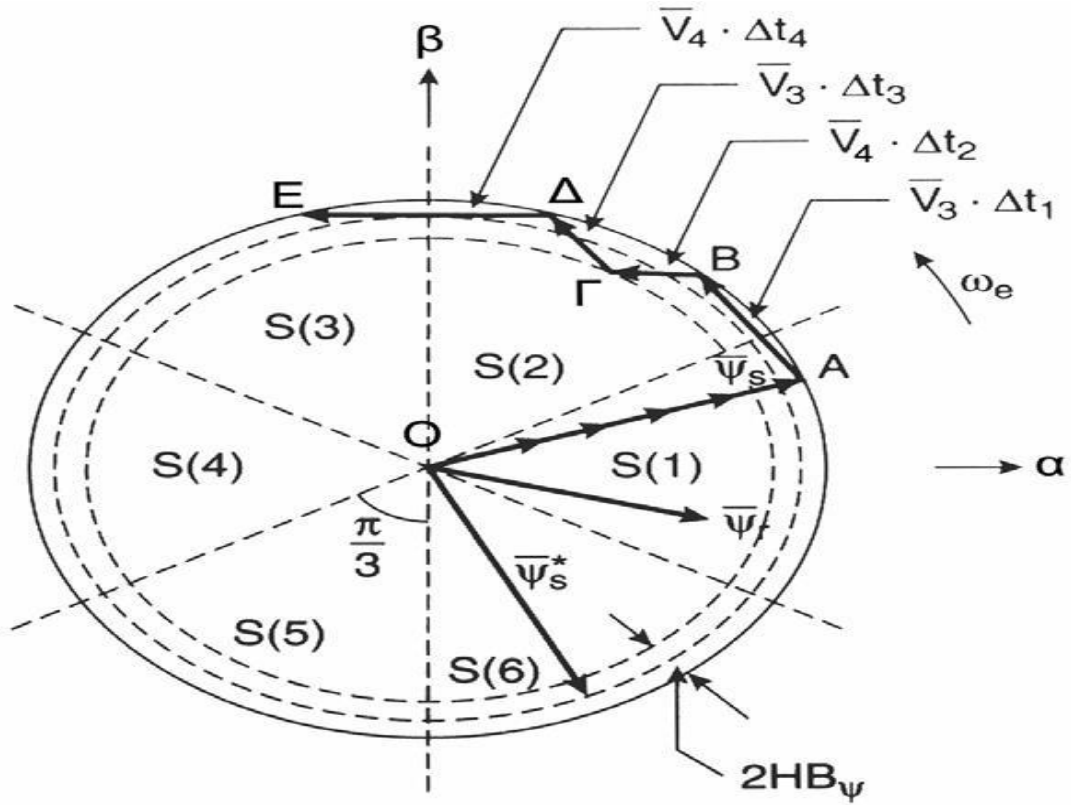
Όπου $2HB_{\psi}$ = συνολικό διάστημα ανοχής του ελεγκτή του μέτρου της ροής του στάτη. Το διάνυσμα της ροής του στάτη κινείται μέσα στα όρια αυτής της ανοχής, όπως φαίνεται στο *σχήμα 3.6*. Το εκτιμώμενο διάνυσμα της ροής του στάτη Ψ_s περιορίζεται μέσα στην καθορισμένη ανοχή και παρακολουθεί το επιθυμητό διάνυσμα Ψ_s .

Ο ελεγκτής του βρόγχου της ροπής έχει τρία επίπεδα εξόδου H_{te} σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

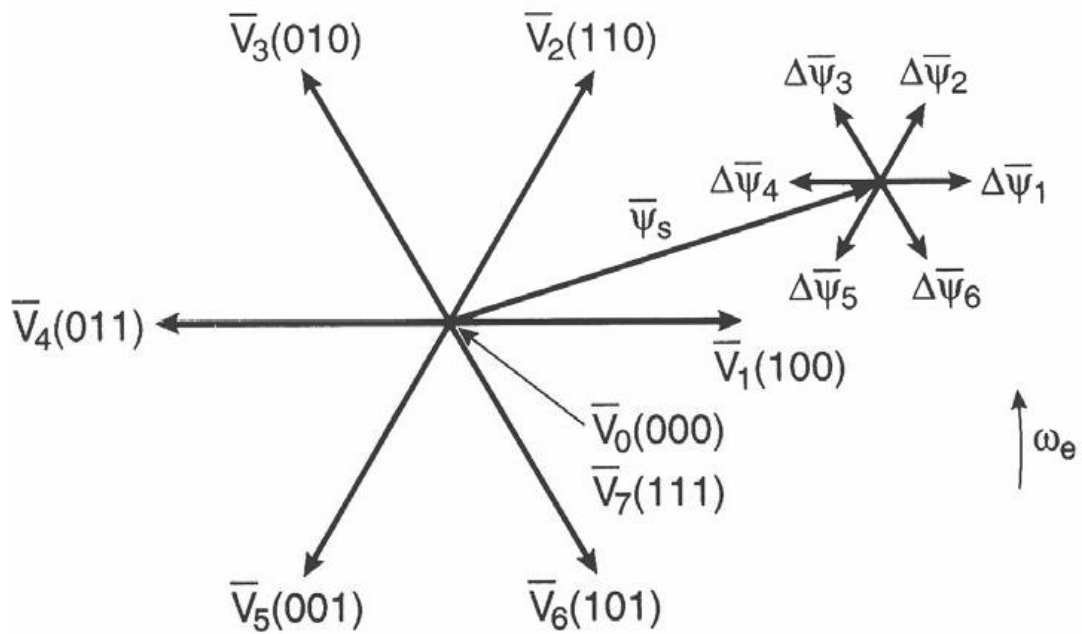
$$H_{te} = -1 \text{ για } E_{te} < -HB_{te}$$

$$H_{te} = 0 \text{ για } -HB_{te} \leq E_{te} \leq HB_{te}$$

$$H_{\varphi} = -1 \text{ για } E_{\varphi} < -HB_{\varphi}$$



Εικόνα 5.3 Μετακίνηση του διανύσματος της ροής του στάτη ως αποτέλεσμα της σταδιακής εφαρμογής των διανυσμάτων τάσης του αντιστροφέα.



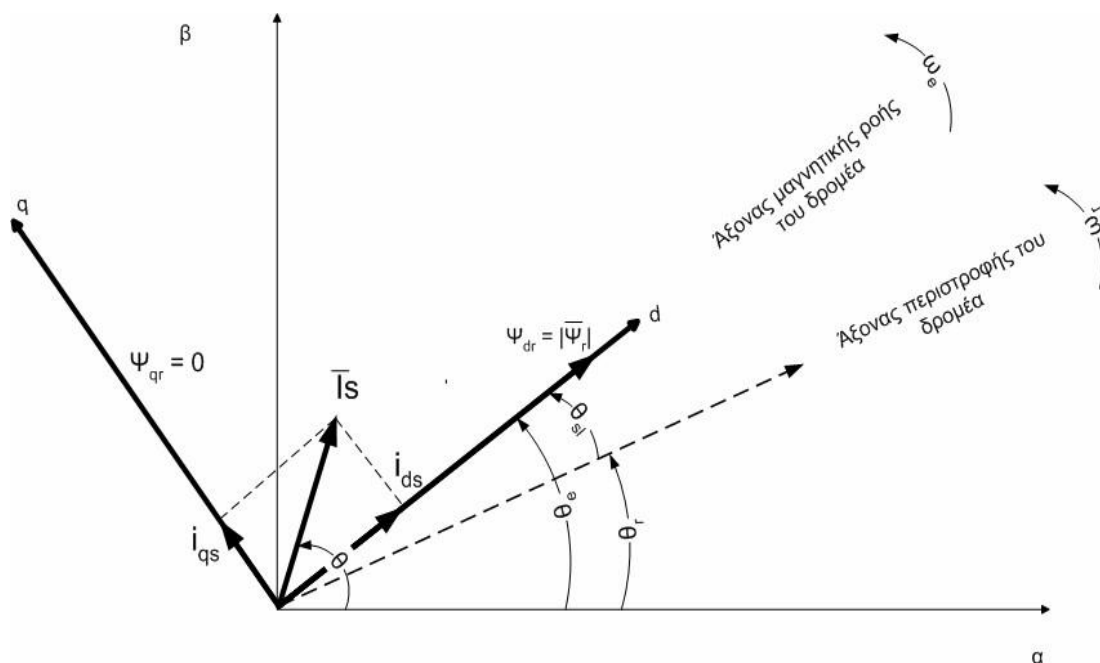
Εικόνα 5.4 Διανύσματα τάσης του αντιστροφέα και οι αντίστοιχες μεταβολές της ροής του στάτη για κάθε διάνυσμα τάσης εφαρμοζόμενο για χρόνο Δt .

4.2 ΕΜΜΕΣΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ (FOC/Field Oriented Control)

Για την ανάλυση των εξισώσεων του επαγωγικού κινητήρα, στην περίπτωση του έμμεσου διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό της ροής του δρομέα, χρησιμοποιούμε το σύγχρονα περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς dq . Το διάγραμμα των διανυσμάτων φαίνεται στο *σχήμα 5.5* και το διάγραμμα ελέγχου στο *σχήμα 3.9*. Το σύγχρονα περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω_e ως προς το σταθερό σύστημα αναφοράς $\alpha\beta$.

Προφανώς ισχύει ότι:

$$\Omega_e = \Omega_r + \Omega_{s1}$$



Εικόνα 5.5 Προσανατολισμός της ροής του δρομέα στο σύγχρονα περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς dq .

Με βάση τις εξισώσεις του μαθηματικού μοντέλου του επαγωγικού κινητήρα με βραχυκυκλωμένο δρομέα, εκφρασμένες στο σύγχρονα περιστρεφόμενο σύστημα

αναφοράς dq, θα είναι ($v_{dr}=0$, $v_{qr}=0$):

Επίσης,

$$\frac{d}{dt} \Psi_{dr} + R_r * I_{dr} - (\Omega_e - \Omega_r) \Psi_{qr} = 0 \quad (5.15)$$

$$\frac{d}{dt} \Psi_{qr} + R_r I_{qr} - (\Omega_e - \Omega_r) \Psi_{dr} = 0 \quad (5.16)$$

Από τις εξισώσεις (5.13) και (5.14), προκύπτει:

$$I_{dr} = \frac{1}{L_r} \Psi_{dr} - \frac{L_m}{L_r} I_{ds} \quad (5.17)$$

$$I_{dr} = \frac{1}{L_r} \Psi_{dr} - \frac{L_m}{L_r} I_{ds} \quad (5.18)$$

Τα ρεύματα του δρομέα στις σχέσεις (5.13) και (5.14) δεν είναι προσβάσιμα προς μέτρηση στην πράξη. Έτσι μπορούμε να τα απαλείψουμε λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (5.17) και (5.18).

Όπου $\omega_{sl} = \omega_e - \omega_r$, η ταχύτητα ολίσθησης.

Η συνιστώσα Ψ_{qr} του διανύσματος Ψ_r στο σύστημα αναφοράς dq, σύμφωνα με τον διανυσματικό διάγραμμα του σχήματος (5.5), θα είναι:

$$\Psi_{qr} = 0 \quad (5.21)$$

Αυτό επειδή το διάνυσμα της μαγνητικής ροής του δρομέα Ψ_r συμπίπτει με τον άξονα d, οπότε η συνιστώσα Ψ_{qr} θα είναι μηδέν. Επίσης:

$$\frac{d}{dt} \Psi_{qr} = 0 \quad (5.22)$$

Με λίγα λόγια, το μέτρο της ροής του δρομέα Ψ_r είναι στην διεύθυνση του άξονα d, δηλαδή $\Psi_{dr} = |\vec{\Psi}_r|$. Επομένως με την βοήθεια των παραπάνω συνθηκών, από τις σχέσεις (5.19) και (5.20), μπορούμε να υπολογίσουμε το μέτρο της ροής του δρομέα Ψ_r και την ταχύτητα ολίσθησης ω_{sl} αντίστοιχα ,ως εξής:

$$\frac{Lr}{Rr} \frac{d}{dt} |\vec{\Psi}_r| + |\vec{\Psi}_r| = LmI_{ds} \quad (5.23)$$

H

$$\Psi_{dr} = |\vec{\Psi}_r| = \frac{LmI_{ds}}{1 + \frac{Lr * s}{Rr}} \quad (5.24)$$

Όπου s ο συντελεστής Laplace και,

$$\omega_{sl} = \frac{Lm}{|\overline{\Psi_r}|} \frac{Rr}{Lr} I_{qs} \quad (5.25)$$

Η συνιστώσα του ρεύματος του στάτη που ελέγχει την ροή του πεδίου του δρομέα Ψ_r είναι η i_{ds} , όπως φαίνεται από την σχέση (5.23). Επειδή θέλουμε η ροή του δρομέα να έχει σταθερό μέτρο από την σχέση (5.23) μπορούμε να υπολογίσουμε το επιθυμητό ρεύμα του στάτη i_{ds} :

$$i_{ds} = \frac{|\overline{\Psi_r}|}{Lm} \quad (5.26)$$

Επίσης, η μαθηματική έκφραση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής του κινητήρα, στο dq σύστημα αναφοράς, χρησιμοποιώντας τις συνιστώσες της ροής του δρομέα, στο dq, είναι:

$$Te = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) (\Psi_{qr} I_{dr} - \Psi_{dr} I_{qr}) \quad (5.27)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την συνθήκη (5.21), την σχέση (5.18) και (5.26), η (5.27) μπορεί να γραφεί ως εξής

- - -

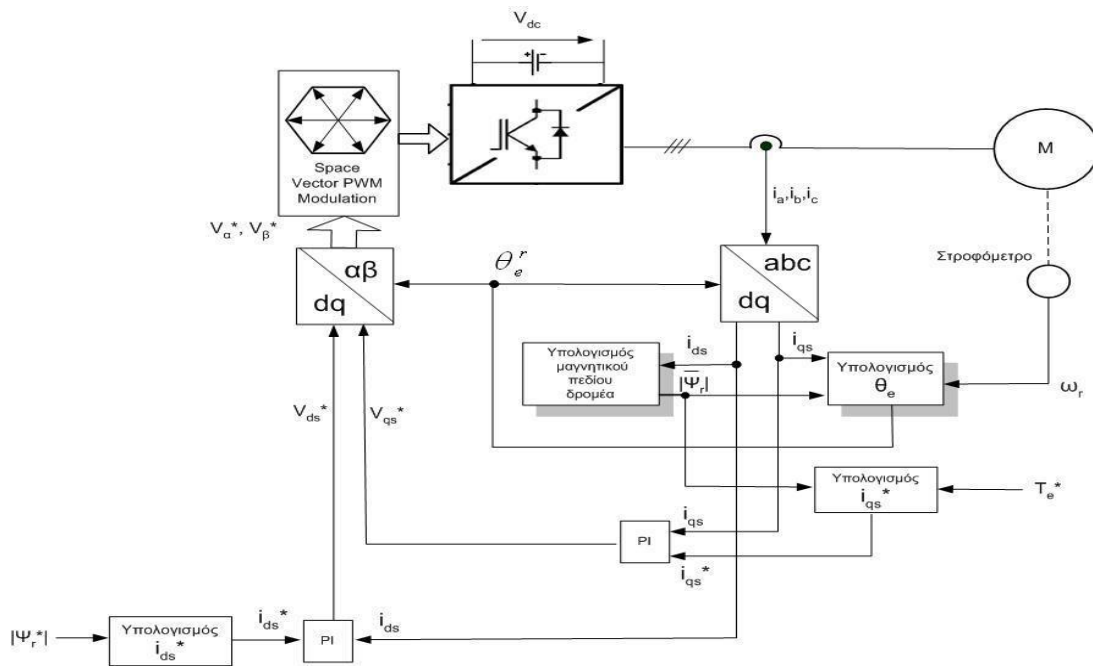
$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \frac{L_m}{L_r} \Psi_{dr} I_{qs} \quad (5.28)$$

Επομένως, για να παράγει ο κινητήρας την επιθυμητή τιμή της ροπής T_e^* , πρέπει να έχει ένα ρεύμα ίσο με:

$$I_{qs} = \frac{2}{3} \frac{2}{P} \frac{L_r}{L_m} \frac{T_e}{|\Psi_r^*|} \quad (5.29)$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω ένα συνηθισμένο διάγραμμα ελέγχου του επαγωγικού κινητήρα θα ήταν όπως αυτό του σχήματος 5.6. Το μπλοκ «Υπολογισμός του πεδίου του δρομέα» υλοποιεί την σχέση (5.24). Το μπλοκ «Υπολογισμός θε» υλοποιεί τη σχέση (5.12) με τη βοήθεια της σχέσης (5.25), λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους της μηχανής L_m , L_r , R_r . Όμοια, τα μπλοκ που υπολογίζουν τα i_d^* και i_{qs}^* και είναι η υλοποίηση των σχέσεων (5.26) και (5.29), αντίστοιχα. Τα i_d , i_{ds} , i_{qs} υπολογίζονται από τα μετρούμενα ρεύματα i_a , i_b , i_c , τα οποία μετασχηματίζονται από το σύστημα abc στο dq με τη βοήθεια του μετασχηματισμού Park.

Αυτό που πρέπει να προσέξουμε σ' αυτό τον έλεγχο είναι η παλμοδότηση του αντιστροφέα πηγής τάσης, η οποία γίνεται με τη μέθοδο διανυσματικής διαμόρφωσης. Σκοπός είναι να υπολογίσουμε το επιθυμητό διάνυσμα τάσης V_{ref} καθώς και τη γωνία περιστροφής του. Αυτό το επιτυγχάνουμε υπολογίζοντας τις συνιστώσες του στο σύστημα $\alpha\beta$. Γνωρίζοντας τα ρεύματα i_{ds}^* , i_{ds} και i_{qs}^* , i_{qs} με τη χρήση ρυθμιστών PI μπορούμε να υπολογίσουμε τις συνιστώσες v_{ds} και v_{qs} στο σύστημα dq .



Εικόνα 5.6 Μπλοκ διάγραμμα έμμεσου ελέγχου επαγωγικού κινητήρα με προσανατολισμό της ροής του δρομέα και παλμοδότηση με SVPWM.

Στην συνέχεια, όπως φαίνεται και στο μπλοκ διάγραμμα του σχήματος (5.6), με την βοήθεια του μετασχηματισμού park πηγαίνουμε στο σύστημα αβ. Τότε:

$$V_{REF} = Va + jvb$$

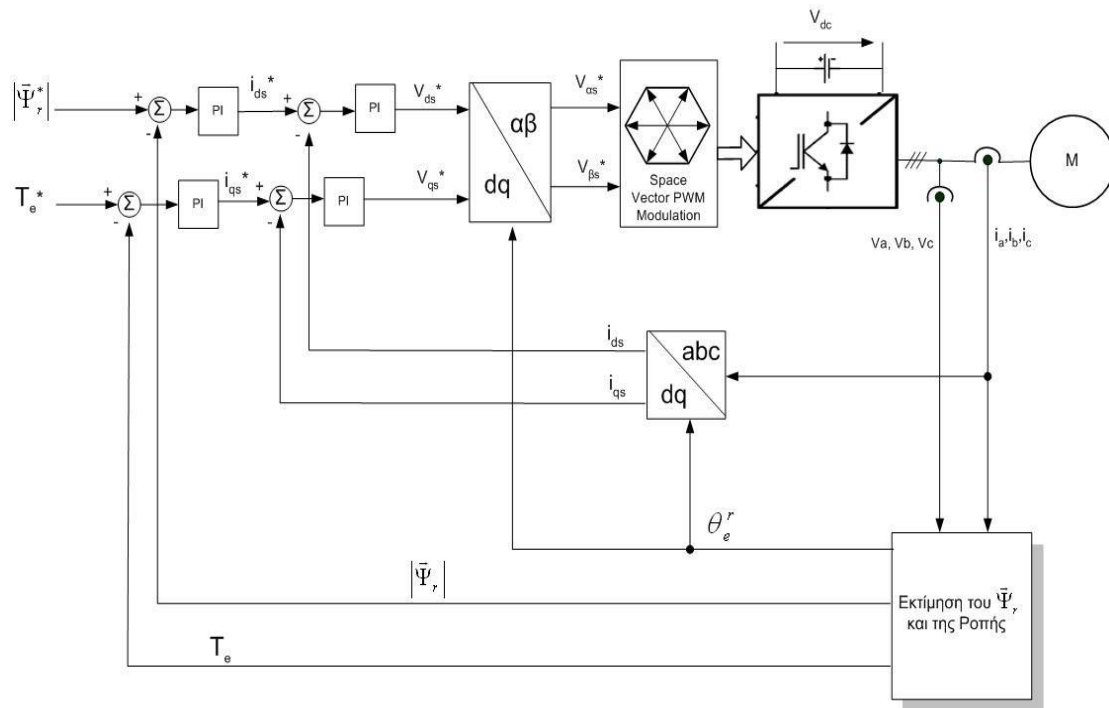
$$|\vec{V}_{ref}| = \sqrt{Va^2 + V\beta^2}$$

$$\gamma = \arg \begin{pmatrix} v_\beta \\ v_a \end{pmatrix}$$

Αφού γνωρίζουμε το επιθυμητό διάνυσμα τάσης V_{ref} και τη γωνία του, εύκολα μπορούμε να εφαρμόσουμε την μέθοδο διανυσματικής διαμόρφωσης ώστε να δώσουμε τους κατάλληλους παλμούς οδήγησης στον αντιστροφέα.

4.3 ΑΜΕΣΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ (DFOC)

Ο DFOC έλεγχος δεν διαφέρει σε ουσιαστικά σημεία από τον FOC. Η μόνη διαφορά είναι ότι η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής θ_e υπολογίζεται από τις εξισώσεις του μαθηματικού μοντέλου του επαγωγικού κινητήρα, όπως στον DTC έλεγχο. Αυτό γίνεται για να αποφύγουμε τη χρήση αισθητήρα στον άξονα του δρομέα (sensorless) και φυσικά να είναι δυνατό να κάνουμε μία σύγκριση του DFOC με τον DTC έλεγχο, αφού ο DTC έλεγχος είναι από τη φύση του sensorless έλεγχος.



Εικόνα 5.7 Μπλοκ διάγραμμα άμεσου ελέγχου επαγωγικού κινητήρα με προσανατολισμό της ροής του δρομέα και παλμοδότηση με SVPWM.

Στο σχήμα (5.7) , το μπλοκ «Εκτίμηση ροής και ροπής», η εκτίμηση της ροπής και της γωνίας θ_e γίνεται όπως και στον DTC έλεγχο, δηλαδή με τη χρήση των εξισώσεων (5.2) και (5.3). Για την εκτίμηση της ροής του δρομέα χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις:

$$|\vec{\Psi}_R| = \sqrt{\Psi_{ar}^2 + \Psi_{br}^2} \quad (5.30)$$

$$\Psi_{ar} = \frac{Lr}{Lm} (\Psi_{\alpha s} - \sigma Ls I_{\alpha s}) \quad (5.31)$$

$$\Psi_{br} = \frac{Lr}{Lm} (\Psi_{\beta s} - \sigma Ls I_{\beta s}) \quad (5.32)$$

Όπου, $\sigma = 1 - L_m^2 / L_r L_s$.

Στον DFOC έλεγχο οι επιθυμητές τιμές της ροής του δρομέα και της ροπής συγκρίνονται άμεσα με τις πραγματικές εκτιμώμενες τιμές και τα σφάλματά τους οδηγούνται στη συνέχεια σε PI ελεγκτές. Αυτοί οι PI ελεγκτές δίνουν τις επιθυμητές τιμές των συνιστωσών του ρεύματος i_{ds} και i_{qs} , οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη ρύθμιση της ροής και της ροπής αντίστοιχα. Στη συνέχεια, αυτές οι επιθυμητές συνιστώσες, θα συγκριθούν με τις πραγματικές τιμές των συνιστωσών του ρεύματος και τα σφάλματά τους θα οδηγηθούν σε νέους PI ελεγκτές.

Οι νέοι PI ελεγκτές, θα δώσουν τελικά το επιθυμητό διάνυσμα τάσης στο σύστημα αναφοράς dq που θα έχει συνιστώσες v_{ds} και v_{qs} . Όπως περιγράφηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, στη συνέχεια πηγαίνουμε από το dq σύστημα αναφοράς στο αβ με τη βοήθεια του μετασχηματισμού Park. Τέλος, ο αντιστροφείας παράγει αυτό το επιθυμητό διάνυσμα με τη μέθοδο SpACe Vector Modulation.

Ως αυτό το σημείο είδαμε πως, για τον έλεγχο κλειστού βρόχου των στροφών του κινητήρα, χρειάζεται η μέτρηση ή εκτίμηση των πραγματικών στροφών του άξονα του κινητήρα (σχήμα 6.1). Έτσι λοιπόν, γνωρίζοντας τον πραγματικό αριθμό στροφών μπορούμε να δώσουμε εντολή στον οδηγό του κινητήρα να κινηθεί σε έναν επιθυμητό αριθμό στροφών ω_r^* . Στη συνέχεια, ο ελεγκτής στροφών, έχοντας υπόψη το σφάλμα $\omega_r^* - \omega_r$, αναλαμβάνει να δώσει την επιθυμητή τιμή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής T_e^* .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ “AC DRIVES” ΑΠΟ ΚΑΤΑΛΟΓΟ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ (LOW VOLTAGE AC DRIVES ABB)

<https://new.abb.com/drives/low-voltage-ac>

Χαμηλή τάση τροφοδοσίας πίνακα είναι ένα εξάρτημα του ηλεκτρικού συστήματος διανομής που χωρίζει μια ηλεκτρική τροφοδοσία σε κυκλώματα, παρέχοντας ασφάλεια προστασίας ή ασφαλειοδιακόπτη για κάθε κύκλωμα σε ένα κοινό περίβλημα. Παρακάτω βλέπουμε έναν πίνακα ελέγχου ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσω Bluetooth την εφαρμογή του οποίου μπορούμε να κατεβάσουμε από το Google Play ή το App Store.

Το cold configuration adaptor παρέχει μια σειριακή διασύνδεση για ρεύμα AC5580. Με αυτόν τον προσαρμογέα η ασφάλεια και η απομόνωση των δυο σειριακής επικοινωνίας και ελέγχου είναι εφικτή. Τροφοδοτείται από θύρα usb μέσω του υπολογιστή.

Ο neta-21 είναι πρόγραμμα απομακρυσμένης παρακολούθησης και παρέχει την δυνατότητα πρόσβασης στον δίσκο μέσω του internet ή στο τοπικό ethernet.

Control panel options

- D1 Assistant control panel is included as standard.
- D2 Optional Bluetooth panel. USB connection as standard.
- D3 By using the CDPI-01 panel adapter, the assistant control panel is able to manage up to 32 drives.

Assistant control panel

Set up the drive using the assistant control panel delivered as standard with all ACS580 drives. There is no need to know any drive parameters, as the control panel helps to set up the essential settings quickly and get the drive into action.

- Drive setup with the primary settings menu including embedded assistants
- Process monitoring with one glance at the control panel's editable home view showing you the status of the drive and process
- Drive maintenance with the help function providing context-sensitive guidance and troubleshooting instructions
- Drive diagnostics under the diagnostics menu informing the user of the root cause.

Bluetooth panel

The optional Bluetooth panel enables connection with the Drivetune mobile app. The app is available for free on the Google Play and the Apple App store.

Some of the Drivetune features are: commissioning, troubleshooting, monitoring and controlling the drive. Drivetune also has full parameter access.



Control panel options

Assistant control panel ACS-AP-S is included as standard in the delivery. ACS-AP-S (+J400) can be replaced by +J options below.

Option code	Description	Type designation
+J400	Assistant control panel (+J400 option automatically included)	ACS-AP-S
+J425	Industrial Assistant control panel*	ACS-AP-I
+J429	Control panel with Bluetooth interface*	ACS-AP-W
+J404	Basic control panel	ACS-BP-S
+J424	Blank control panel cover (no control panel delivered)	CDUM-01
3AXD5000004419	Panel bus adapter	CDPI-01
3AUA0000108878	Control panel mounting platform (flush mounted, requires also panel bus adapter on the drive)	DPMP-01
3AXD5000009374	Control panel mounting platform (surface mounted, requires also panel bus adapter on the drive)	DPMP-02
3AXD50000016230	Control panel mounting platform option, only for ACS580-04 modules	DPMP-03
3AXD50000010763	Door mounting kit for the panel (for one drive, contains both DPMP-02 and CDPI-01)	DPMP-EXT

* Also compatible with ACS880 drives

Additional options

04 Cold configuration adapter CCA-01
—
05 Remote monitoring tool NETA-21
—
06 Drive composer PC tool

Safe configuration for unpowered drives

The CCA-01 cold configuration adapter provides a serial communication interface for unpowered ACS580 drives. With the adapter, safety isolation of both serial communication and control board power supply is possible. The power supply is taken from a PC USB port.

Remote monitoring access worldwide

The NETA-21 remote monitoring tool gives easy access to the drive via the Internet or local Ethernet network. NETA-21 comes with a built-in web server. Compatible with standard web browsers, it ensures easy access to a web-based user interface. Through the web interface, the user can configure drive parameters, and monitor drive log data, load levels, runtime, energy consumption, I/O data and bearing temperatures of the motor connected to the drive.

PC tools

The Drive composer PC tool offers fast and harmonized setup, commissioning and monitoring for all-compatible drives. The free version of the tool provides startup and maintenance capabilities and gathers all drive information, such as parameter loggers, faults, backups and lists, into a support diagnostics file. Drive composer pro provides additional features such as custom parameter windows, graphical control diagrams of the drive's configuration, and improved monitoring and diagnostics.



Ordering code	Description	Type designation
3AXD5000019865	Cold configurator adapter, packed kit	CCA-01

Remote monitoring option

Ordering code	Description	Type designation
3AUA000094517	2 x panel bus interface 2 x 32 = max. 64 drives 2 x Ethernet interface SD memory card USB port for WLAN/3G	NETA-21

Connectivity options

07 ACS580 is compatible with many fieldbus protocols

08 Input/output extension modules

Fieldbus adapter modules

The ACS580 general purpose drives are compatible with a wide range of fieldbus protocols. The drive comes with Modbus RTU fieldbus interface as standard. Fieldbus communication reduces wiring costs when compared to traditional hardwired input/output connections.



Fieldbus adapters

Option code	Fieldbus protocol	Adapter
+K451	DeviceNet™	FDNA-01
+K454	PROFIBUS DP, DPV0/DPV1	FPBA-01
+K457	CANopen®	FCAN-01
+K458	Modbus RTU	FSCA-01
+K462	ControlNet	FCNA-01
+K469	EtherCAT®	FECA-01
+K470	POWERLINK	FEPL-02
+K473	EtherNet/IP™, Modbus TCP, PROFINET IO	FENA-11
+K475	Two port EtherNet/IP™, Modbus TCP, PROFINET IO	FENA-21

Input/output extension modules

Standard input and output can be extended by using optional analog and digital input/output extension modules. The modules are easily installed in the extension slots located on the drive.



I/O options

Option code	Description	Type designation
+L501	External 24 V AC and DC 2 x RO and 1 x DO	CMOD-01
+L523	External 24 V and isolated PTC interface	CMOD-02
+L512	115/230 V digital input 6 x DI and 2 x RO	CHDI-01
+L537	ATEX certified PTC interface and external 24V	CPTC-02

Cooling and fuses

Cooling

ACS580 drives are fitted with variable-speed cooling air fans. The cooling air must be free from corrosive materials and not exceed the maximum ambient temperature of 40 °C for frames R1 to R9 (50 °C with derating). The speed-controlled fans cool the drive only when needed, which reduces overall noise level and energy consumption.

Fuse connections

Standard fuses can be used with ABB general purpose drives. For input fuses, see the table below.

Wall-mounted drives, ACS580-01

Cooling air flow and recommended input protection fuses for 380 to 415 V units										
Type designation	Frame size	Cooling air flow 380 to 415 V units					Recommended input protection fuses for 380 to 415 V units***			
		Heat dissipation*		Air flow		Max. noise level**	IEC fuses		UL fuses	
		W	BTU/Hr	m ³ /h	ft ³ /min		A	Fuse type	A	Fuse type
ACS580-01-02A7-4	R1	45	155	34	20	56	4	gG	6	UL Class T
ACS580-01-03A4-4	R1	55	187	34	20	56	6	gG	6	UL Class T
ACS580-01-04A1-4	R1	66	224	34	20	56	6	gG	6	UL Class T
ACS580-01-05A7-4	R1	84	288	34	20	56	10	gG	10	UL Class T
ACS580-01-07A3-4	R1	106	362	50	29	55	10	gG	10	UL Class T
ACS580-01-09A5-4	R1	133	454	50	29	55	16	gG	15	UL Class T
ACS580-01-12A7-4	R1	174	593	50	29	55	16	gG	15	UL Class T
ACS580-01-018A-4	R2	228	777	128	75	66	25	gG	20	UL Class T
ACS580-01-026A-4	R2	322	1100	128	75	66	32	gG	30	UL Class T
ACS580-01-033A-4	R3	430	1469	116	68	71	40	gG	35	UL Class T
ACS580-01-039A-4	R3	525	1791	116	68	71	50	gG	45	UL Class T
ACS580-01-046A-4	R3	619	2114	116	68	71	63	gG	50	UL Class T
ACS580-01-062A-4	R4	1153	3938	280	165	69	80	gG	80	UL Class T
ACS580-01-073A-4	R4	1153	3938	280	165	69	100	gG	90	UL Class T
ACS580-01-088A-4	R5	1156	3948	280	165	62	100	gG	110	UL Class T
ACS580-01-106A-4	R5	1331	4546	435	256	67	125	gG	150	UL Class T
ACS580-01-145A-4	R6	1476	5041	435	256	67	160	gG	200	UL Class T
ACS580-01-169A-4	R7	1976	6748	450	265	67	250	gG	225	UL Class T
ACS580-01-206A-4	R7	2346	8012	550	324	67	315	gG	300	UL Class T
ACS580-01-246A-4	R8	3336	11393	550	324	65	355	gG	350	UL Class T
ACS580-01-293A-4	R8	3936	13442	1150	677	65	425	gG	400	UL Class T
ACS580-01-363A-4	R9	4836	16516	1150	677	68	500	gG	500	UL Class T
ACS580-01-430A-4	R9	6036	20614	1150	677	68	700	gG	600	UL Class T

* Heat dissipation value is a reference for cabinet thermal design.
 ** The maximum noise level at full fan speed. When the drive is not operating at full load and at maximum ambient temperature the noise level is lower.
 *** For detailed fuse sizes and types, please see the ACS580 HW manuals, document codes: 3AXD5000018826 and 3AXD5000015497.

Drive modules, ACS580-04

Cooling air flow and recommended input protection fuses for 380 to 415 V units

Type designation	Frame size	Cooling air flow 380 to 415 V units					Recommended input protection fuses for 380 to 415 V units***			
		Heat dissipation*		Air flow		Max. noise level**	IEC fuses		UL fuses	
		W	BTU/Hr	m3/h	ft3/min	dBa	A	Fuse type	A	Fuse type
ACS580-04-505A-4	R10	5600	19132	1200	707	72	***	***	***	***
ACS580-04-585A-4	R10	6400	21888	1200	707	72	***	***	***	***
ACS580-04-650A-4	R10	8100	27738	1200	707	72	***	***	***	***
ACS580-04-725A-4	R11	8700	29931	1200	707	72	***	***	***	***
ACS580-04-820A-4	R11	9800	33680	1200	707	72	***	***	***	***
ACS580-04-880A-4	R11	10500	36126	1420	848	72	***	***	***	***

* Heat dissipation value is a reference for cabinet thermal design.

** The maximum noise level at full fan speed. When the drive is not operating at full load and at maximum ambient temperature the noise level is lower.

*** For detailed fuse sizes and types, please see the ACS580 HW manuals, document codes: 3AXD50000018826 and 3AXD50000015497.

Cabinet-built drives, ACS580-07

Cooling air flow and recommended input protection fuses for 380 to 415 V units

Type designation	Frame size	Cooling air flow 380 to 415 V units					Recommended input protection fuses for 380 to 415 V units***			
		Heat dissipation*		Air flow		Max. noise level**	IEC fuses		UL fuses	
		W	BTU/Hr	m3/h	ft3/min	dBa	A	Fuse type	A	Fuse type
ACS580-07-0145A-4	R6	1827	1801	685	982	67	250	170M3816D	250	DFJ-250
ACS580-07-0169A-4	R7	2335	2317	700	1004	67	250	170M3816D	300	DFJ-300
ACS580-07-0206A-4	R7	2738	2716	700	1004	67	315	170M3817D	300	DFJ-300
ACS580-07-0246A-4	R8	3719	3719	800	1147	65	400	170M5408	400	170M5408
ACS580-07-0293A-4	R8	4352	4352	800	1147	65	500	170M5410	500	170M5410
ACS580-07-0363A-4	R9	5321	5314	1400	2007	68	630	170M6410	630	170M6410
ACS580-07-0430A-4	R9	6589	6579	1400	2007	68	700	170M6411	700	170M6411
ACS580-07-495A-4	R10	5602	19132	2950	1837	72	800	170M6412	***	***
ACS580-07-575A-4	R10	6409	21888	2950	1837	72	900	170M6413	***	***
ACS580-07-640A-4	R10	8122	27738	2950	1837	72	1000	170M6414	***	***
ACS580-07-715A-4	R11	8764	29931	2950	1837	72	1250	170M6416	***	***
ACS580-07-810A-4	R11	9862	33680	2950	1837	72	1250	170M6416	***	***
ACS580-07-870A-4	R11	10578	36126	3170	1978	72	1400	170M6417	***	***

* Heat dissipation value is a reference for cabinet thermal design.

** The maximum noise level at full fan speed. When the drive is not operating at full load and at maximum ambient temperature the noise level is lower.

*** For detailed fuse sizes and types, please see the ACS580 HW manuals, document codes: 3AXD50000018826, 3AXD50000015497, 3AXD50000045815 and 3AXD50000032622.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Μαλατέστας Π. και Μανιάς Σ. << Ηλεκτρική Κίνηση >> Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Νοέμβριος 2001.
- [2] Ψωμιάδης Δημήτριος. << Ηλεκτρικές μηχανές Ι και ΙΙ>> Εκδόσεις ΙΩΝ, 2004.
- [3] Mohan, Underland, Robbins. << Ηλεκτρονικά ισχύος>> Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 1996
- [4] Benjamin C. Kuo. << Automatic Control Systems>> Prentice-Hall 1995.
- [5] JACob Millman, Arvin Grabel. << Μικροηλεκτρονική >> Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 1991
- [6] Domenico Casadei, Giovanni Serra and Angelo Tani, “FOC and DTC: Two viable schemes for induction motors torque control”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 17, pp. 779–787, Sept. 2002.
- [7] Bimal K. Bose, <<Modern Power Electronics And AC Drives>>. Prentice Hall 2002.
- [8] S. A. Mir and M. E. Elbuluk, “Precision torque control in inverter-fed induction mACHines using fuzzy logic,” in *Proc. IEEE PESC’95*, 1995, pp. 396–401.
- [9] Στέφανος Ν. Μανιάς. «Ηλεκτρονικά Ισχύος». Εκδόσεις Συμεών 2000.
- [10] Φυντανάκης Δ. Αθανάσιος. «Κατασκευή τριφασικού αντιστροφέα μικρής ισχύος και μεγάλης συχνότητας παλμοδοτούμενος με SVPWM». Διπλωματική εργασία, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Οκτώβριος 2001.
- [11] Ακρίτας Μ. Αναστάσιος. « Μελέτη και κατασκευή τριφασικού αντιστροφέα με στοιχεία IGBT και παλμοδότηση με SVPWM». Διπλωματική εργασία, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Οκτώβριος 2000.
- [12] Stephen J. Chapman Ηλεκτρικές Μηχανές» 4^η έκδοση
- [13] <https://new.abb.com/drives/low-voltage-ac>
- [14] <https://new.abb.com/drives>