

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ

KLIMCZYK DOMINIK

ΠΑΝΑΓΙΩΤΙΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΠΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ 22/10/2014

Copyright © Κλίμτσικ Ντομινίκ, Παναγιωτίδης Γεώργιος, 2014.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τους συγγραφείς και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ενέργεια συναντάται στην φύση με λίγες μορφές. Μία από αυτές είναι η ηλεκτρική, η οποία αντιπροσωπεύει πάνω από το 30% της συνολικά χρησιμοποιούμενης ενέργειας. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας αυτής -περί τα 2/3- χρησιμοποιείται για την μετατροπή της σε μηχανική ενέργεια μέσω ηλεκτροκινητήρων.

Σε μια οικία (απλούστερη εγκατάσταση) βρίσκουν εφαρμογή πολλών ειδών κινητήρες λ.χ. σε ψυγεία, αντλίες, φούρνους, κλιματιστικά, ασανσέρ κλπ. Σαφώς το ποσοστό των ηλεκτροκινητήρων στην βιομηχανία είναι πολλαπλάσιο, ενώ χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα αυτοματισμών για την παρασκευή τελικών προϊόντων.

Υπάρχουν διάφοροι κινητήρες στο εμπόριο, την μερίδα του λέοντος όμως έχουν οι επαγωγικοί κινητήρες, οι οποίοι θα αποτελέσουν το θέμα της παρούσας εργασίας. Τα βασικά τους μειονεκτήματα είναι η δύσκολη ρύθμιση στροφών, η κατανάλωση αέργου ισχύος και τα προβλήματα κατά την εκκίνηση. Η επικράτησή τους όμως στην βιομηχανία τα τελευταία χρόνια έγινε καθώς είναι φτηνοί στην κατασκευή, έχουν εύκολη σύνδεση στο δίκτυο, μηδαμινή ανάγκη για συντήρηση και επισκευή, καθώς και αισθητά μειωμένο βάρος με ανάλογα στιβαρή κατασκευή.

Ραγδαία εξέλιξη σημειώθηκε και στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος, καθώς μέσω μετατροπέων έγινε πιο αποδοτικός ο έλεγχος της ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα. Υπολογίζεται ότι σήμερα περίπου το 25% των επαγωγικών κινητήρων που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία σε ελληνικό έδαφος οδηγούνται μέσω μετατροπέων. Το ποσοστό αυτό αναμένεται να διπλασιαστεί την επόμενη 5ετία. Ωστόσο η χρήση τέτοιων μετατροπέων οδηγεί σε αρμονικές ρεύματος άρα σε μόλυνση του δικτύου και προκαλούνται ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI) στο περιβάλλον.

Ο ψηφιακός έλεγχος των μετατροπέων είναι για την ώρα η τελευταία λέξη της τεχνολογίας. Σύμφωνα όμως με τις νέες εξελίξεις στον τομέα της πληροφορικής και την ανάπτυξη του διαδικτύου των πραγμάτων (internet of the things), δεν αποτελεί σενάριο επιστημονικής φαντασίας το να δούμε αυτόνομους, αυτοδιορθώμενους και ελεγχόμενους μετατροπείς μέσω του διαδικτύου, ήδη μέσα στην επόμενη 10ετία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την δυσκολία και τις διάφορες τεχνικές που αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιούνται κυρίως στην βιομηχανία για την ρύθμιση των στροφών και κατ' επέκτασιν της ροπής των επαγωγικών ασύγχρονων κινητήρων.

Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται συνοπτικά κάποια στοιχεία της φυσικής πάνω στα οποία βασίζεται η λειτουργία και η κατασκευή των επαγωγικών μηχανών. Γίνεται σύντομη αναδρομή στην ιστορική εξέλιξη του επαγωγικού κινητήρα, όπως και στα κατασκευαστικά μέρη από τα οποία αποτελείται. Το κεφάλαιο κλείνει με την ανάλυση της συμπεριφοράς του κινητήρα με την χρήση του ηλεκτρικού ισοδύναμου κυκλώματος, τον υπολογισμό των απωλειών και παρουσιάζονται οι διάφορες κλάσεις των κινητήρων κατά NEMA.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται οι τρόποι που χρησιμοποιήθηκαν για την ρύθμιση των στροφών των επαγωγικών κινητήρων κυρίως στο παρελθόν. Οι τεχνικές αυτές, στην πλειοψηφία τους, είναι παραγκωνισμένες και την θέση τους έχουν πάρει πιο σύγχρονες μέθοδοι ελέγχου των κινητήρων.

Στο τρίτο κατά σειρά κεφάλαιο γίνεται η απαραίτητη εισαγωγική στα ηλεκτρονικά ισχύος, από τα οποία αποτελούνται όλοι οι σύγχρονοι ρυθμιστές στροφών, είτε αυτοί προορίζονται για εναλλασσόμενου ρεύματος κινητήρες είτε για συνεχούς.

Το τέταρτο κεφάλαιο χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος παρουσιάζεται η τεχνική της διαμόρφωσης εύρους παλμού (PWM) για την παραγωγή ημιτονοειδών σημάτων που είναι απαραίτητα για την λειτουργία του κινητήρα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διάταξη και η λειτουργία ενός σύγχρονου ρυθμιστή στροφών, που απευθύνεται σε επαγωγικούς κινητήρες. Τέλος, γίνεται μια μικρή αναφορά στα πλεονεκτήματα, και μειονεκτήματα που εισάγει η χρήση ρυθμιστών στροφών.

Λέξεις κλειδιά: ασύγχρονος επαγωγικός κινητήρας, διαμόρφωση εύρους παλμού (PWM), οδηγός μεταβολής συχνότητας (VFD), οδηγός μεταβολής ταχύτητας (VSD), αντιστροφέας (inverter), αρμονικές ρεύματος

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Κεφάλαιο 1 ^ο Ιστορική εξέλιξη και κατασκευαστικά μέρη μηχανών.....	8
1.1 Ιστορική εξέλιξη επαγωγικού κινητήρα	8
1.2 Κατασκευαστικά μέρη μηχανών.....	10
1.3 Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο	13
1.4 Λειτουργία Επαγωγικού κινητήρα	15
1.5 Ολίσθηση.....	16
1.6 Ηλεκτρικό ισοδύναμο.....	17
1.7 Πειραματικός προσδιορισμός στοιχείων ισοδύναμου κυκλώματος.....	19
Δοκιμή χωρίς φορτίο.....	19
Δοκιμή Συνεχούς Ρεύματος.....	20
Δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα.	21
1.8 Απώλειες επαγωγικού κινητήρα	22
1.9 Ισχύς και Ροπή	24
1.10 Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας	25
1.11 Υπολογισμός Ροπής	26
1.12 Κατηγορίες επαγωγικών κινητήρων.....	28
1.13 Σύστημα ηλεκτρικής κίνησης	30
Κεφάλαιο 2 ^ο Συμβατικοί τρόποι ελέγχου στροφών επαγωγικού κινητήρα	32
2.1 Έλεγχος της ταχύτητας με την μεταβολή των πόλων	33
2.2 Μεταβολή της αντίστασης του δρομέα (περίπτωση δακτυλιοφόρου δρομέα)	37
2.3 Μεταβολή της τάση τροφοδοσίας με σταθερή συχνότητα.....	38
2.4 Ηλεκτρομειωτήρας (Eddy current drive/magnetic clutch).....	39
2.5 Σύστημα/ζεύγος Ward - Leonard.....	40
2.6 Μηχανικοί μειωτήρες και υδραυλικά συστήματα.....	41
2.7 Κινητήρας Schrage	42
Κεφάλαιο 3 ^ο Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος και τους κυκλομετατροπείς	43
3.1 Δίοδος ισχύος.....	43

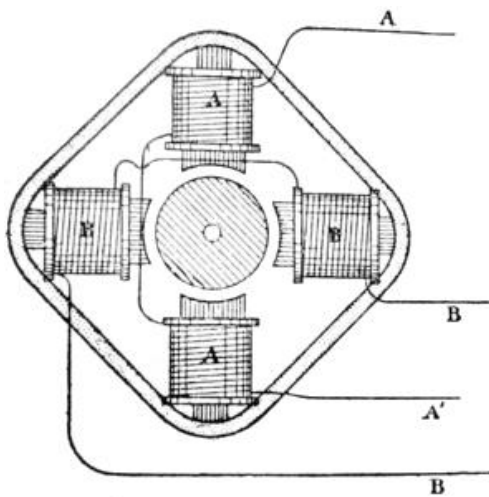
3.2	Θυρίστορ	45
3.3	Τρανζίστορ Ισχύος (Power transistor)	47
	Διπολικό τρανζίστορ επαφής (Bipolar Junction Transistor – BJT)	47
	MOSFET	48
	Διπολικό τρανζίστορ μονωμένης πύλης - IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)	48
	Άλλα ημιαγωγά στοιχεία	49
3.4	ΚΥΚΛΟΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ	50
3.4.1	Κυκλομετατροπείς ελέγχου φάσης (phase-controlled)	51
3.4.2	Λειτουργία τύπου διακοπής και λειτουργία τύπου κυκλικού ρεύματος	57
3.4.3	Μετατροπέας τύπου μήτρας	61
	Κεφάλαιο 4 ^ο Διαμόρφωση εύρους παλμού και λειτουργία «ινβέρτερ»	63
4.1	Αντιστροφέας τετραγωνικής κυματομορφής	63
4.2	Αντιστροφείς τροποποιημένου ημιτόνου	64
4.3	PWM – Διαμόρφωση Εύρους Παλμού	65
	PWM 2 επιπέδων	65
	PWM 3 επιπέδων	67
	PWM 5 ή περισσότερων επιπέδων	69
4.4	Τα μέρη ενός VFD (οδηγού μεταβαλλόμενης ταχύτητας)	72
4.5	Διανυσματικός έλεγχος	74
4.6	Βαθμωτός έλεγχος (έλεγχος V/f)	77
4.7	Διανυσματικός έλεγχος ανοιχτού βρόχου	80
4.8	Διανυσματικός έλεγχος κλειστού βρόχου	81
4.9	Πλεονεκτήματα χρήσης VSD	83
	Εξοικονόμηση ενέργειας	83
	Ευφύστερος και αποδικότερος έλεγχος αυτοματοποιημένων διαδικασιών	83
	Λιγότερη μηχανική καταπόνηση	83
	Βελτίωση συντελεστή ισχύος	84
4.10	Μειονεκτήματα χρήσης VSD	85
	Προβλήματα με ακουστικό θόρυβο,	85
	Προβλήματα υπερθέρμανσης του κινητήρα	85
	Πρόβλημα με αρμονικές στην τροφοδοσία	86
	Προβλήματα λόγω του φαινομένου αντανάκλασης κύματος (reflected wave phenomenon)	87
	Βιβλιογραφία	88

Κεφάλαιο 1^ο Ιστορική εξέλιξη και κατασκευαστικά μέρη μηχανών

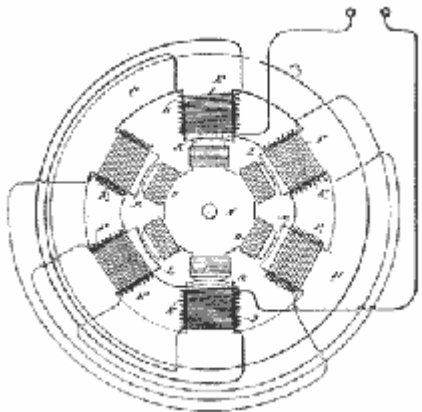
Στο πρώτο κατά σειρά κεφάλαιο θα γίνει μια εισαγωγή στις επαγωγικές μηχανές. Θα παρουσιαστεί ο τρόπος λειτουργίας και κατασκευής τους. Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί το ηλεκτρικό ισοδύναμο της μηχανής το οποίο μας βοηθάει στην κατανόηση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς της μηχανής. Επίσης μελετώνται οι απώλειες της μηχανής και οι λόγοι στους οποίους αυτές οφείλονται, ενώ προς το τέλος παρουσιάζονται τα 3 πειράματα μέσω των οποίων μπορούμε να προσδιορίσουμε τα στοιχεία ενός επαγωγικού κινητήρα. Κλείνοντας γίνεται μια μικρή αναφορά στις κλάσεις των κινητήρων και τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχουν κατά NEMA.

1.1 Ιστορική εξέλιξη επαγωγικού κινητήρα

Η διατύπωση της ύπαρξης στρεφόμενων μαγνητικών πεδίων από τον F. Arago, ο νόμος της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής όπως διατυπώθηκε από τον M. Faraday, και οι περίφημες εξισώσεις του J.C. Maxwell, αποτέλεσαν την βάση για την υλοποίηση και την κατασκευή των επαγωγικών κινητήρων στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Οι πρώτοι που ασχολήθηκαν με την κατασκευή προτοτύπων επαγωγικών κινητήρων ήταν ο G. Ferraris, και σαφώς ο μεγαλύτερος υπέρμαχος του εναλλασσόμενου ρεύματος N. Tesla.

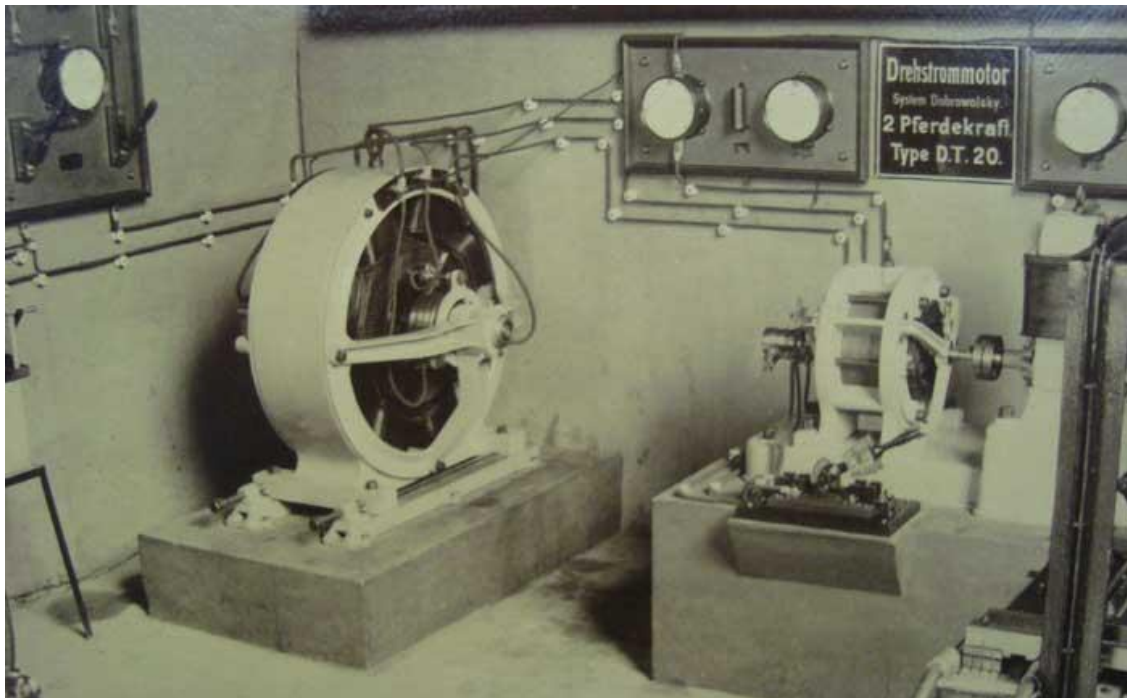


Σχήμα 1.1 Ο επαγωγικός κινητήρας όπως κατασκευάστηκε από τον G. Ferraris



Σχήμα 1.2 Ο επαγωγικός κινητήρας του N. Tesla

Όπως γίνεται αντιληπτό, αμφότεροι οι κινητήρες αποτελούνται από 2 τυλίγματα στον στάτη τα οποία τροφοδοτούνται από εναλλασσόμενη τάση. Έτσι δημιουργείται ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που επάγει τάσεις οι οποίες παράγουν ρεύματα στα τυλίγματα του δρομέα. Η επίδραση αυτών παράγει ροπή και κάνει τον κινητήρα να λειτουργήσει. Εξέλιξη των 2φασικών κινητήρων που αναφέρθηκαν, ήταν ο κινητήρας επαγωγής με τυλιγμένο δρομέα που κατασκεύασε ο Ρώσος εφευρέτης M. Dolivo – Dobronosky. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο ίδιος μάλιστα, πρότεινε το 3φασικό δίκτυο όπως το ξέρουμε στις μέρες μας.



Σχήμα 1.3 Ο νέος επαγωγικός 3φασικός κινητήρας κατασκευής M. Dolivo – Dobronosky

1.2 Κατασκευαστικά μέρη μηχανών

Οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίζονται σε 2 βασικές κατηγορίες, με βάση την κατασκευή και την λειτουργία τους. Τυπικές τις σύγχρονες και τις ασύγχρονες. Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι οι μόνιμες σύγχρονες χρειάζονται ρεύμα στην διέγερση (DC) οι δε ασύγχρονες, γνωστές και σαν επαγωγικές δεν χρειάζονται διέγερση καθώς τα ρεύματα επάγονται στον δρομέα. Αμφότεροι οι τύποι μηχανών μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν γεννήτριες όπως και σαν κινητήρες.

Οι επαγωγικές μηχανές χρησιμοποιούνται πολύ σπάνια σαν γεννήτριες. Ο λόγος έγκειται στο γεγονός ότι αυτού του είδους οι γεννήτριες ενώ είναι αδύνατον να παράγουν άεργο ισχύ, καταναλώνουν κιόλας (άεργο ισχύ). Άμεσο επακόλουθο είναι να χρειάζονται κάποια πηγή άεργου ισχύος συνδεδεμένη μόνιμα. Επειδή η συγκεκριμένη μηχανή δεν έχει διέγερση είναι αδύνατον να ρυθμίσει από μόνη της την τάση στην έξοδο, ρόλος που αναλαμβάνουν οι εξωτερικοί πυκνωτές. Επίσης όταν το φορτίο έχει έντονα επαγωγικό χαρακτήρα, έχουμε μεγάλη πτώση τάσης στην γεννήτρια, γι αυτό είναι πολύ δύσκολο να εκκινήσουμε επαγωγικό κινητήρα από μια ασύγχρονη γεννήτρια. Οι ασύγχρονες γεννήτριες παρόλα τα προβλήματα που έχουν, τον τελευταίο καιρό βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στις ανεμογεννήτριες, καθώς συνδέονται στο δίκτυο και δεν έχει σημασία να έχουμε σταθερές στροφές, αλλά μεγαλύτερη ροπή στον άξονα συνεπάγεται με μεγαλύτερη ισχύ στην έξοδο.

Ένας τυπικός επαγωγικός κινητήρας αποτελείται από τον στάτη (stator) δηλαδή το σταθερό μέρος το οποίο συνδέεται ηλεκτρικά με το δίκτυο. Ο στάτης που έχει την ίδια ακριβώς δομή σε όλες τις μηχανές Ε.Ρ. αποτελείται από δυναμοελάσματα συνήθως πυριτιούχου χάλυβα, μικρού πάχους (0,2-3 mm) που συγκρατούνται με κοχλίες και σχηματίζουν το ζύγωμα της μηχανής. Τα δυναμοελάσματα είναι μονωμένα με βερνίκι μεταξύ τους ένεκα της ανάγκης που δημιουργείται να περιορίσουμε τις απώλειες σιδήρου που προκαλούνται από τα δινορεύματα (Eddy currents). Πάνω στον στάτη υπάρχουν τοποθετημένα μέσα σε αυλάκια τα πολυφασικά τυλίγματα (πηνία). Τα τυλίγματα αυτά, όταν τροφοδοτηθούν από συμμετρική πολυφασική πηγή, δημιουργούν στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο, το οποίο κινείται με την σύγχρονη ταχύτητα.

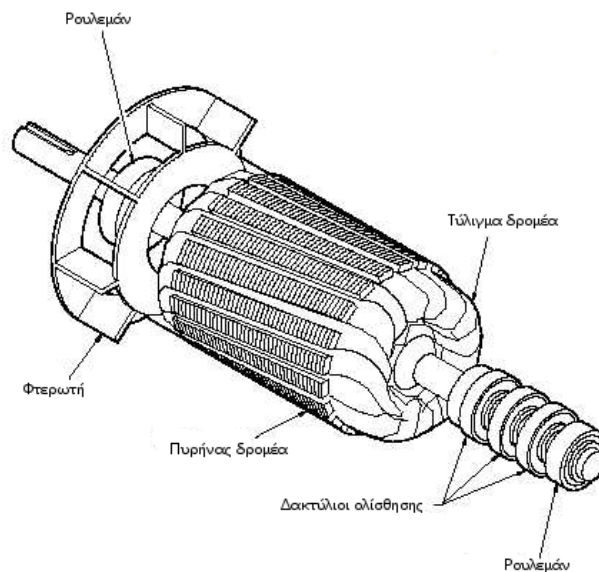
Το στρεφόμενο μέρος μιας μηχανής καλείται δρομέας (rotor). Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο επάγει τάσεις, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την ροή ρευμάτων στα τυλίγματα του δρομέα και την δημιουργία κύματος ΜΕΔ το οποίο στρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα ως προς τον στάτη. Η αλληλεπίδραση των δύο πεδίων, δηλαδή του στάτη και του δρομέα προκαλεί την ροπή της μηχανικής επαγωγής. Στους επαγωγικούς κινητήρες, υπάρχουν δυο τύποι δρομέα :

- Βραχυκυκλωμένου κλωβού, ο οποίος αποτελείται από ράβδους χαλκού, ορείχαλκου ή αλουμινίου οι οποίες είναι βραχυκυκλωμένες στα 2 άκρα με δακτύλιους βραχυκύκλωσης. Αποτελεί σαφώς την απλούστερη μορφή δρομέα που χρησιμοποιείται στις επαγωγικές μηχανές και χρησιμοποιείται περισσότερο στην βιομηχανία.
- Με δακτύλιους (δακτυλιοφόρου δρομέα). Κατασκευάζεται από συμμετρικά τυλίγματα, ώστε αυτά να αποτελούν το κατοπτρικό είδωλο των τυλιγμάτων του στάτη. Χρησιμοποιούνται ψήκτρες (καρβουνάκια) πάνω στους δακτύλιους (slip rings) ώστε να

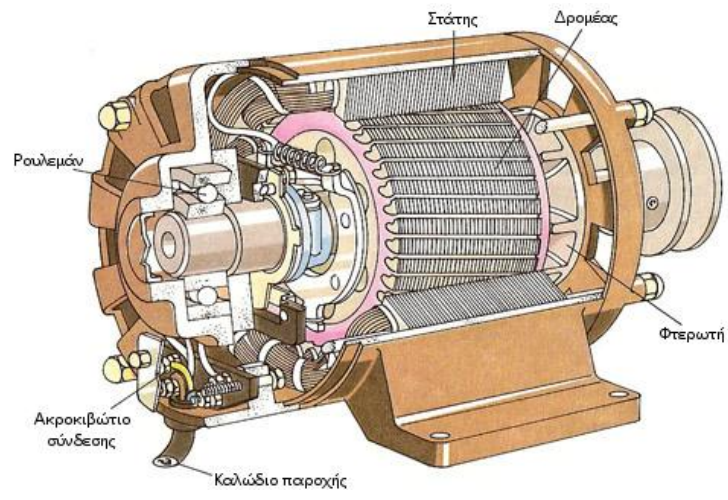
συνδεθεί ο δρομέας στην 3φασική πηγή. Οι ακροδέκτες λοιπόν με τη σειρά του συνδέονται με αντιστάσεις που χρησιμεύουν για την αύξηση της συνολικής αντίστασης του δρομέα άρα για την μείωση του ρεύματος διέγερσης, με άμεσο αποτέλεσμα την ομαλή εκκίνηση. Είναι πιο ακριβοί στην κατασκευή τους, έχουν κάποια πλεονεκτήματα όπως καλύτερη αγωγιμότητα στον δρομέα, εύκολο περιορισμό του ρεύματος διέγερσης άρα και εύκολη επεξεργασία της καμπύλη ταχύτητας-ροπής, αλλά με αρκετά σημαντικό μειονέκτημα την αναγκαία συντήρηση. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται σπάνια στην βιομηχανία.

Το διάκενο ανάμεσα στον δρομέα και τον στάτη είναι της τάξεως των δεκάτων του χιλιοστού σε μικρής ισχύος μηχανές ενώ φτάνει τα 1-2 χιλιοστά στις μεγάλης ισχύος (MW). Ο λόγος που είναι τόσο μικρό είναι διότι μεγαλύτερο διάκενο σημαίνει μεγαλύτερες απώλειες οι οποίες επιφέρουν το αποτέλεσμα να απαιτείται μεγαλύτερο ρεύμα διέγερσης-επαγωγής στον δρομέα.

Πέρα από τον δρομέα και τον στάτη, ένας κινητήρας διαθέτει και ακίνητα μέρη όπως είναι, ο άξονας, το περίβλημα, τα ρουλεμάν, τα πλέγματα, η φτερωτή ψύξης και το κιβώτιο (κουτί) σύνδεσης.



Σχήμα 1.4 Δομή δακτυλιοφόρου δρομέα



Σχήμα 1.5 Δομή μηχανής βραχυκυκλωμένου κλωβού

1.3 Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο

Στην 3φασική μηχανή η κάθε φάση είναι μετατοπισμένη κατά 120 ηλεκτρικές (μηχανικές) μοίρες σε σχέση πάντα με τις υπόλοιπες 2 φάσεις. Οι άξονες a_s , b_s , c_s , όπως φαίνονται στο σχήμα 1.6 δηλώνουν την φορά (θετική) των μαγνητικών πεδίων που παράγουν τα πηνία όταν τροφοδοτούνται από τάση. Δεχόμενοι ότι τα τυλίγματα είναι συμμετρικά, η φορά του ρεύματος σε κάθε πλευρά των ομάδων φαίνεται στο σχήμα 1.6 (σύμφωνα με τον κανόνα του βέλους, η τελεία εκφράζει φορά προς τα εμάς ενώ το X την φορά προς το χαρτί). Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό τα άκρα των 4 ομάδων κάθε τυλίγματος συνδέονται σε σειρά, ενώ τα a_4 , b_4 , c_4 συνδέονται σε αστέρα. Οι πλευρές των ομάδων κάθε τυλίγματος είναι κατανεμημένες σε γωνία 60 ηλεκτρικών μοιρών. Επειδή οι αντίθετες πλευρές των ομάδων σχηματίζουν γωνία ίση με 180 μοίρες το τυλίγμα ονομάζεται full – pitch, σε αντιπαράθεση με το fractional – pitch που το τυλίγμα σχηματίζει γωνία μικρότερη από 180 μοίρες.

Στο ίδιο σχήμα (1.6) φαίνεται η ΜΕΔ (μαγνητεγερτική δύναμη) που αναπτύσσεται σε μία φάση, την a_s . Αρχή των αξόνων θεωρείται ο άξονας a_s στα δεξιά της εικόνας. Η ΜΕΔ που αναπτύσσεται στο τυλίγμα μεταβάλλεται βηματικά (τραπεζοειδής κατανομή σε 2φασικό σύστημα) στο κέντρο των αγωγών του τυλίγματος. Η διεύθυνση του πεδίου (ακτινική) οφείλεται στο πλάτος του διακένου, το οποίο είναι ιδιαίτερα μικρό, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες. Η κάθε ΜΕΔ που αναπτύσσεται στα 3 τυλίγματα, ήτοι ΜΕΔ $_{a_s}$, ΜΕΔ $_{b_s}$, ΜΕΔ $_{c_s}$ είναι μετατοπισμένη κατά 120 ηλεκτρικές μοίρες από την προηγούμενη όπως φαίνεται στο σχήμα 1.7. Οι κυματομορφές των ΜΕΔ είναι μη ημιτονοειδής συναρτήσεις της χωρικής γωνίας ϕ_s , και αυτό σημαίνει ότι υπάρχει έντονο περιεχόμενο αρμονικών. Για την παραγωγή ημιτονοειδούς ΜΕΔ πρέπει τα τυλίγματα του στάτη να έχουν και αυτά ημιτονοειδή κατανομή. Σε αυτήν την περίπτωση η ΜΕΔ έχει την ακόλουθη μαθηματική έκφραση :

$$ΜΕΔ_{a_s} = \frac{N_s}{2} i_{a_s} \cos \phi_s,$$

όπου i_{a_s} το ρεύμα στην φάση a_s του τυλίγματος, N_s οι σπείρες του τυλίγματος.

Σαφώς και για τις 2 υπόλοιπες φάσεις θα ισχύουν οι αντίστοιχες εξισώσεις :

$$ΜΕΔ_{b_s} = \frac{N_s}{2} i_{b_s} \cos \phi_s,$$

$$ΜΕΔ_{c_s} = \frac{N_s}{2} i_{c_s} \cos \phi_s.$$

Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο επειδή είναι ένα κύμα, ήτοι εξαρτάται από τον χώρο και τον χρόνο περιγράφεται με βάση την ακόλουθη εξίσωση.

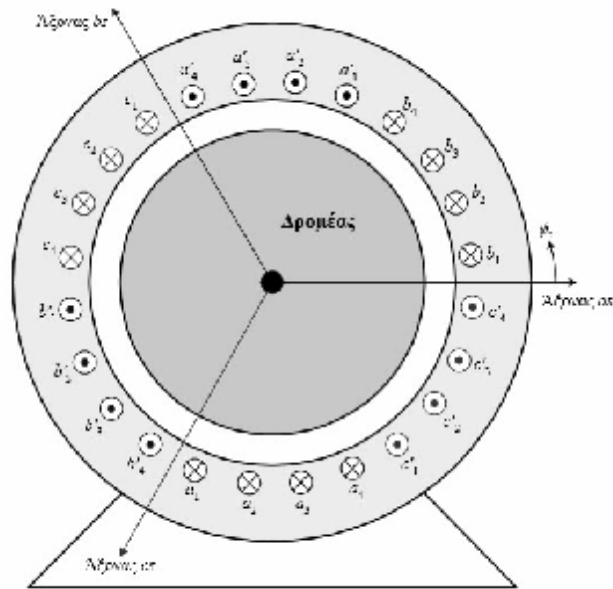
$$B(x, t) = B_{max} \sin \left(\omega t + \pi \frac{x}{\tau} \right) \text{ όπου}$$

τ η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πόλων

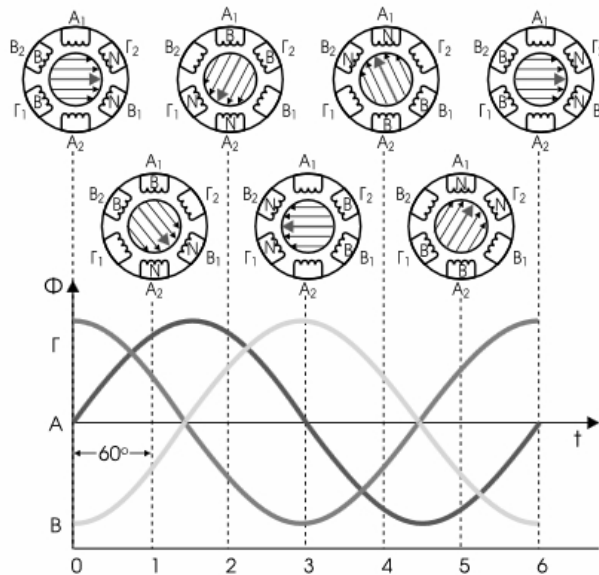
t ο χρόνος

ω η γωνιακή συχνότητα της πηγής :

x η απόσταση επί της περιφέρειας του εσωτερικού κύκλου, που σχηματίζεται κατά την εγκάρσια τομή του στάτη.



Σχήμα 1.6 Οι φάσεις και τα τυλίγματα ενός τριφασικής επαγωγική μηχανής



Σχήμα 1.7 Δημιουργία στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου με $\Delta\phi$ 120 μοίρες

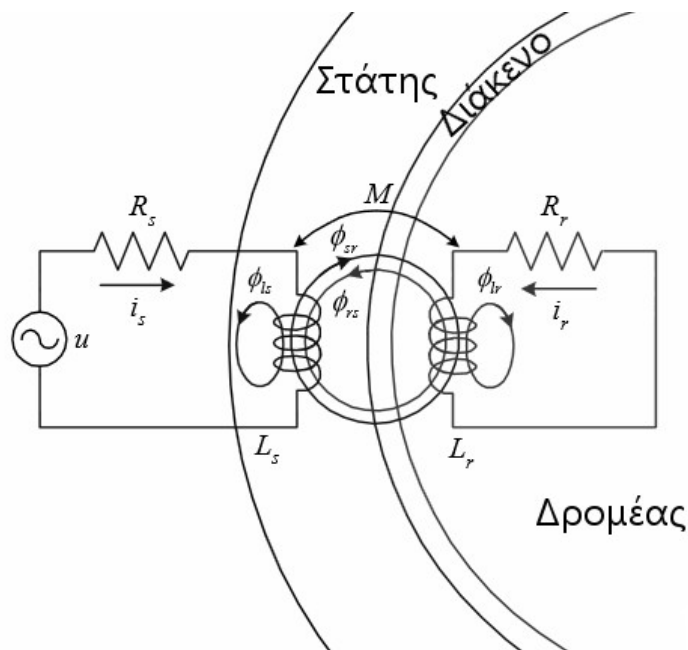
1.4 Λειτουργία Επαγωγικού κινητήρα

Ο στάτης ο οποίος περιέχει το πολυφασικό τύλιγμα, με ωμική αντίσταση R_s , αυτεπαγωγή L_s και αριθμό σπειρών N_s , όταν τον τροφοδοτήσουμε με τάση V και γωνιακή συχνότητα ω , δημιουργείται το μαγνητικό πεδίο, ϕ_s . Η κοινή ροή (mutual flux) ϕ_{sr} διασχίζει ακτινικά το διάκενο και συνδέει το τύλιγμα του δρομέα. Η ροή σκέδασης (leakage flux) ϕ_{ls} εξαρτάται από την σύζευξη των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα. Οπότε το ολικό μαγνητικό πεδίο του στάτη είναι ίσο με $\phi_m = \phi_{sr} + \phi_{ls}$.

Καθώς το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη ϕ_m λόγω σύζευξης, τέμνει τους αγωγούς του τυλιγματος που βρίσκεται στον δρομέα, επάγει στους αγωγούς τάσεις E_r . Επειδή το τύλιγμα του δρομέα αποτελεί είτε κατοπτρικό είδωλο του τυλιγματος του στάτη όπως συμβαίνει στις μηχανές βραχυκυκλωμένου κλωβού, είτε αποτελεί ένα 3φασικό τύλιγμα από μόνο του, έχουμε αντίστοιχα : αντίσταση R_r , αυτεπαγωγή L_r και αριθμό σπειρών N_r στο τύλιγμα του δρομέα. Επειδή οι τάσεις επάγονται στον δρομέα, εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι το ρεύμα I_r καθυστερεί ως προς την τάση E_r . Εφόσον ρέουν ρεύματα στο τύλιγμα του δρομέα, αναπτύσσεται στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του δρομέα ϕ_r . Το μαγνητικό πεδίο περιγράφεται από την εξίσωση $\phi_r = \phi_{rs} + \phi_{lr}$, καθώς η συνιστώσα ϕ_{rs} συνδέει τον δρομέα με τον στάτη, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.8.

Άραγε σύμφωνα με τα προηγούμενα εμφανίζεται ένα συνιστάμενο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο, το οποίο ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των επιμέρους πεδίων (στάτη – δρομέα).

$$\phi_m = \phi_s + \phi_r.$$



Σχήμα 1.8 Το ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα βασισμένο στο αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή

1.5 Ολίσθηση

Η κατανομή των τυλιγμάτων του στάτη ενδέχεται να επαναλαμβάνεται, δηλαδή δημιουργεί παραπάνω από 2 μαγνητικούς πόλους, λέμε λοιπόν, ότι ο κινητήρας έχει p ζεύγη πόλων (όπου $p = 4, 6, \dots$). Επειδή ξέρουμε ότι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου εξαρτάται από την συχνότητα τροφοδοσίας και τους πόλους (ζεύγη πόλων καλύτερα) η σχέση που μας δίνει την σύγχρονη ταχύτητα είναι :

$$n_s = \frac{60f}{p}, \text{ όπου } p \text{ τα ζεύγη πόλων.}$$

Μονάδα μέτρησης της ταχύτητας στην κίνηση έχει καθιερωθεί η ΣΑΛ (στροφές ανά λεπτό) ή στα διεθνή rpm (revolutions per minute).

Σαφώς στον επαγωγικό κινητήρα όπως περιγράψαμε προηγουμένως η ανάπτυξη της ροπής οφείλεται στην αλληλεπίδραση αμφοτέρων των μαγνητικών πεδίων, ήτοι του στάτη και του δρομέα. Οι τάσεις που επάγονται στον δρομέα έχουν άμεσο επακόλουθο την αδυναμία του δρομέα να κινηθεί με ταχύτητα ίση με την σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα. Η αδυναμία αυτή έγκειται στο γεγονός ότι για να αναπτυχθεί μαγνητικό πεδίο στον δρομέα χρειάζεται σχετική κίνηση του πεδίου ως προς αυτόν. Επομένως αν η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα γινόταν ίση με την σύγχρονη δεν θα επαγόntonταν τάσεις στον δρομέα, συνεπώς η ροπή θα μηδενιζόταν.

Η διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από την σύγχρονη ταχύτητα ονομάζεται ταχύτητα ολίσθησης και εκφράζεται με την μαθηματική σχέση

$$n_{slip} = n_{sync} - n_r$$

Συνεπώς η ποσοστιαία διαφορά της ταχύτητας του άξονα του κινητήρα από την σύγχρονη ταχύτητα εκφράζει την ολίσθηση, όπως:

$$s = \frac{n_{sync} - n_r}{n_{sync}} \cdot 100\%.$$

Σύμφωνα με την άνωθεν εξίσωση προκύπτει η ταχύτητα του κινητήρα ως συνάρτηση με την σύγχρονη ταχύτητα και την ολίσθηση,

$$n_r = (1 - s) \cdot n_{sync}.$$

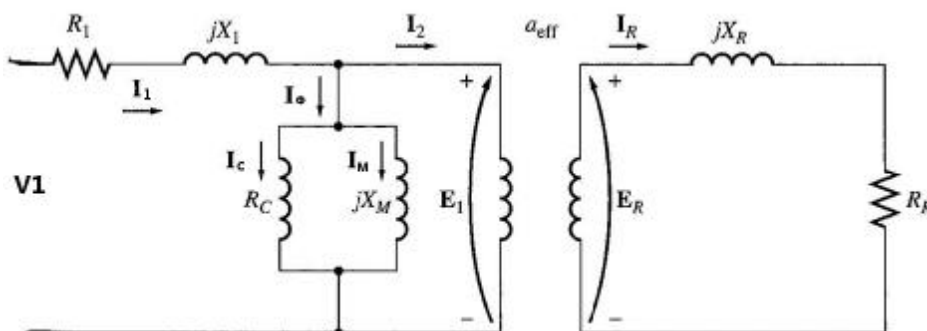
1.6 Ηλεκτρικό ισοδύναμο

Για την ανάλυση της λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα χρησιμοποιείται ευρέως το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα. Με βάση αυτό το μοντέλο θα γίνει η ανάλυση και στην παρούσα εργασία, δεχόμενοι της κάτωθι παραδοχές :

- Οι τάσεις στον στάτη είναι απολύτως συμμετρικές
- Το ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα είναι συμμετρικό
- Οι αρμονικές, ο κορεσμός και το επιδερμικό φαινόμενο δεν λαμβάνονται υπόψη.

Εφόσον αναφερόμαστε σε επαγωγικές μηχανές εύκολα μπορούμε να καταλάβουμε ότι το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής θα μοιάζει με το αντίστοιχο του μετασχηματιστή. Το πρωτεύον κύκλωμα αντιστοιχίζεται στον στάτη και το δευτερεύον στον δρομέα.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, βασισμένο στο αντίστοιχο κύκλωμα του μετασχηματιστή.



Σχήμα 1.9 Το ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα

Όπου :

R_1 η αντίσταση του στάτη,

X_1 Αντίδραση διαρροής,

R_C Απώλειες πυρήνα στάτη και δρομέα,

X_M Αντίσταση μαγνήτισης

$E_R = sE_{R0}$ επαγόμενη τάση δρομέα,

$X_R = \omega_R L_R = 2\pi f_R L_R = 2\pi s f_e L_R = s(2\pi f_e L_R) = sX_{R0}$

R_R η πραγματική ωμική αντίσταση στον δρομέα

α_{eff} είναι ο συντελεστής μετασχηματισμού και δίδεται από τις σχέσεις $\alpha_{eff} = \frac{E_1}{E_{R0}} = \frac{I_R}{I_2}$

$$\text{όπου } I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R} = \frac{E_{R0}}{\frac{R_R}{s} + jX_{R0}}$$

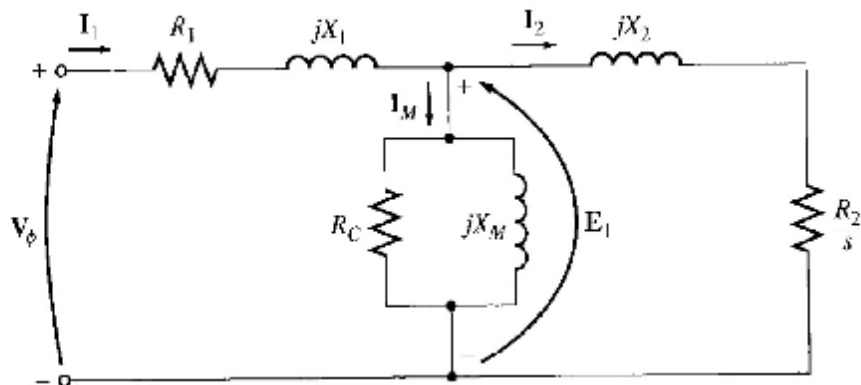
$$V_1 = E_1 + I_1(R_1 + jX_1).$$

Το αριστερό τμήμα του κυκλώματος αναφέρεται στον στάτη σε αντιπαραβολή με το πρωτεύον του μετασχηματιστή. Όπως ακριβώς και στο αντίστοιχο ισοδύναμο του μετασχηματιστή, είμαστε σε θέση να αναλύσουμε το ρεύμα σε 2 συνιστώσες, την συνιστώσα του φορτίου I_2 και την συνιστώσα διεγέρσεως I_M , η οποία αναφέρεται στο ρεύμα το οποίο απαιτείται για τη δημιουργία της ροής διακένου του στάτη φ_s . Το ρεύμα διέγερσης μπορεί και αυτό με τη σειρά του να αναλυθεί σε 2 συνιστώσες, το I_c συμφασικό με την V_1 καθώς η R_c εκφράζει τις ωμικές απώλειες του πυρήνα του στάτη, και την συνιστώσα μαγνήτισης I_m που έπεται της V_1 κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες.

Το δεξί τμήμα του κυκλώματος αντιστοιχεί στον δρομέα. Καθώς κατά την ανάλυση του ισοδύναμου κυκλώματος του μετασχηματιστή πρέπει να ανοίξουμε το κύκλωμα στην πλευρά του πρωτεύοντος, αντίστοιχα στην περίπτωση μας θα το ανοίξουμε στην πλευρά του στάτη. Επειδή ο δρομέας μιας επαγωγικής μηχανής είναι βραχυκυκλωμένος, η σύνθετη αντίδραση που εμφανίζεται λόγω της επαγωγικής φύσεως του δρομέα είναι ίση με την εμπέδηση βραχυκύκλωσης του τυλίγματος. Επομένως η σχέση που περιγράφει την εμπέδηση του δρομέα είναι $Z_R = \frac{E_R}{I_R} = R_R + jX_R$. Επειδή όμως η συχνότητα των ρευμάτων του δρομέα είναι $f_r = s f_e$ (f_e η συχνότητα τροφοδοσίας) στην παραπάνω σχέση πρέπει να συμπεριλάβουμε και την ολίσθηση όπως: $Z_R = R_R + jsX_R$.

Καθώς δεχόμαστε ότι ο δρομέας αποτελείται από τον ίδιο αριθμό ελιγμάτων με τον στάτη, μπορούμε εύκολα να καταλάβουμε ότι τα ρεύματα που σχετίζονται με την δημιουργία του κύματος ΜΕΔ στο διάκενο, ήτοι I_1 και I_2 πρέπει να έχουν ίδιο πλάτος. Το κύμα ΜΕΔ επάγει την τάση E_r στον δρομέα. Επειδή όμως η σχετική ταχύτητα του κύματος ΜΕΔ στο διάκενο σε σχέση με τον δρομέα είναι ίση με την ολίσθηση, η σχέση μεταξύ των τάσεων γίνεται $E_1 = sE_r$.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η σχέση $Z_R = R_R + jsX_R$ γίνεται $Z_R = \frac{R_R}{s} + jX_R$. Επομένως το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα είναι αυτό που φαίνεται στο σχήμα 1.10.



Σχήμα 1.10 Απλοποιημένο Τα ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικής μηχανής

1.7 Πειραματικός προσδιορισμός στοιχείων ισοδύναμου κυκλώματος

Παρακάτω θα περιγραφούν οι τρόποι με τους οποίους μπορούμε να προσδιορίσουμε τα αντίστοιχα στοιχεία του κινητήρα. Τα πειράματα που θα περιγράψουμε είναι :

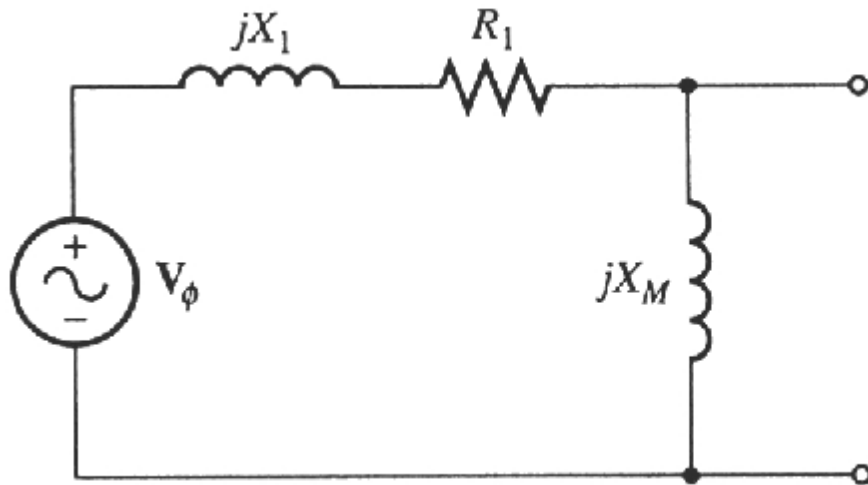
- Δοκιμή χωρίς φορτίο
- Δοκιμή Συνεχούς Ρεύματος
- Δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα

Δοκιμή χωρίς φορτίο

Το πείραμα χωρίς φορτίο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αντίστασης μαγνήτισης X_m και των απωλειών του κινητήρα. Ο κινητήρας τροφοδοτείται από την πηγή με το ονομαστικό πλάτος, απουσία φορτίου, το οποίο σημαίνει ότι η ολίσθηση είναι πολύ μικρή, όπως και τα ρεύματα που επάγονται στον δρομέα. Με τα κατάλληλα μετρικά όργανα (πολύμετρα, παλμογράφοι) μπορούμε να μετρήσουμε τα ρεύματα γραμμής και τις τάσεις.

Έχουμε το κύκλωμα που ακολουθεί (σχήμα 1.11) και προσδιορίζουμε την σύνθετη αντίσταση (εμπέδηση) του κυκλώματος,

$$Z_{nl} = \frac{V_\phi}{I_{l_{nl}}} \approx X_1 + X_m$$

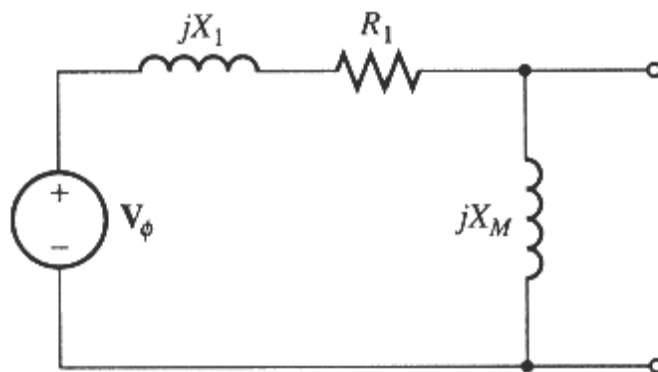


Σχήμα 1.11 Κύκλωμα για το πείραμα χωρίς φορτίο

Δοκιμή Συνεχούς Ρεύματος

Η δοκιμή Σ.Ρ. χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αντίστασης του στάτη. Τα τυλίγματα του κινητήρα σε συνδεσμολογία αστέρα, τροφοδοτούνται από πηγή Σ.Ρ. με κατάλληλη τάση ώστε το ρεύμα που περνάει να είναι ίσο με το ονομαστικό, που αναγράφεται στο ταμπελάκι. Επειδή ο κινητήρας τροφοδοτείται από Σ.Ρ., προφανώς δεν θα επάγονται ρεύματα στον δρομέα, επομένως το ρεύμα που μετράμε εξαρτάται μόνο από την αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη και προσδιορίζεται από τον τύπο : $R_1 = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}}$.

Το πείραμα Σ.Ρ. φαίνεται στο σχήμα 1.12.



Σχήμα 1.12 Πείραμα συνεχούς ρεύματος

Δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα.

Σε αυτή την δοκιμή ο δρομέας είναι ακίνητος, ενώ ο κινητήρας τροφοδοτείται με κατάλληλη τάση ώστε το ρεύμα στον στάτη να έχει την ονομαστική τιμή. Η εμπέδηση του δρομέα είναι σαφώς μικρότερη από την αντίδραση μαγνήτισης.

Έχουμε ότι ο συντελεστής ισχύος με ακινητοποιημένο τον δρομέα είναι :

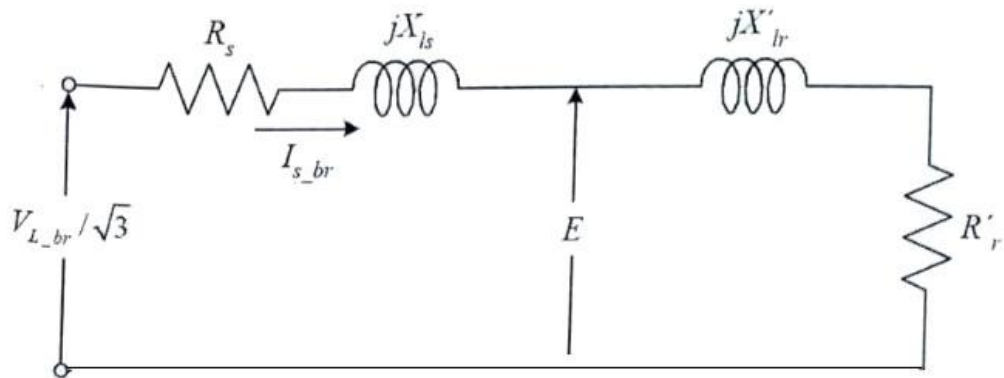
$$\cos \theta = \frac{P_{in}}{\sqrt{3}V_L I_L}, \text{ υπολογίζουμε την εμπέδηση σύμφωνα με τις μετρήσεις } (Z_{br} = \frac{V_{br}}{I_{br}}).$$

$$\text{Επομένως η εμπέδηση θα είναι ίση με } Z_{br} = R_{br} + jX_{br} = Z_{br} \cos \theta + jI_{br} \sin \theta,$$

$$\text{όπου } R_{br} = R_S + R_R \text{ και } X_{br} = X_S + X_R.$$

Παίρνοντας υπόψη την συχνότητα λειτουργίας, η συνολική επαγωγική αντίδραση είναι $X_{br} = \frac{f_n}{f_t} X_{br} = X_S + X_R$, όπου f_n η ονομαστική συχνότητα του κινητήρα και f_t η συχνότητα δοκιμής.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται το ηλεκτρικό κύκλωμα του πειράματος.

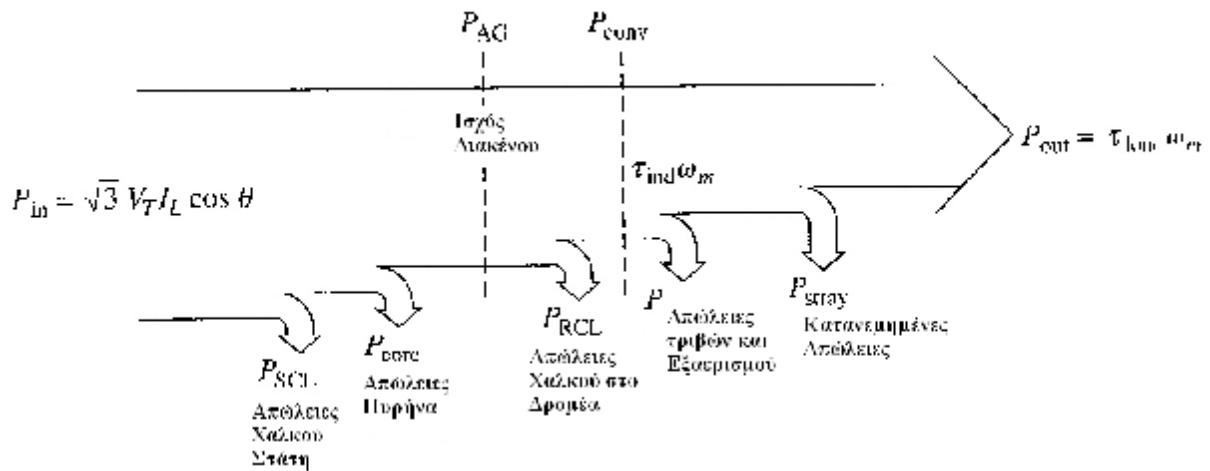


Σχήμα 1.13 Το πείραμα του ακινητοποιημένου δρομέα

1.8 Απώλειες επαγωγικού κινητήρα

Ο επαγωγικός κινητήρας, όπως εξάλλου και κάθε κινητήρας μετατρέπει την ισχύ εισόδου που είναι ηλεκτρική σε μηχανική. Εφόσον μιλάμε για το 3φασικό σύστημα του ελληνικού δικτύου η ισχύς εισόδου ισούται με $P_{in} = 3VI_s \cos\phi$, κατά τα γνωστά.

Σύμφωνα με το σχήμα 1.14 θα εξηγήσουμε τις απώλειες που εμφανίζονται με τη σειρά από την είσοδο προς την έξοδο.



Σχήμα 1.14 Σχηματική αναπαράσταση των απωλειών της επαγωγικής μηχανής

- Απώλειες χαλκού και πυρήνα στο στάτη,

Οι απώλειες χαλκού στον στάτη οφείλονται στην ροή ρευμάτων μέσα από τα τυλίγματα του στάτη και οι απώλειες πυρήνα οφείλονται στην ανάπτυξη δινορευμάτων. Οι απώλειες αυτές δίδονται από την σχέση

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1 \text{ και}$$

$$P_{core} = 3E_1^2 G_c = \frac{3E_1^2}{R_c}$$

- Απώλειες χαλκού δρομέα

Ομοίως οι απώλειες χαλκού του δρομέα οφείλονται στα ρεύματα που επάγονται σ' αυτόν και δίδονται από τον τύπο

$$P_{RCL} = 3I_2^2 R_2$$

- Μαγνητικές απώλειες

Μαγνητικές απώλειες ή απώλειες σιδήρου είναι το άθροισμα των απωλειών υστέρησης και δινορευμάτων σε στάτη και δρομέα. Υπολογίζονται από τους τύπους :

$$P_{iron_s} = k_e \omega_e^2 \varphi_m^2 + k_h \omega_e^2 \varphi_m^n \text{ και}$$

$$P_{iron_r} = k_e (s\omega_e)^2 \varphi_m^2 + k_h s\omega_e \varphi_m^n,$$

Όπου k_e και k_h οι συντελεστές απωλειών δινορευμάτων και υστέρησης αντίστοιχα. Ο εκθέτης n έχει εύρος τιμών 1.5-2.5 αλλά συνήθως θεωρείται 2.

- Μηχανικές απώλειες (τριβών και εξαερισμού)

Οι μηχανικές απώλειες P_{fw} , αναφέρονται στις απώλειες εξαιτίας των τριβών και εξαερισμού. Οι απώλειες αυτές δίδονται από τον τύπο :

$$P_{fw} = C_{fw} n_r^2,$$

Όπου C_{fw} η σταθερά μηχανικών απωλειών.

- Κατανεμημένες απώλειες

Οι κατανεμημένες απώλειες είναι οι απώλειες εκείνες που οφείλονται στην μεταβολή της ροής σκέδασης. Είναι δύσκολο να υπολογιστούν και συνήθως τις θεωρούμε ως 1% της ισχύος εξόδου υπό ονομαστικό φορτίο.

1.9 Ισχύς και Ροπή

Αν αφαιρέσουμε τις απώλειες χαλκού και οι μαγνητικές απώλειες του στάτη από την ισχύ εισόδου, θα πάρουμε την ισχύ στο διάκενο της μηχανής, η οποία δίδεται από τον τύπο :

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s},$$

Όπως βλέπουμε στο σχήμα 1.14 τμήμα της ισχύος διακένου χάνεται στις απώλειες χαλκού και μαγνητικές απώλειες του δρομέα. Η ισχύς που απομένει ονομάζεται μηχανική ισχύς και δίδεται από τις ακόλουθες σχέσεις :

$$P_m = P_{AG} - P_{cu_r} = P_{AG}(1 - s), \text{ όπου}$$

$$P_{cu_r} = sP_{AG}$$

Όταν ο κινητήρας είναι ακίνητος, δηλαδή ισχύει $s = 1$, ολόκληρη η ισχύς διακένου μετατρέπεται σε θερμότητα. Η ισχύς που θεωρούμε ωφέλιμη είναι

$$P_{out} = P_m - P_{fw} - P_{stray}$$

Αντίστοιχα, η ροπή εξόδου είναι και αυτή μειωμένη από την αναπτυσσόμενη στο διάκενο, εξαιτίας των τριβών. Η ροπή δίνεται από τους τύπους:

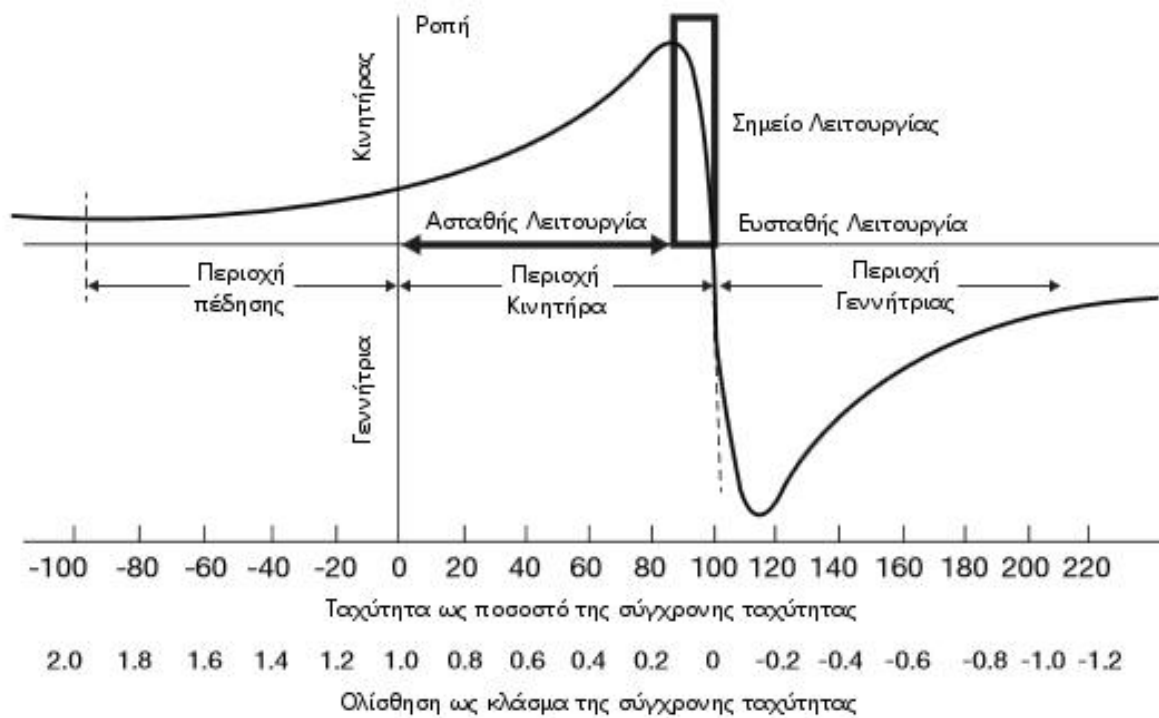
$$\tau = \frac{P_m}{\omega_r} = \frac{(1 - s)P_{AG}}{(1 - s)\omega_s} = \frac{P_{AG}}{\omega_s}$$

1.10 Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας

Η χαρακτηριστική ροπής ταχύτητας σχήμα 1.15 ενός επαγωγικού κινητήρα μας δείχνει την συμπεριφορά του κινητήρα ανάλογα με το φορτίο. Το πιο πρακτικό σημείο λειτουργίας εντοπίζεται κατά το μέσον της σταθερής περιοχής του κινητήρα, μετά το λεγόμενο “γόνατο”. Σε αυτή την περιοχή βλέπουμε ότι η ταχύτητα μεταβάλλεται ελάχιστα με το φορτίο.

Παρατηρώντας την καμπύλη βλέπουμε ότι είναι συμμετρική ως προς ένα σημείο μηδενικής ροπής και εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι ο κινητήρας έχει προκαθορισμένη τιμή ροπής εκκίνησης (βέβαια μέσω νέων μεθόδων ελέγχου είναι δυνατή η εκμετάλλευση όλης της κλίμακας – από το 0).

Στο αριστερό μέρος είναι η περιοχή πέδησης, ενώ δεξιότερα της περιοχής της κίνησης βρίσκεται η περιοχή στην οποία η μηχανή υπερβαίνει τις σύγχρονες στροφές και δουλεύει πλέον σαν γεννήτρια.

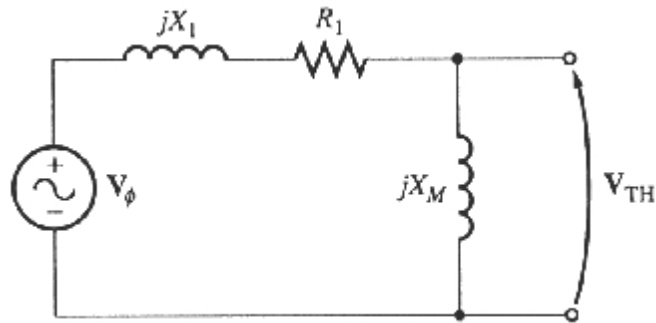


Σχήμα 1.15 Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας επαγωγικού κινητήρα

1.11 Υπολογισμός Ροπής

Για να είναι ικανός ο υπολογισμός της ροπής που αναπτύσσει ο κινητήρας πρέπει να αναλύσουμε το ηλεκτρικό ισοδύναμο. Θα προσδιορίσουμε λοιπόν τις V_{Th} , Z_{Th} .

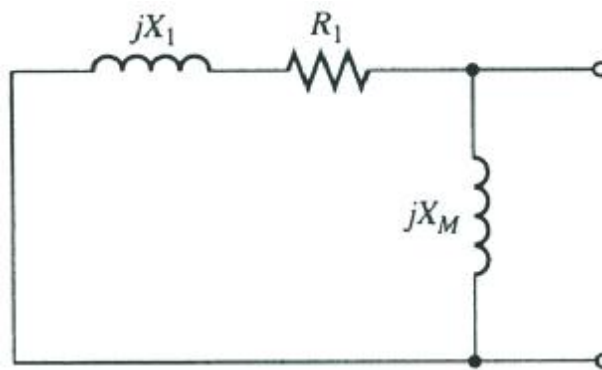
Αρχίζουμε με την V_{th} , όπως :



Σχήμα 1.16 Ισοδύναμο κύκλωμα για υπολογισμό V Thevenin

$$V_{Th} = \frac{jX_m}{R_1 + jX_1 + jX_m} V_\phi = \frac{jX_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}} V_\phi$$

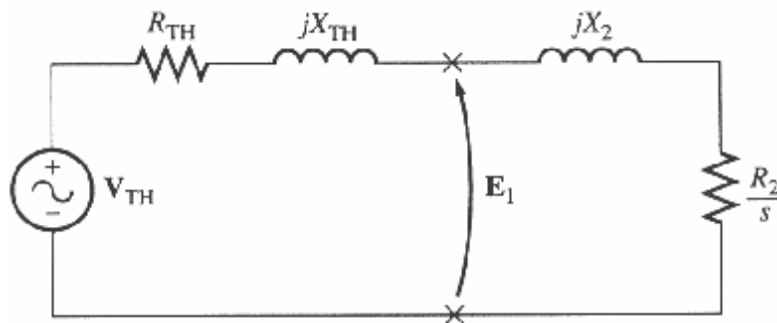
Και η εμπέδηση υπολογίζεται :



Σχήμα 1.17 Ισοδύναμο κύκλωμα για υπολογισμό Z Thevenin

$$Z_{Th} = \frac{jX_m(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)}$$

Οπότε προκύπτει το κύκλωμα και οι αντίστοιχες εξισώσεις :



Σχήμα 1.20 Ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin

$$R_{Th} = R_1 \left(\frac{X_m}{X_1 + X_m} \right)^2$$

$$X_{Th} \approx X_1$$

$$I_2 = \frac{V_{Th}}{R_{Th} + \frac{R_2}{s} + jX_{Th} + jX_2}$$

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s}$$

$$\tau = \frac{P_{AG}}{\omega_s}$$

Τελικά έχουμε

$$\tau = \frac{3V_{Th} \frac{R_2}{s}}{\omega_s \left[\left(R_{Th} + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_{Th} + X_2)^2 \right]}$$

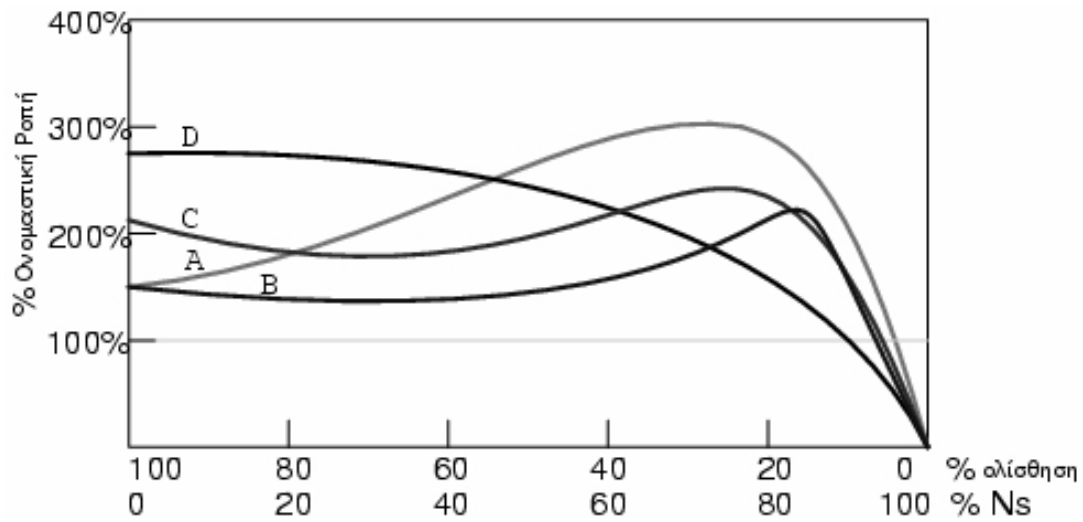
1.12 Κατηγορίες επαγωγικών κινητήρων

Επειδή οι διάφορες εφαρμογές των κινητήρων χρειάζονται και διαφορετικές καμπύλες λειτουργίας, υπάρχουν διάφοροι οργανισμοί πιστοποίησης που χρησιμοποιούν διαφορετικά πρωτόκολλα. Οι πιο σημαντικοί από αυτούς είναι, η IEC (International Electrotechnical Commission), η CSA (Canadian Standards Association), η BS (British Standards), η JEC (Japanese Electrotechnical Committee) και η NEMA (National Electrical Manufacturers Association). Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με την NEMA, που είναι μια Αμερικάνικη ομοσπονδία και οι συμβολισμοί της χρησιμοποιούνται εκτενώς στον Ελλαδικό

χώρο. Οι τυπικές καμπύλες για κάθε κινητήρα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα 1.21. Στον πίνακα 1.1 φαίνονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά και οι χρήσεις της κάθε κατηγορίας.

	Κλάση A	Κλάση B	Κλάση C	Κλάση D
Τύπος	Γενικής χρήσεως	Γενικής χρήσεως	Υψηλή ροπή εκκίνησης	Πολύ υψηλή ροπή εκκίνησης
Ροπή εκκίνησης	100% της ονομαστικής για μεγάλους κινητήρες, 200% για μικρότερους	100% της ονομαστικής για μεγάλους κινητήρες, 200% για μικρότερους	Περίπου 250% της ονομαστικής	>275% της ονομαστικής
Ρεύμα εκκίνησης	~800% του ονομαστικού	500-600% του ονομαστικού		
Ροπή ανατροπής	200-300% της ονομαστικής	≥200% της ονομαστικής	Ελαφρώς μικρότερη από την αντίστοιχη κλάσης A	
Ολίσθηση ανατροπής	<0,2	<0,2		Υψηλή, μπορεί να φτάσει και το 1
Ονομαστική ολίσθηση	<0,05	<0,03	<0,05	>0,07
Εφαρμογές	Φτερωτές, αντλίες, μηχανικά εργαλεία	Παρόμοιες με την κλάση A, με περισσότερες εφαρμογές σε συστήματα HVAC	Συμπιεστές, αντλίες, ταινιόδρομοι	Εφαρμογές που χρειάζονται μεγάλη ροπή εκκίνησης π.χ. τύπος διατρήσεων, γερανογέφυρες, ανυψωτικά
Σημειώσεις	Το μεγάλο ρεύμα εκκίνησης προκαλεί σοβαρά προβλήματα στο δίκτυο, άρα χρειάζονται ειδικές τεχνικές ομαλής εκκίνησης. Περισσότερο αποδοτικός από ίδιων διαστάσεων κλάσης B.	Αντικαταστάτης των κινητήρων κλάσης A, λόγω του μικρότερου ρεύματος εκκίνησης. Οι πιο συνηθισμένοι στο εμπόριο.	Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που χρειάζεται μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης από τους κινητήρες κλάσης B. Είναι λιγότερο αποδοτικοί από τους αντίστοιχους κλάσης B.	Εφαρμογές που απαιτούν πολύ μεγάλη ροπή εκκίνησης, όπου η ολίσθηση μπορεί να παίρνει τιμές από 0 - 0,5. Είναι λιγότερο αποδοτικοί από όλες τις άλλες κατηγορίες.

Πίνακας 1.1 Βασικά χαρακτηριστικά κάθε κλάσης κατά NEMA



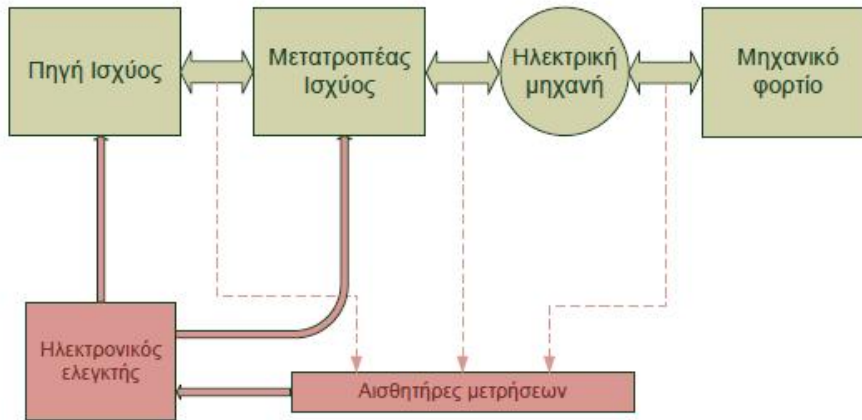
Σχήμα 1.21 Οι καμπύλες ροπής ταχύτητας για κάθε κλάση

1.13 Σύστημα ηλεκτρικής κίνησης

Η γενική μορφή ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.22 και αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα:

- Την πηγή ισχύος
- Το μετατροπέα ισχύος
- Την ηλεκτρική μηχανή
- Τον ηλεκτρονικό ελεγκτή

- Τους αισθητήρες μετρήσεων

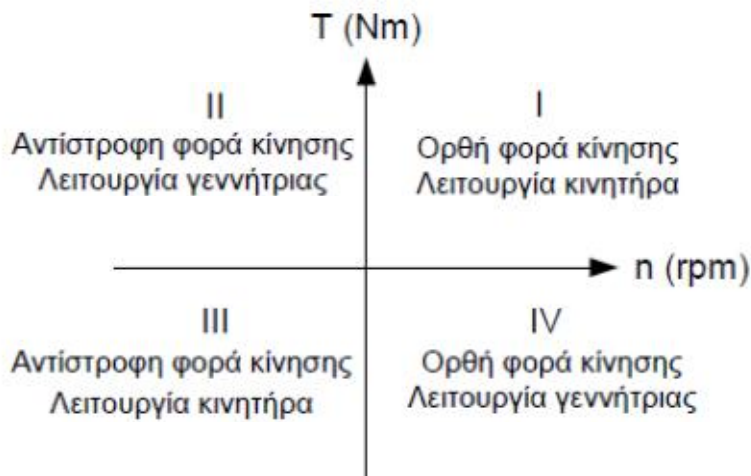


Σχήμα 1.22 Γενική μορφή σχήματος ηλεκτρικής κίνησης

Οι βασικές απαιτήσεις ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης αφορούν στην ικανότητα κάλυψης αναγκών φορτίων υψηλής ισχύος, στην ανάπτυξη υψηλής ροπής στις χαμηλές στροφές (π.χ. εκκίνηση) και υψηλών στροφών στις χαμηλές ροπές φορτίου, στο ευρύ φάσμα στροφών, στην υψηλή απόδοση της αναγεννητικής πέδησης (αν υπάρχει), στην υψηλή αξιοπιστία και σταθερότητα για ποικίλες συνθήκες λειτουργίας και στο λογικό κόστος.

Το πράσινο χρώμα του Σχήματος 1.22 υποδηλώνει ότι το υποσύστημα ανήκει στο κύκλωμα ισχύος, ενώ το κόκκινο χρώμα ότι ανήκει στο σύστημα ελέγχου.

Στο κύκλωμα ισχύος, όπως υποδεικνύει και η ονομασία του, πραγματοποιείται η μεταφορά και η διαχείριση της κύριας ισχύος του συστήματος. Μία σημαντική απαίτηση των συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης είναι η αμφίδρομη μεταφορά ισχύος που μεταφράζεται ως λειτουργία τεσσάρων τεταρτημορίων στο πεδίο ροπής-ταχύτητας του Σχήματος 1.22. Συγκεκριμένα, όταν η ροπή και η ταχύτητα έχουν το ίδιο πρόσημο τότε η μηχανή λειτουργεί σαν κινητήρας (1ο – 3ο τεταρτημόριο), ενώ όταν είναι ετερόσημες η μηχανή λειτουργεί σαν γεννήτρια (2ο – 4ο τεταρτημόριο) και ισχύς μεταφέρεται από τα μηχανή στην πηγή ισχύος. Η τελευταία περίπτωση αποτελεί τη λειτουργία αναγεννητικής πέδησης.



Σχήμα 1.22 – Λειτουργία 4 τεταρτημορίων στο επίπεδο ροπής – ταχύτητας

Το κύκλωμα ελέγχου λειτουργεί σε πολύ μικρότερη τάξη ισχύος συγκριτικά με το κύκλωμα ισχύος και είναι υπεύθυνο για την εποπτεία και τον έλεγχο του συστήματος. Οι αισθητήρες μετρούν τα απαιτούμενα μεγέθη (τάση, ρεύμα, ροπή, ταχύτητα) και τα μετατρέπουν σε σήματα ανάδρασης κατάλληλα για ανάγνωση από τον ηλεκτρονικό ελεγκτή. Ο ελεγκτής μετατρέπει τα σήματα αυτά σε ψηφιακά, τα επεξεργάζεται και παράγει κατάλληλα σήματα ελέγχου προς το μετατροπέα ισχύος ανάλογα με τον αλγόριθμο ελέγχου που χρησιμοποιείται.

Κεφάλαιο 2^ο Συμβατικοί τρόποι ελέγχου στροφών επαγωγικού κινητήρα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγράψουμε τρόπους για την εκκίνηση και για τον έλεγχο στροφών ασύγχρονων κινητήρων με συμβατικά μέσα. Επειδή η τεχνολογία τρέχει με γοργούς ρυθμούς, στο επόμενο κεφάλαιο θα αναλύσουμε διεξοδικά τους σύγχρονους και συνάμα αποδοτικότερους τρόπους ελέγχου της ταχύτητας του κινητήρα.

Τρόποι ελέγχου ταχύτητας επαγωγικού κινητήρα.

Αμα φέρουμε στο μυαλό μας την καμπύλη ροπής-ταχύτητας του κινητήρα, εύκολα καταλαβαίνουμε ότι ο έλεγχος των στροφών του κινητήρα είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με τους κάτωθι τρόπους :

- Μεταβολή του αριθμού των πόλων,
- Μεταβολή της αντίστασης του δρομέα (περίπτωση δακτυλιοφόρου δρομέα)
- Μεταβολή της τάση τροφοδοσίας με σταθερή συχνότητα,
- Μεταβολή της τάση τροφοδοσίας και της συχνότητας,
- Με μηχανικά μέσα

Η πρώτη και η τέταρτη μέθοδος μεταβάλλουν ουσιαστικά την σύγχρονη ταχύτητα, τουτέστιν την συχνότητα στο διάκενο της μηχανής, ενώ η δεύτερη και τρίτη μέθοδος μεταβάλλουν την ολίσθηση.

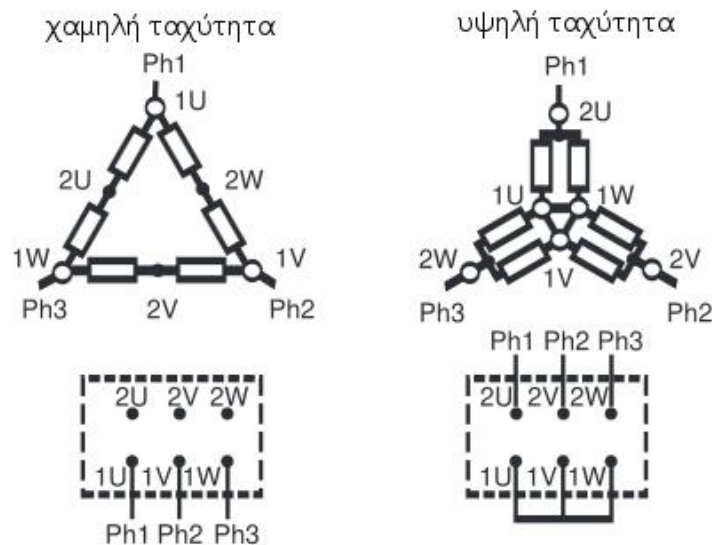
2.1 Έλεγχος της ταχύτητας με την μεταβολή των πόλων

Υπάρχουν 2 τρόποι για να μεταβληθεί ο αριθμός των πόλων. Η μία μέθοδος είναι τοποθετώντας πολλαπλά ξεχωριστά τυλίγματα στα αυλάκια του στάτη (multiple separate stator windings) ενώ η δεύτερη μέθοδος είναι το τύλιγμα Dahlander (Dahlander winding). Σημαντικό να αναφερθεί είναι ότι η συγκεκριμένη μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε

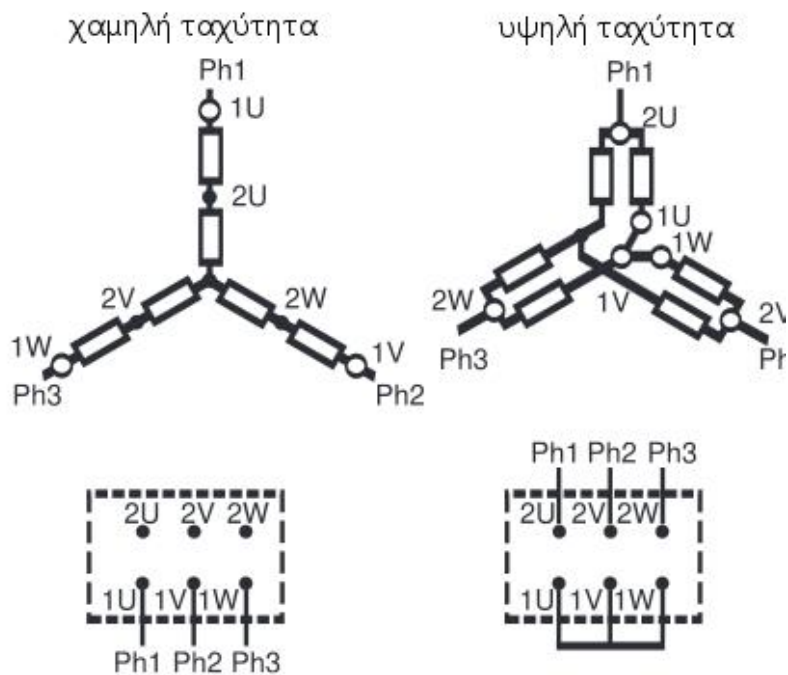
επαγωγικούς κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα. Αυτό συμβαίνει διότι ο δρομέας (βραχυκυκλωμένου κλωβού) αναπτύσσει πάντα τόσους πόλους, όσοι είναι οι αντίστοιχοι στον στάτη. Ενώ αντίθετα στον δακτυλιοφόρο δρομέα ο κατασκευαστής καθορίζει τον αριθμό των πόλων του.

- Τύλιγμα Dahlander

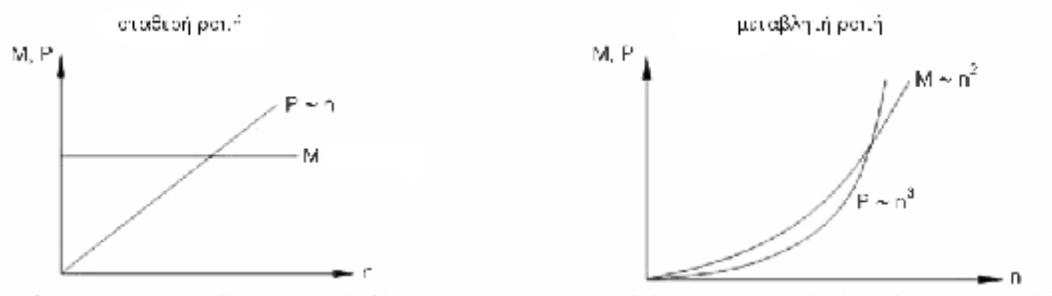
Κατά την μέθοδο Dahlander, με κάποιες αλλαγές στην συνδεσμολογία στο κιβώτιο σύνδεσης μπορούμε να μεταβάλλουμε την ταχύτητα με λόγο $\frac{1}{2}$ άρα και τον αριθμό των πόλων με λόγο 2:1, 4:2, 8:4 κλπ. Το σχήμα 2.1 μας δείχνει την συνδεσμολογία για σταθερή ροπή (Δ/Y) με μεγάλη και μικρή ταχύτητα αντίστοιχα, ενώ το σχήμα 2.2 την συνδεσμολογία για μεταβλητή ροπή (Y/Y) με τις αντίστοιχες ταχύτητες. Συνδεσμολογία για σταθερή ροπή απαιτούν οι εφαρμογές που χρειάζονται μεγάλη ροπή εκκίνησης και σταθερή ροπή σε όλο το εύρος ταχύτητας. Τυπικές εφαρμογές που απαιτούν την παραπάνω συνδεσμολογία είναι οι συμπιεστές, ταινιόδρομοι, παλάγκο κλπ. Σε συνδεσμολογία μεταβλητής ροπής συνδέονται οι κινητήρες για εφαρμογές που δεν χρειάζονται μεγάλη ροπή εκκίνησης, όπως οι φτερωτές και μικρές αντλίες. Όπως εύκολα μπορούμε να διακρίνουμε από την χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας της τελευταίας συνδεσμολογίας, η ροπή μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας (σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.1 Συνδεσμολογία Δ/Y για σταθερής ροπής



Σχήμα 2.2 Συνδεσμολογία μεταβλητής ροπής

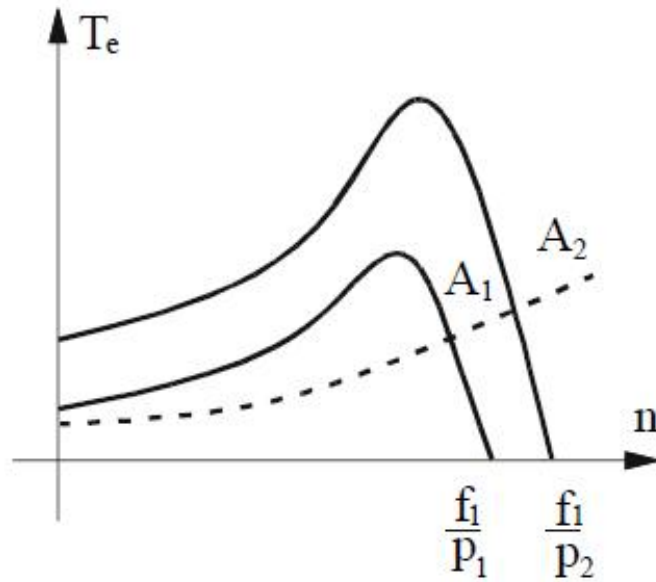


Σχήμα 2.3 Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας για σταθερή και μεταβλητή ροπή

- Ξεχωριστά τυλίγματα στον στάτη

Οι κινητήρες που έχουν ξεχωριστά τυλίγματα στον στάτη έχουν το μεγάλο πλεονέκτημα ότι μπορούν να μας δώσουν δύο διαφορετικές ταχύτητες –θεωρητικά τουλάχιστον- με οιονδήποτε λόγο. Το μειονέκτημα του όμως έγκειται στο ότι τα ηλεκτρικά του χαρακτηριστικά επηρεάζονται από το γεγονός ότι τα τυλίγματα χαμηλής ταχύτητας πρέπει να αντέχουν στα μηχανικά και ηλεκτρικά μεγέθη που παρουσιάζονται στις μεγάλες ταχύτητες. Έτσι ορισμένες φορές ο κινητήρας μπορεί να τραβάει περισσότερο ρεύμα στις χαμηλές στροφές, παρά στις

υψηλές. Αλλάζοντας τους πόλους σε ένα ή και στα δύο τυλίγματα του στάτη μπορούμε να κατασκευάσουμε κινητήρες με 3 ή 4 ταχύτητες. Παρακάτω (σχήμα 2.4) φαίνεται η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας ενός κινητήρα με 2 τυλίγματα στον στάτη.

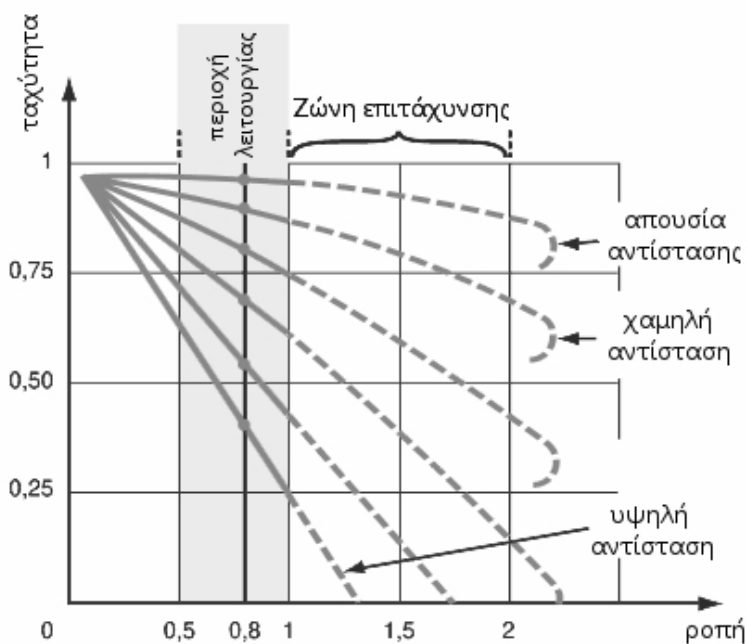


Σχήμα 2.4 Χαρακτηριστική ροπής κινητήρα με διπλό τύλιγμα στον στάτη

2.2 Μεταβολή της αντίστασης του δρομέα (περίπτωση δακτυλιοφόρου δρομέα)

Οι δακτυλιοφόροι δρομείς μπορούν να βραχυκυκλωθούν σταδιακά με την χρήση διαφόρων τιμών αντιστάσεων, ώστε να επιτύχουμε την ομαλή εκκίνηση του κινητήρα. Πρέπει να είναι υπολογισμένοι ώστε να αντέχουν τις μηχανικές καταπονήσεις κατά την διάρκεια της λειτουργίας του κινητήρα, πράγμα που σημαίνει ότι είναι ογκώδεις, άρα και οικονομικά ασύμφοροι. Η χρήση των δρομέων με δακτυλιοφόρο δρομέα έχει 2 σημαντικά μειονεκτήματα, και γι αυτό έχει περιοριστεί στο ελάχιστο η χρήση τους στην βιομηχανία.

- Σε χαμηλές ταχύτητες, μεγάλα ποσά ενέργειας μετατρέπονται σε θερμότητα μέσω των αντιστάσεων, πράγμα που μεταφράζεται σε μεγάλο κόστος λειτουργίας.
- Η ταχύτητα μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το φορτίο, όπως φαίνεται στην χαρακτηριστική στο σχήμα 2.5. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι είναι αδύνατη η ρύθμιση της ταχύτητας του κινητήρα χωρίς φορτίο.

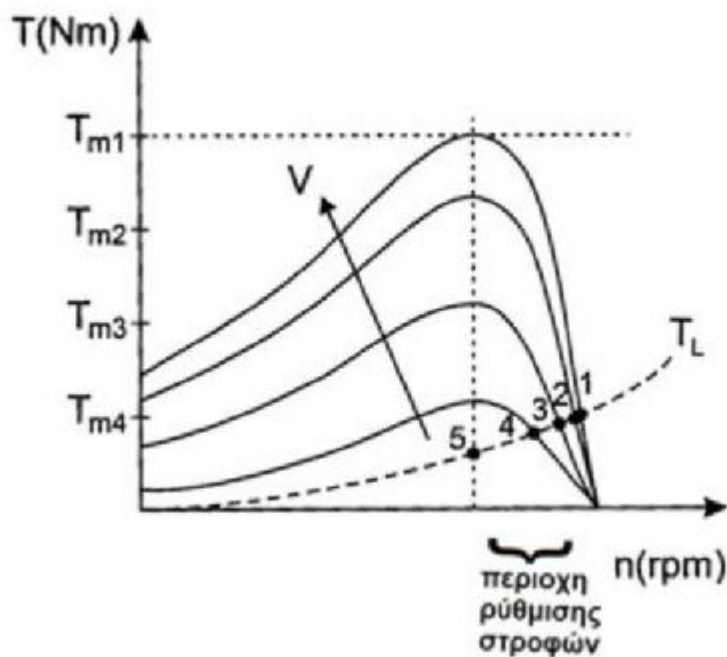


Σχήμα 2.5 Χαρακτηριστική ταχύτητας – ροπής κατά την μεταβολή της αντίστασης δρομέα σε κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα

2.3 Μεταβολή της τάση τροφοδοσίας με σταθερή συχνότητα

Υπάρχουν 2 τρόποι μεταβολής της τάσης του κινητήρα. Ο ένας είναι με χρήση μετατροπέων E.P. (AC-AC converters/voltage controllers) και ο άλλος με την χρήση αυτομετασχηματιστή, γνωστού και ως variac στην αγορά.

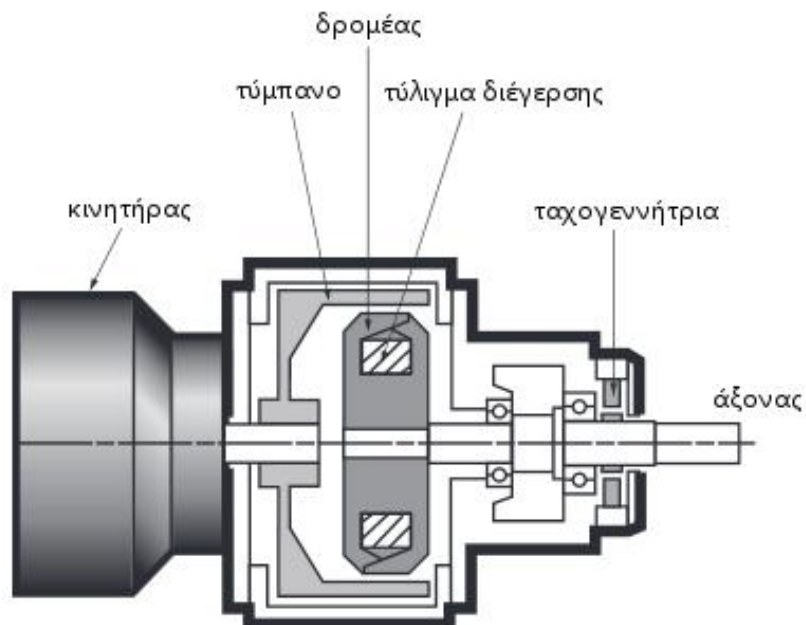
Η μεταβολή στην τάση τροφοδοσίας, δεν μεταβάλλει την σύγχρονη ταχύτητα εφόσον κρατάμε την συχνότητα τροφοδοσίας σταθερή. Όταν ο κινητήρας έχει φορτίο η μεταβολή στην τάση προκαλεί μεταβολή στην ολίσθηση. Όταν μειώσουμε την τάση τροφοδοσίας η ολίσθηση αυξάνεται, παράλληλα όμως για να διατηρηθεί η παρεχόμενη ροπή πρέπει να αυξηθεί το ρεύμα ($\tau = \kappa\Phi I$). Με αυτόν τον τρόπο ενδέχεται να αντιμετωπίσουμε προβλήματα υπερθέρμανσης του κινητήρα. Αν αυξήσουμε την τάση τροφοδοσίας πέρα του 105% της ονομαστικής τιμής, η ολίσθηση θα μικρύνει ελάχιστα. Πρακτικά όμως αυτή η μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί λόγω του φαινομένου του κορεσμού της μηχανής που θα προκαλέσει υπερθέρμανση. Παρακάτω φαίνεται η χαρακτηριστική ροπής ταχύτητας. Όπως σημειώνεται η περιοχή ρύθμισης στροφών είναι αρκετά μικρή. Επίσης ο έλεγχος στροφών μέσω της μεταβολής της τάσης δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός, και χρησιμοποιείται κυρίως σε συστήματα ψύξης, αντλίες, φτερωτές, εξαερισμούς, καθώς η ροπή για αυτές τις εφαρμογές κυμαίνεται σε ικανοποιητικά επίπεδα.



Σχήμα 2.6 Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας, όπου φαίνεται το εύρος ρύθμισης της ταχύτητας με βάση την καμπύλη του φορτίου (διακεκομμένη γραμμή)

2.4 Ηλεκτρομειωτήρας (Eddy current drive/magnetic clutch).

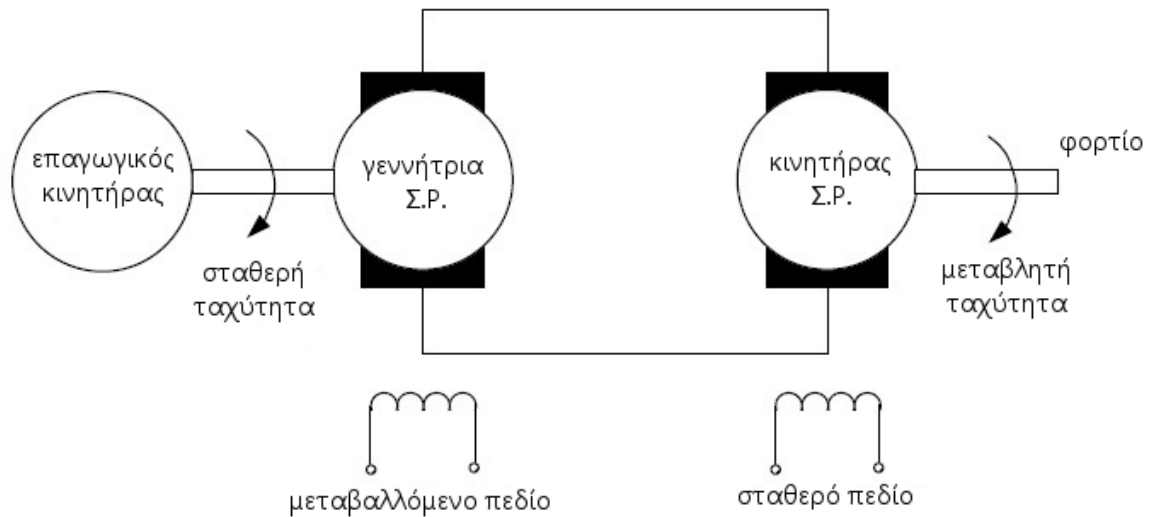
Πρόκειται για μια συσκευή η οποία χρησιμοποιήθηκε στο παρελθόν σε παλάγκο, γερανογέφυρες, αναβατόρια και αποτελείται από ένα τύμπανο (κόμπλερ) που συνδέεται στον άξονα της μηχανής. Στο εσωτερικό το κόμπλερ έχει τον δρομέα, του οποίου το τύλιγμα τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα. Συνεπώς η μετάδοση της κίνησης γίνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικής σύνδεσης, και η ολίσθηση της συσκευής μπορεί να μεταβληθεί μέσω της διέγερσης του δρομέα. Μια ταχογεννήτρια συνδέεται στον άξονα για να είναι δυνατός ο ακριβής έλεγχος των στροφών του κινητήρα. Επειδή αναπτύσσονται μεγάλα ποσά θερμότητας, το κόμπλερ ορισμένες φορές απαιτεί κάποιο σύστημα ψύξης.



Σχήμα 2.7 Ηλεκτρομειωτήρας και τα μέρη που τον απαρτίζουν

2.5 Σύστημα/ζεύγος Ward - Leonard

Επειδή ο έλεγχος των κινητήρων Σ.Ρ. είναι πολύ πιο εύκολος, ο Αμερικάνος Harry Ward Leonard σκέφτηκε να υλοποιήσει το σύστημα που φαίνεται στο σχήμα 2.8. Το σύστημα αυτό αποτελείται από έναν επαγωγικό κινητήρα, μια μηχανικά συνδεδεμένη γεννήτρια Σ.Ρ. και έναν κινητήρα Σ.Ρ. Μέσω της μεταβολής της διέγερσης της γεννήτριας πετυχαίνουμε τον έλεγχο στροφών του κινητήρα Σ.Ρ. Το ζεύγος ή σύστημα Ward – Leonard χρησιμοποιήθηκε κατά το παρελθόν κυρίως σε συστήματα μεγάλης ισχύος όπως ανυψωτικά ορυχείων και μηχανές εφελκυσμού για τον απλό λόγο ότι απαιτείται πολύ μικρό ρεύμα για τον έλεγχο μεγάλης ισχύος μηχανής. Πλέον τα συστήματα αυτά, αν και τα πιο αποδοτικά στο παρελθόν, αντικαταστάθηκαν από τους μετατροπείς συνεχούς ρεύματος, όταν αναπτύχθηκε η τεχνολογία των ημιαγωγών.



Σχήμα 2.8 Σχηματική αναπαράσταση ζεύγους Ward – Leonard

2.6 Μηχανικοί μειωτήρες και υδραυλικά συστήματα

Διάφορα μηχανικά συστήματα έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς που αποσκοπούν στην μετάδοση της κίνησης και στην ρύθμιση της ταχύτητας και χρησιμοποιούνται εκτενώς ακόμα και στις μέρες μας. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν τα συστήματα που αποτελούνται από τροχαλίες, μίαντες, συρματόσχοινα, οδοντωτούς τροχούς (γρανάζια), αλυσίδες κλπ. Η σχέση μετάδοσης μπορεί να προσδιοριστεί ως ο λόγος των διαμέτρων των γραναζιών είτε βάσει των δοντιών τους. Το μεγάλο τους μειονέκτημα είναι ότι χρειάζονται συντήρηση. Τα υδραυλικά συστήματα χρησιμοποιούνται σε εξειδικευμένες εφαρμογές. Έχουν πολύ καλή απόδοση και λόγω της πίεσης που αναπτύσσουν παρέχουν πολύ μεγάλες ροπές. Έχουν και αυτά απαραίτητη συντήρηση και αυξημένο κόστος λόγω των προβλημάτων που παρουσιάζουν αυτού του είδους τα συστήματα.

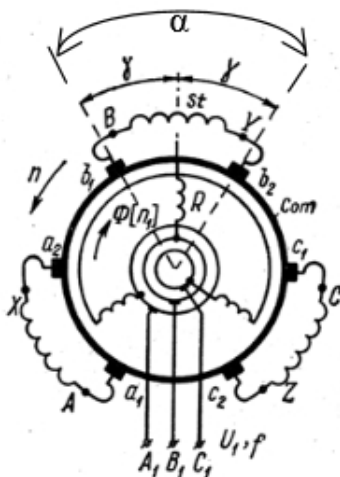


Σχήμα 2.9 Μηχανικός μειωτήρας με γωνιακά γρανάζια για την αλλαγή κατεύθυνσης και την μείωση της ταχύτητας περιστροφής

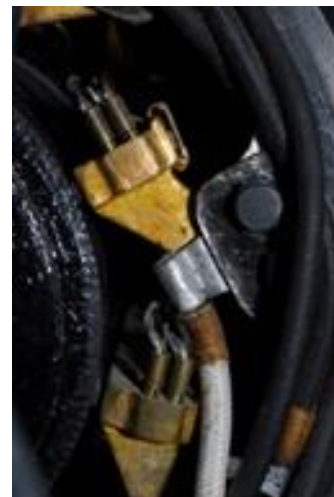
2.7 Κινητήρας Schrage

Ο στάτης ενός κινητήρα Schrage αποτελείται από ένα κανονικό τριφασικό τύλιγμα, ενώ ο δρομέας φέρει ένα τύλιγμα όμοιο με αυτό που φέρουν οι μηχανές Σ.Ρ. το οποίο συνδέεται με τους τομείς του συλλέκτη και ένα δεύτερο τύλιγμα το οποίο τροφοδοτείται από μια τριφασική πηγή (δίκτυο) μέσω δακτυλίων ολίσθησης. Οι ψήκτρες που εφάπτονται του συλλέκτη βρίσκονται τοποθετημένες σε απόσταση 120 ηλεκτρικών μοιρών μεταξύ τους. Άρα ένας 2πολικός κινητήρας έχει 6 ψήκτρες. Εάν τροφοδοτήσουμε το τύλιγμα του στάτη από μια τριφασική πηγή αναπτύσσεται κύμα ΜΕΔ στο διάκενο το οποίο παράγει το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο στρέφεται ως προς τον στάτη με ταχύτητα $n_s = \frac{60f_1}{p}$, κατά τα γνωστά. Προφανώς η ταχύτητα του μαγνητικού πεδίου είναι ίση με την σύγχρονη ταχύτητα που επιβάλλει η συχνότητα του δικτύου f_1 . Από την άλλη η συχνότητα της επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης στο δρομέα είναι η συχνότητα ολίσθησης και ισούται με $f_2 = \frac{p(n_s - n_r)}{60} = sf_1$, όπου n_r η ταχύτητα του δρομέα. Το πλάτος της ΗΕΔ προσδιορίζεται από την σχετική κίνηση του δρομέα ως προς το στρεφόμενο πεδίο.

Η συχνότητα στις ψήκτρες του συλλέκτη είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα του δρομέα και είναι ίση με την συχνότητα στα τυλίγματα του στάτη, ήτοι της πηγής. Εάν θεωρήσουμε τις ψήκτρες ακίνητες και επειδή ο κινητήρας είναι επαγωγικός, στις ψήκτρες θα πάρουμε AC τάση η συχνότητα της οποίας είναι ανεξάρτητη από την συχνότητα του δρομέα και επομένως ίση με την ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Μετατοπίζοντας όμως την θέση των ψηκτρών (γωνία α στο σχήμα 2.10) καταφέρνουμε να αλλάξουμε την γωνιακή συχνότητα του κινητήρα. Η ταχύτητα του δρομέα δίδεται από την σχέση $n_r = \frac{60(f_s - f_r)}{p}$, όπου f_s και f_r οι συχνότητες του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα.



Σχήμα 2.10 Διακρίνεται η γωνία α



Σχήμα 2.11 Οι ψήκτρες του κινητήρα Schrage

Κεφάλαιο 3^ο Εισαγωγή στα ηλεκτρονικά ισχύος και τους κυκλομετατροπείς

Στο 3^ο κατά σειρά κεφάλαιο, θα αναλύσουμε τα διάφορα ηλεκτρονικά ισχύος που χρησιμοποιούνται περισσότερο στην υλοποίηση των οδηγών μεταβαλλόμενης ταχύτητας.

3.1 Δίοδος ισχύος

Η δίοδος ισχύος είναι ένας ημιαγωγός ο οποίος αποτελείται από μια επαφή P-N και έχει 2 ακροδέκτες (τερματικά). Ο ένας καλείται άνοδος και ο άλλος κάθοδος. Όταν η άνοδος είναι θετικότερη της καθόδου η δίοδος είναι πολωμένη ορθά και ως συνέπεια αυτού άγει το ρεύμα. Αντίστοιχα όταν η άνοδος είναι αρνητικότερη της καθόδου η δίοδος είναι πολωμένη ανάστροφα και η δίοδος βρίσκεται σε αποκοπή, συμπεριφέρεται δηλαδή σαν μονωτής. Η χαρακτηριστική καμπύλη της διόδου, που δίνει το ρεύμα I_D που διαρρέει την δίοδο συναρτήσει της τάσης V_D στα άκρα της διόδου φαίνεται στο σχήμα 3.1. Η μαθηματική σχέση που περιγράφει την δίοδο είναι

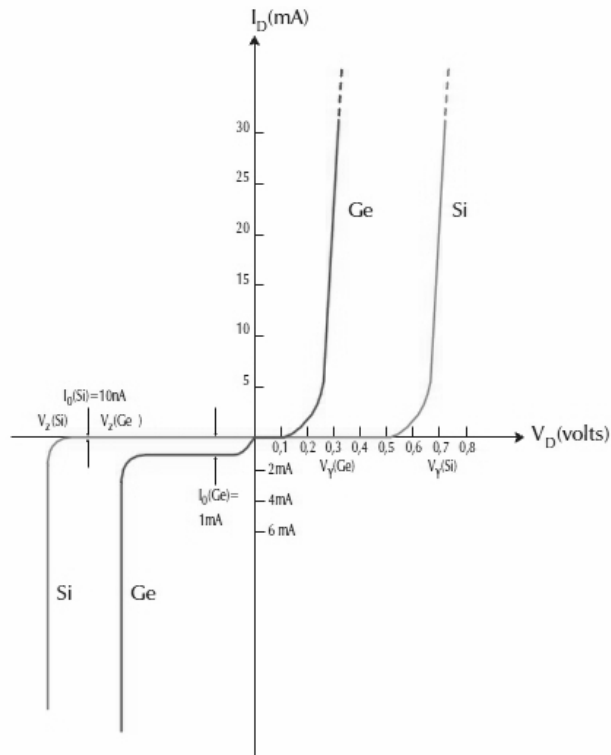
$$I_D = I_o (e^{\frac{qV_D}{nkT}} - 1), \text{ όπου :}$$

q το φορτίο του ηλεκτρονίου, ήτοι $1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb,

n μια σταθερά,

k η σταθερά Boltzman και

T η απόλυτη θερμοκρασία.



Σχήμα 3.1 Η χαρακτηριστική καμπύλη διόδου (Si και Ge)

Η διάδος όμως έχει 2 μειονεκτήματα που πρέπει να πάρουμε σοβαρά υπόψη όταν σχεδιάζουμε ένα κύκλωμα,

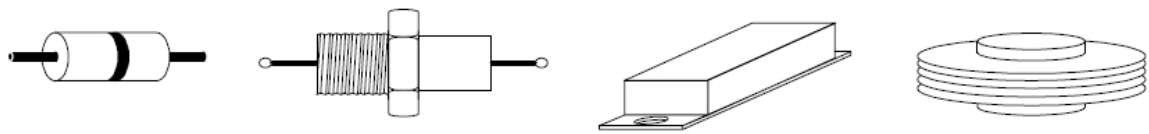
- Καθώς η διάδος εισάγει αντίσταση στο κύκλωμα έχουμε πτώση τάσης πάνω της 0.2-1.0 V σε κατάσταση αγωγής, αυτό έχει ως συνέπεια ο ημιαγωγός να έχει μια κρίσιμη τιμή για το μέγιστο ρεύμα που αντέχει ώστε να μην υπερθερμανθεί.

Η αντίσταση σώματος της διόδου υπολογίζεται από τον τύπο $r_B = \frac{dV_D}{dI_D}$.

- Κατά την ανάστροφη πόλωση η διάδος έχει ένα μικρό ρεύμα διαρροής καθώς επίσης και συγκεκριμένη αντοχή σε ορισμένη τάση, πέρα από την οποία η διάδος καταστρέφεται μέσω του φαινομένου της χιονοστιβάδας (avalanche breakdown). Πολλές φορές η τάση που καταστρέφεται η διάδος είναι γνωστή σαν V_{zener} .

Η κύρια χρήση της διόδου είναι σε ανορθωτικές διατάξεις γνωστές σαν γέφυρες ανόρθωσης (για την μετατροπή του AC σε DC) αλλά και σαν διάδος ελεύθερης ροής –κυκλώματα snubber- (free wheeling diode) με σκοπό να παρέχει έναν δρόμο για τα επαγωγικά ρεύματα του φορτίου ώστε να αποκλεισθεί η περίπτωση της ανάπτυξης μεγάλων επαγωγικών τάσεων (inductive kick-back voltages).

Υπάρχουν διάφορες συσκευασίες της διόδου ισχύος αναλόγως την ισχύ της εφαρμογής και την απαγωγή θερμότητας που χρειαζόμαστε. Οι κυριότερες φαίνονται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2 Αναπαράσταση διάφορων συσκευασιών διόδων που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία

3.2 Θυρίστορ

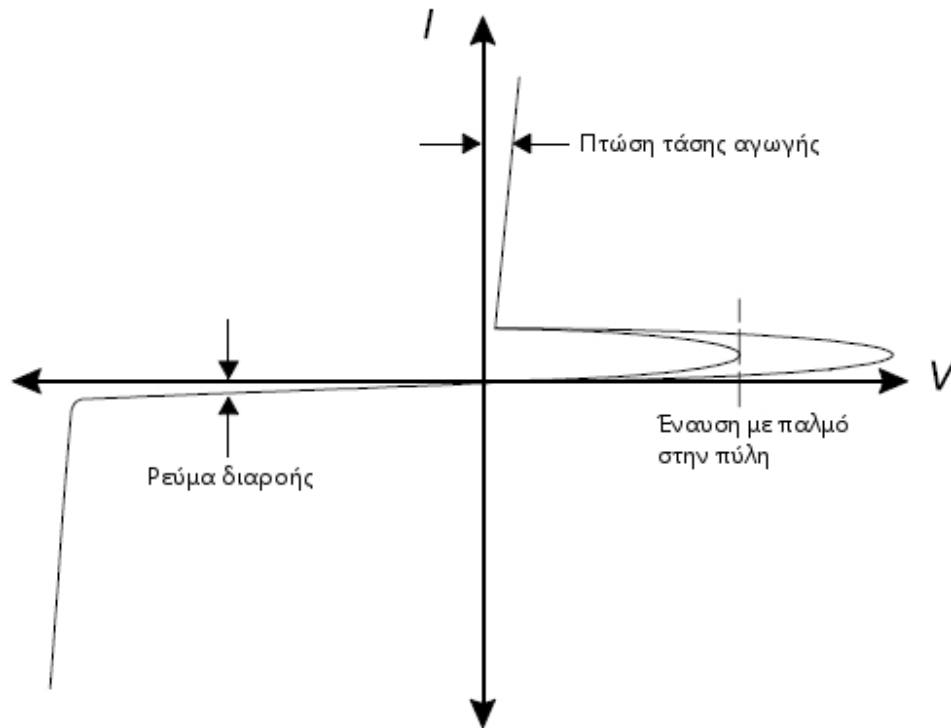
Τα θυρίστορ αποτελούνται από 4 στρώματα πυριτίου p και n τύπου, σχηματίζοντας έτσι 3 επαφές pn. Το θυρίστορ έχει 3 ακροδέκτες, τον ακροδέκτη ελέγχου που καλείται πύλη (gate), και δύο ακροδέκτες ισχύος που καλούνται άνοδος και κάθοδος. Η άνοδος και η κάθοδος παρόμοια με την διόδο συνδέονται σε σειρά με το φορτίο και διαχειρίζονται τα ρεύματα. Η λειτουργία των θυρίστορ είναι παρόμοια με εκείνη της διόδου ισχύος, μόνο που για να άγει το θυρίστορ πρέπει να του δώσουμε κατάλληλο παλμό στην πύλη. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα του θυρίστορ είναι ότι δεν μπορούμε να το οδηγήσουμε σε αποκοπή από την πύλη. Η χαρακτηριστική του θυρίστορ φαίνεται στο σχήμα 3.3.

Τρόποι κατά τους οποίους μπορούμε να οδηγήσουμε το θυρίστορ σε αγωγή είναι :

- Θετικός παλμός στην πύλη. Είναι ο πιο συνηθισμένος και φυσιολογικός τρόπος έναυσης ενός θυρίστορ.
- Μεγάλη τάση. Μια μεγάλη τάση στα άκρα του θυρίστορ μπορεί να προκαλέσει την ροή ενός αρκετά μεγάλου ρεύματος διαρροής με αποτέλεσμα το θυρίστορ να μπει σε αγωγή.
- Η απότομη μεταβολή της τάσης dV/dt . Μεγάλο dV/dt μπορεί και αυτό να προκαλέσει την αγωγή του θυρίστορ, ωστόσο πολλές φορές όταν αυτό συμβαίνει το ημιαγωγό στοιχείο καταστρέφεται.

Τα θυρίστορ πρέπει να διαλέγονται ανάλογα με την εφαρμογή και να γίνεται εκτενής μελέτη κατά την επιλογή τους. Μερικά χαρακτηριστικά που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι :

- Η τάση κορυφής ορθής φοράς (Peak forward voltage), αναφέρεται στην τάση που πρέπει να αντέχει το στοιχείο χωρίς να μπει σε κατάσταση αγωγής και χωρίς να καταστραφεί.
- Η απότομη μεταβολή της τάσης dV/dt (Rate of rise of forward voltage dV/dt), επειδή οι ζώνες του θυρίστορ περιέχουν παρασιτικές χωρητικότητες όταν ο λόγος dV/dt είναι μεγάλος τότε το ρεύμα $I = C \frac{dV}{dt}$ μπορεί να προκαλέσει την τοπική υπερθέρμανση του στοιχείου. Η τιμή του λόγου dV/dt πρέπει να κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα, της τάξης των 200 V/μsec. Παράλληλα στο διακοπτικό στοιχείο συνίσταται η χρήση κυκλώματος snubber.
- Η απότομη μεταβολή του ρεύματος di/dt (Rate of rise of anode current di/dt). Η μεταβολή του λόγου di/dt δεν πρέπει να είναι ιδιαίτερα μεγάλο, τυπική τιμή είναι τα 100 A/μsec. Αυτό συμβαίνει διότι το ρεύμα συγκεντρώνεται τοπικά στην πύλη και δεν απλώνεται σε όλη την επιφάνεια αγωγής του στοιχείου, προκαλώντας έτσι υπερθέρμανση που πολλές φορές οδηγεί στην καταστροφή του στοιχείου.
- Ρεύμα συγκράτησης (Holding current), πρόκειται για το ελάχιστο ρεύμα κατά το οποίο θεωρούμε ότι το θυρίστορ είναι σε αποκοπή,
- Ρεύμα μανδάλωσης (Latching current), πρόκειται για το ελάχιστο ρεύμα που χρειάζεται για να μένει το θυρίστορ σε αγωγή. Έχει συνήθως υψηλότερη τιμή από το ρεύμα συγκράτησης και είναι μείζονος σημασίας καθώς ο παλμός στην πύλη ενδέχεται να είναι μικρής διάρκειας.
- Χαρακτηριστικά πύλης (Gate triggering requirements). Ένας σχετικά μικρός παλμός της τάξης των 100mA/10μsec είναι ικανός να οδηγήσει το θυρίστορ σε αγωγή. Στην πράξη όμως χρησιμοποιούμε θυρίστορ με μεγαλύτερες τιμές ρεύματος ειδικά σε περιβάλλοντα με μεγάλη θερμοκρασία, λόγω του γεγονότος ότι το θυρίστορ μπορεί να μπει ακούσια σε αγωγή επιφέροντας προβλήματα.



Σχήμα 3.3 Η χαρακτηριστική καμπύλη του SCR (θυρίστορ)

3.3 Τρανζίστορ Ισχύος (Power transistor)

Διπολικό τρανζίστορ επαφής (Bipolar Junction Transistor – BJT)

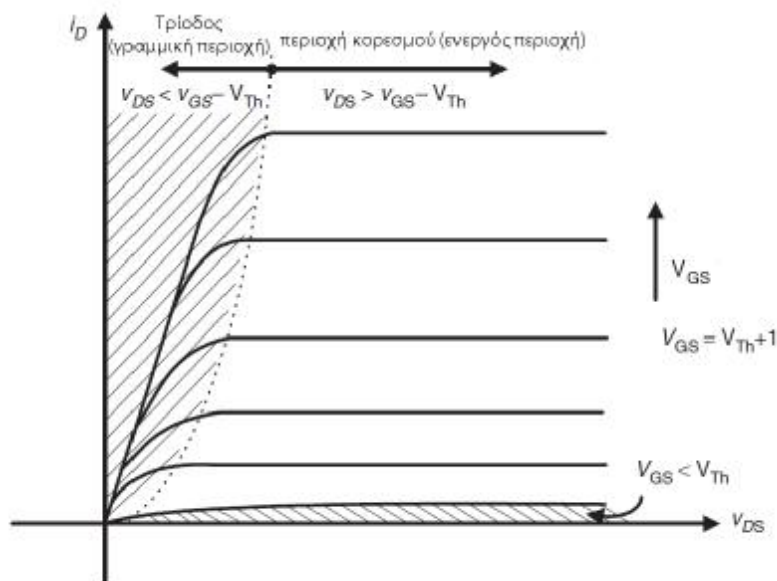
Γνωστό και σαν ενισχυτής σήματος. Αποτελεί ένα από τα πιο δημοφιλή διακοπτικά στοιχεία, γεγονός που οφείλεται στην ευκολία έναυσης και σβέσης του, με εφαρμογή ή αποκοπή σήματος

στην βάση. Το μεγάλο του μειονέκτημα είναι ότι δεν μπορούν να υφίστανται μεγάλες αναστροφές τάσεις πάνω του, γεγονός που αποκλείει την χρήση του σε εφαρμογές διαμόρφωσης ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος, εκτός αν συνδιαστούν με κύκλωμα με διόδους σε σειρά. Η διακοπτική του ικανότητα είναι μεγάλη καθώς επιτρέπει συχνότητες έως και δεκαπλάσιες από αυτές των θυρίστορ, αλλά υστερεί στην ισχύ που μπορεί να διαχειριστεί. Έτσι βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε αντιστροφείς και μετατροπής μικρής ισχύος.

MOSFET

Αντίθετο με τα BJT τα MOSFET ανήκουν στην κατηγορία των μονοπολικών τρανζίστορ καθώς χρησιμοποιούν μόνο τους φορείς πλειονότητας όταν άγουν. Τα mosfet έχουν 3 ηλεκτρόδια - ακροδέκτες - την πύλη την εκροή και την πηγή. Στο σχήμα 3.4 φαίνεται η χαρακτηριστική i-v.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημά του είναι ότι έχει μεγάλη αντίσταση εισόδου, άρα η πύλη του ελέγχεται με την τάση παρά με το ρεύμα. Η λειτουργία τους είναι παρόμοια με τα BJT καθώς επιτρέπουν και αυτά μεγάλες συχνότητες λειτουργίας και μικρή διαχείριση ισχύος. Λόγω της μεγάλης ταχύτητας σε συνδυασμό με τους μικρούς χρόνους έναυσης-σβέσης που έχουν είναι ιδανικά για εφαρμογές όπως σε διακοπτικά τροφοδοτικά (SMPS), επαγωγική θέρμανση, ηλεκτροσυγκόλληση, διαμόρφωση εύρους παλμού κ.ο.κ.

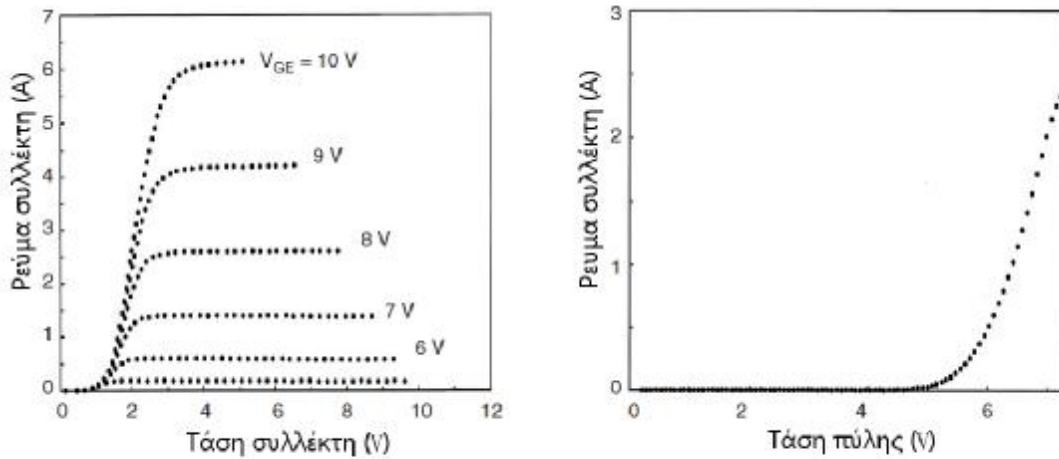


Σχήμα 3.4 Η χαρακτηριστική καμπύλη του MOSFET

Διπολικό τρανζίστορ μονωμένης πύλης - IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

Το IGBT συνδιάζει τα χαρακτηριστικά του MOSFET και του BJT. Η λειτουργία του στηρίζεται στην έναυση του στοιχείου με την εφαρμογή θετικής τάσης στην πύλη, ενώ με την αφαίρεση τούτης επέρχεται η σβέση του. Η συχνότητα που μπορεί να λειτουργήσει το IGBT είναι της τάξης των 50kHz και η ισχύ μερικά kW. Τείνει να αντικαταστήσει τα BJT καθώς είναι πιο εύκολο στην οδήγηση. Τα IGBT χρησιμοποιούνται έναντι των MOSFET σε εφαρμογές υψηλής

τάσης με λιγότερες απώλειες. Επίσης αποτελούνται από λιγότερο πυρίτιο πράγμα το οποίο οδηγεί στην φθηνότερη κατασκευή τους. Η χαρακτηριστική του IGBT φαίνεται στο σχήμα 3.5. Χρησιμοποιείται στα περισσότερα ινβέρτες που κυκλοφορούν στην αγορά.



Σχήμα 3.5 Χαρακτηριστική αγωγής και χαρακτηριστική μεταφοράς IGBT

Άλλα ημιαγωγά στοιχεία.

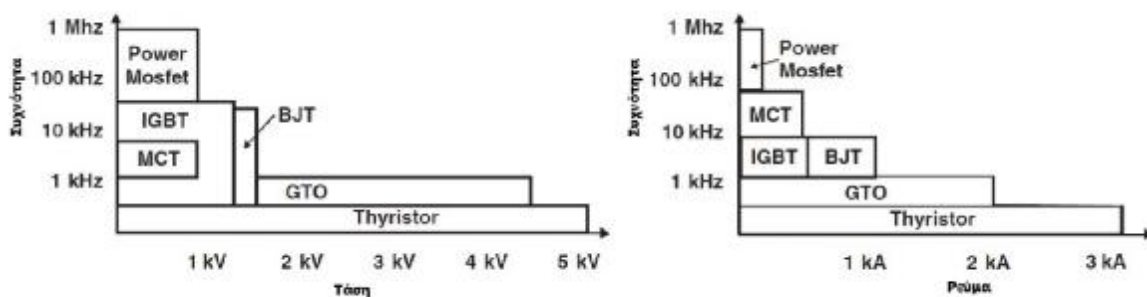
Τα παραπάνω ημιαγωγά στοιχεία που ανήκουν στα ηλεκτρονικά ισχύος είναι τα πλέον διαδεδομένα και τα περισσότερο κατάλληλα για την ροή της εργασίας. Σαφώς υπάρχουν και άλλα στοιχεία τα οποία θα αναφερθούν απλά επιγραμματικά χωρίς να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στην λειτουργία τους. Μερικά από αυτά είναι :

SIT (static induction transistor), με χαρακτηριστικά παρόμοια του mosfet αλλά ικανό να διαχειριστεί μεγαλύτερη ισχύ σε μικρότερες όμως συχνότητες

SITH (static induction thyristor), συνδυάζει την λειτουργία του θυρίστορ και της διόδου. Βρίσκεται μόνιμα σε αγωγή και η σβέση του επιτυγχάνεται με την εφαρμογή αρνητικής τάσης στην πύλη για όση ώρα επιθυμούμε την σβέση του.

MCT (MOS controlled Thyristor), ο συνδυασμός του GTO με δύο MOSFET. Συνδυασμός ο οποίος επιτρέπει στο στοιχείο την έναυση με μικρότερη ισχύ, όπως και την μεγαλύτερη διακοπτική ταχύτητα. Ενώ η συχνότητά του συγκρίνεται με αυτή του IGBT τούτο (MCT) υπερτερεί έναντι του IGBT αφού έχει μικρότερη πτώση τάσης σε αγωγή. Το βασικό μειονέκτημα του, είναι η μικρή ικανότητα αντοχής σε ανάστροφες τάσεις αλλά σιγά σιγά κερδίζει έδαφος στην χρήση του.

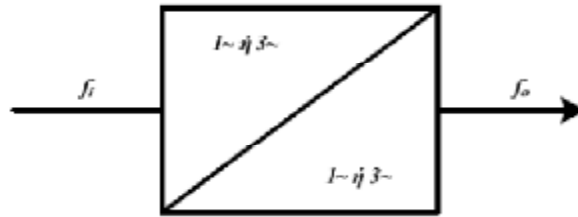
Εκτός από τα αναφερθέντα στοιχεία στην οικογένεια των Thyristor εντάσσονται πολλά ακόμα εξειδικευμένα στοιχεία όπως το photothyristor, το Quadrac, το RCT, το CSMT κλπ.



Σχήμα 3.6 Τα κυριότερα διακοπτικά στοιχεία ισχύος και οι συχνότητες λειτουργίας τους.

3.4 ΚΥΚΛΟΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ

Ένας κυκλομετατροπέας μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση εισόδου του σε εναλλασσόμενη τάση στην έξοδό του, αλλά διαφορετικής συχνότητας, χωρίς να απαιτείται ενδιάμεση βαθμίδα μετατροπής της τάσης σε συνεχή (σχήμα 3.7). Η αρχή λειτουργίας αυτού του μετατροπέα αναπτύχθηκε στις αρχές του 1930, με χρησιμοποίηση υδραργυρικών διακοπτικών στοιχείων, με έλεγχο από την τάση του δικτύου.



Σχήμα 3.7. Δομικό διάγραμμα κυκλομετατροπέα

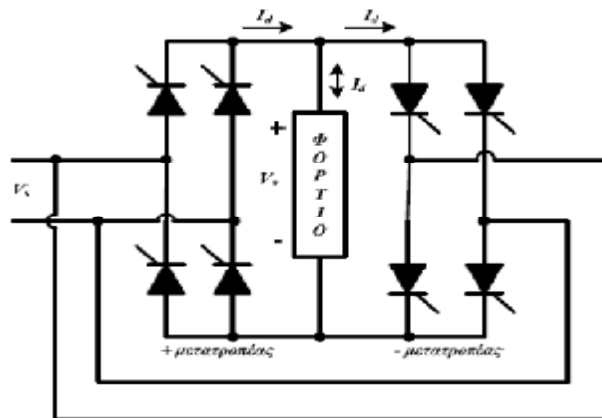
Οι κυκλομετατροπείς σήμερα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μεγάλης ισχύος, τόσο για τον έλεγχο της λειτουργίας σύγχρονων ηλεκτρικών κινητήρων, όσο και σε συστήματα για τη ρύθμιση της συχνότητας της τάσης διαφόρων πηγών ισχύος (συσσωρευτές, φωτοβολταϊκές γεννήτριες, κυψέλες καυσίμου, κ.λπ.) προκειμένου αυτές να διασυνδεθούν σε δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος.

Για να καταλάβουμε την αρχή λειτουργίας του κυκλομετατροπέα, θα ξεκινήσουμε με τον απλούστερο, από μονοφασικό σε μονοφασικό (1φ-1φ) κυκλομετατροπέα.

3.4.1 Κυκλομετατροπείς ελέγχου φάσης (phase-controlled)

3.4.1.1 Κυκλομετατροπέας από μονοφασικός σε μονοφασικό (1φ-1φ)

Αυτός ο κυκλομετατροπέας αποτελείται από μια αντιπαράλληλη σύνδεση δύο κυκλωμάτων ανορθωτών γέφυρας (σχήμα 3.8).

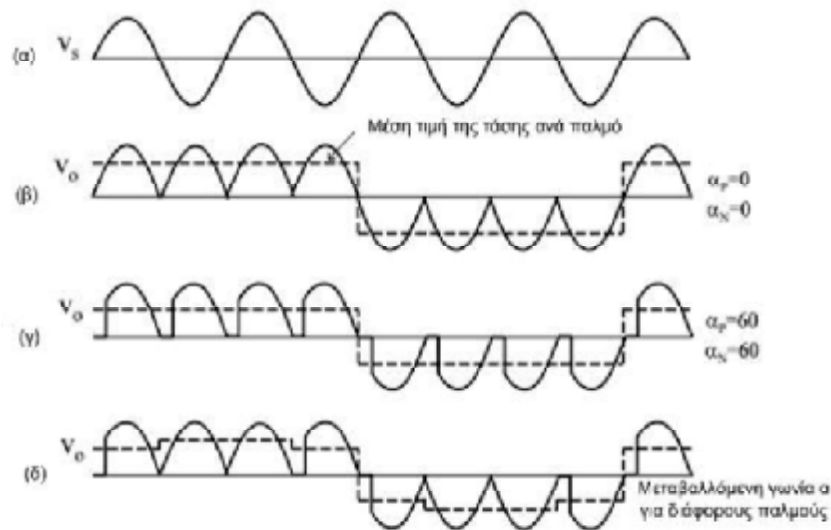


Σχήμα 3.8 Κυκλομετατροπέας από μονοφασικό σε μονοφασικό (1φ-1φ)

Στο σχήμα 3.9 παρουσιάζονται οι κυματομορφές του παραπάνω κυκλομετατροπέα με ωμικό φορτίο. Η τάση εισόδου V_s είναι εναλλασσόμενη στη συχνότητα f_1 , όπως δείχνει το σχήμα 3α. Οι κυματομορφές αυτές έχουν παραχθεί για διάφορες γωνίες έναυσης των θυρίστορ. Σημειώνεται ότι οι γωνίες έναυσης συμβολίζονται με α_p για το θετικό μετατροπέα (ανορθωτή) και με α_n για τον αρνητικό.

Κατά τις δύο πρώτες περιόδους της τάσης εισόδου V_s , λειτουργεί ο θετικός μετατροπέας, ο οποίος ανορθώνει την τάση εισόδου, παρέχοντας ηλεκτρικό ρεύμα στο φορτίο. Η τάση εξόδου

αποτελείται από τέσσερις θετικές ημιπεριόδους της τάσης εισόδου (σχήμα 3.9(β)). Κατά τις επόμενες δύο περιόδους της τάσης εισόδου λειτουργεί ο αρνητικός μετατροπέας, ο οποίος τροφοδοτεί το φορτίο με ρεύμα, αλλά με αντίθετη φορά. Οι κυματομορφές του ρεύματος είναι ίδιες με αυτές της τάσης, αφού το φορτίο είναι ωμικό. Σημειώνεται ότι όταν λειτουργεί ο ένας μετατροπέας, ο άλλος δεν λειτουργεί, κι έτσι δεν κυκλοφορεί ρεύμα μεταξύ των δύο μετατροπέων.



Σχήμα 3.9 Κυματομορφές κυκλομετατροπέα από μονοφασικό σε μονοφασικό (1φ-1φ)

- (α) Τάση εισόδου
- (β) Τάση εξόδου για μηδενική γωνία έναυσης
- (γ) Τάση εξόδου για γωνία έναυσης $\pi/3$
- (δ) Τάση εξόδου για μεταβαλλόμενη γωνία έναυσης

Η συχνότητα της τάσης εξόδου v_o είναι τέσσερις φορές μικρότερη από αυτή της τάσης εισόδου v_s , δηλαδή $f_o/f_i = 1/4$. Επομένως, αυτός είναι ένας κυκλομετατροπέας υποβιβασμού της συχνότητας. Ο κυκλομετατροπέας αυτός μπορεί να λειτουργεί αμφίδρομα, οπότε κατά την ανάστροφη λειτουργία, η συχνότητα της τάσης εξόδου θα είναι τέσσερις φορές μεγαλύτερη από αυτή της τάσης εισόδου, δηλαδή $f_o/f_i = 4$. Στην περίπτωση αυτή ονομάζεται κυκλομετατροπέας ανύψωσης της συχνότητας. Η συχνότητα f_o της τάσης εξόδου v_o μπορεί να αλλάζει με μεταβολή του αριθμού των κύκλων λειτουργίας του θετικού και του αρνητικού μετατροπέα και θα είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας f_i της τάσης εισόδου, σε έναν 1φ-1φ κυκλομετατροπέα. Η μέση τιμή (dc) της τάσης εξόδου (σχήμα 3.9(β), (γ) με διακεκομμένη γραμμή) για κάθε ανορθωτή δίνεται από τη σχέση :

$$V_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi \cdot V} \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

όπου, V_d είναι η τιμή της τάσης εισόδου.

Επίσης η μέγιστη τιμή της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας της τάσης εξόδου είναι :

$$V_{O1} = \frac{4/\pi \cdot 2\sqrt{2}}{\pi \cdot V \cdot \cos \alpha} \quad (2)$$

Από τη σχέση (2) προκύπτει ότι η θεμελιώδης αρμονική συνιστώσα της τάσης εξόδου εξαρτάται από την τιμή της γωνίας έναυσης α .

$$\text{Για } \alpha=0^\circ, V_{O1}=V_{do} \cdot 1=V_{do}, \text{ όπου } V_{O1} = \frac{4/\pi \cdot 2\sqrt{2}}{\pi \cdot V}$$

Για $\alpha=\pi/3$, όπως στο σχήμα 3.9 (γ), τότε : $V_{O1}=V_{do} \cdot 0.5$

Επομένως, η τιμή της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας της τάσης εξόδου μπορεί να ελεγχθεί με μεταβολή της γωνίας έναυσης α . Η λειτουργία με σταθερή γωνία έναυσης α δίνει μια κυματομορφή της τάσης εξόδου με πολλές αρμονικές συνιστώσες. Στα σχήματα 3.9 (β) και (γ) φαίνεται με διακεκομμένες γραμμές ότι η τάση εξόδου είναι τετραγωνικός παλμός. Αν ο τετραγωνικός παλμός τροποποιούνταν, ώστε να μοιάζει περισσότερο με ημιτονοειδή κυματομορφή, τότε θα μειώνονταν οι αρμονικές συνιστώσες. Για το λόγο αυτό η κυματομορφή της τάσης εξόδου διαμορφώνεται όπως στο σχήμα 3.9 (δ), όπου η τεσσάρων επιπέδων κυματομορφή (διακεκομμένη γραμμή) μοιάζει περισσότερο με ημιτονοειδή και περιέχει λιγότερες αρμονικές.

3.4.1.2 Κυκλομετατροπείας από τριφασικός σε μονοφασικό (3φ-1φ)

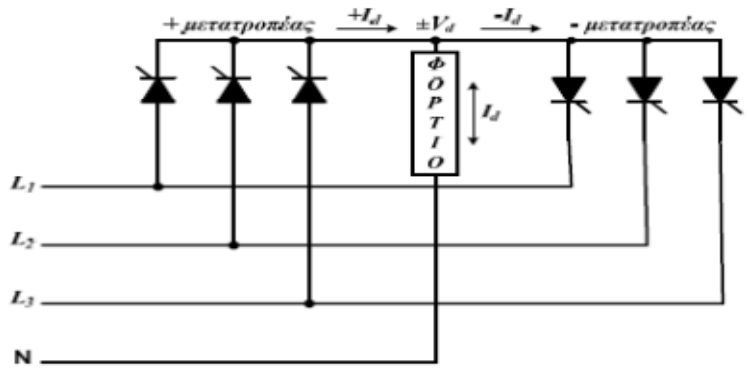
Υπάρχουν δύο είδη σε αυτόν τον τύπο κυκλομετατροπείας :

- α) Κυκλομετατροπείας ημιγέφυρας ή μισού κύματος (σχήμα 3.10) και
- β) Κυκλομετατροπείας πλήρους γέφυρας (σχήμα 3.11).

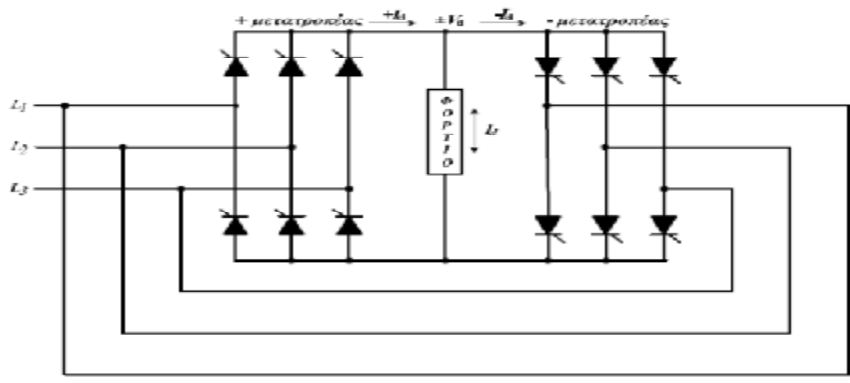
Όπως στην περίπτωση του 1φ-1φ κυκλομετατροπείας, έτσι και στον 3φ-1φ εφαρμόζεται μια ανορθωμένη τάση στο φορτίο. Και οι δύο ανορθωτές (και ο θετικός και ο αρνητικός) μπορούν να παράγουν τάσεις είτε θετικής είτε αρνητικής πολικότητας, αλλά ο θετικός ανορθωτής μπορεί να τροφοδοτεί το φορτίο μόνο με θετικό ρεύμα και ο αρνητικός ανορθωτής μόνο με αρνητικό ρεύμα. Κατά συνέπεια, ο κυκλομετατροπείας μπορεί να λειτουργεί σε τέσσερα τεταρτημόρια :

(+v, +i), (-v, -i) κατά τις φάσεις ανόρθωσης και (+v, -i), (-v, +i) κατά τις φάσεις αντιστροφής.

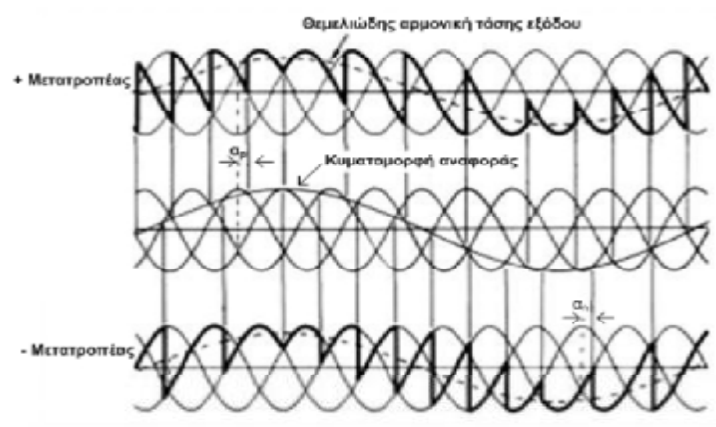
Στο σχήμα 6 παρουσιάζονται οι κυματομορφές τόσο της τάσης εξόδου, όσο και της θεμελιώδους αρμονικής της τάσης εξόδου.



Σχήμα 3.10 3φ-1φ κυκλομετατροπέας ημιγέφυρας ή μισού κύματος



Σχήμα 3.11. 3φ-1φ κυκλομετατροπέας πλήρους γέφυρας



Σχήμα 3.11 Κυματομορφές 3φ-1φ κυκλομετατροπέα ημιγέφυρας

Η γωνία έναυσης για το θετικό μετατροπέα συμβολίζεται με α_P , και αυτή του αρνητικού μετατροπέα συμβολίζεται με α_N . Η πολικότητα του ρεύματος καθορίζει εάν ο θετικός ή ο

αρνητικός μετατροπέας παρέχει ισχύ στο φορτίο. Όταν η πολικότητα του ρεύματος αλλάζει, ο μετατροπέας που παρείχε προηγουμένως ρεύμα τίθεται εκτός λειτουργίας και ο άλλος ενεργοποιείται. Κατά τη διάρκεια της αντιστροφής της πολικότητας του ρεύματος, η μέση τάση που παρέχεται και από τους δύο μετατροπείς πρέπει να είναι ίση, ώστε να μη διαταράσσεται η συνέχεια της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης στο φορτίο. Διαφορετικά, η μεταπήδηση από τον έναν μετατροπέα στον άλλο θα προκαλούσε μια ανεπιθύμητη απότομη αύξηση της τάσης. Για να αποτραπεί αυτό το πρόβλημα, οι μετατροπείς αναγκάζονται να παραγάγουν πάντα την ίδια μέση τάση. Κατά συνέπεια, πρέπει να ικανοποιείται η παρακάτω σχέση για τις γωνίες έναυσης:

$$aP + aN = \pi. \quad (3)$$

Η θεμελιώδης αρμονική συνιστώσα της τάσης εξόδου στο σχήμα 6 δίνεται από τη σχέση :

$$V_{o1}(t) = \sqrt{2} \cdot V_o \cdot \sin\omega_o t \quad (4)$$

Όπου, V_o είναι η ενεργός τιμή της θεμελιώδους αρμονικής της τάσης εξόδου.

Τη χρονική στιγμή t_o , η V_o δίνεται από τη σχέση :

$$V_{o1}(t_o) = \sqrt{2} \cdot V_o \cdot \sin\omega_o t_o \quad (5)$$

Ο θετικός μετατροπέας μπορεί να παρέχει αυτήν την τάση εάν η aP ικανοποιεί την παρακάτω σχέση :

$$V_{o1}(t_o) = \sqrt{2} \cdot V_o \cdot \sin\omega_o t_o = Vd_o \cdot \cos aP \quad (6)$$

$$\text{Όπου, } Vd_o = \frac{\sqrt{2} \cdot V_o \cdot P}{\pi \cdot \sin(\pi/p)}$$

($p=3$ για μετατροπέα μισού κύματος και 6 για μετατροπέα γέφυρας)

Από τις σχέσεις (3) και (6) προκύπτει η σχέση :

$$V_o = Vd_o \cdot \cos aP = -Vd_o \cdot \sin aN \quad (7).$$

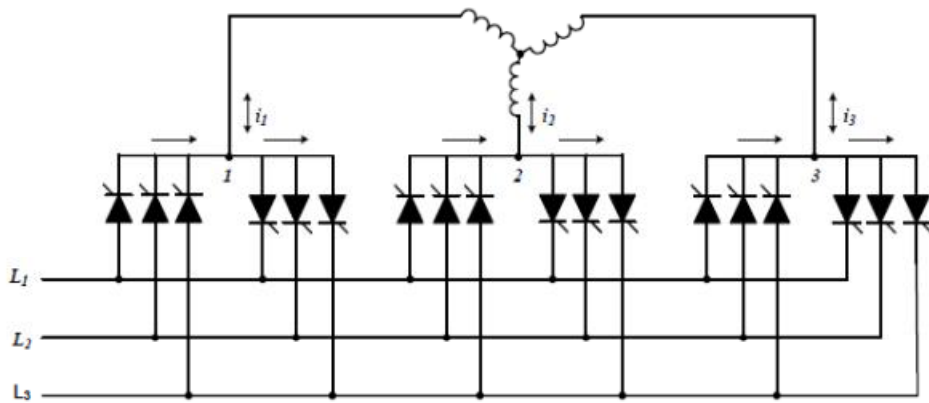
Οι γωνίες έναυσης μπορούν να υπολογιστούν οποιαδήποτε στιγμή από τις σχέσεις (6) και (7).

Η λειτουργία του 3φ-1φ κυκλομετατροπέα γέφυρας είναι παρόμοια με αυτή του παραπάνω 3φ-1φ μισού κύματος κυκλομετατροπέα, με τη διαφορά ότι σ' αυτή την περίπτωση οι παλμοί είναι έξι.

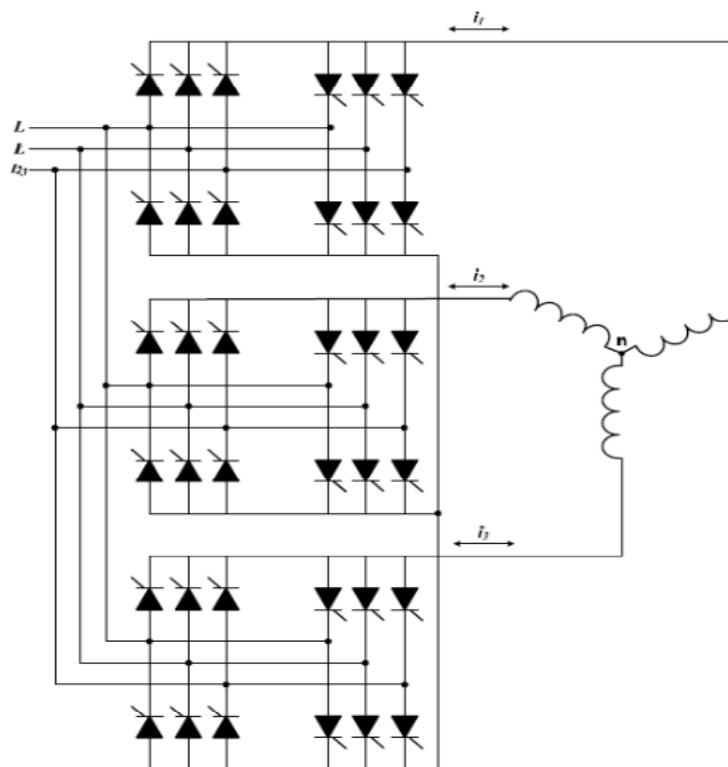
3.4.1.3 Κυκλομετατροπέας από τριφασικός σε τριφασικό (3φ-3φ)

Αν οι έξοδοι τριών ίδιων 3φ-1φ κυκλομετατροπέων συνδεθούν κατά αστέρα ή κατά τρίγωνο και οι τάσεις εξόδου έχουν διαφορά φάσης $2\pi/3$ μεταξύ τους, τότε προκύπτει ένας κυκλομετατροπέας από τριφασικός σε τριφασικό (3φ-3φ). Στο σχήμα 3.12 παρουσιάζεται ένας 3φ-3φ κυκλομετατροπέας ημιγέφυρας (ή μισού κύματος), ο οποίος προέκυψε από τη σύνδεση τριών κυκλομετατροπέων 3φ-1φ ημιγέφυρας σε σύνδεση αστέρα. Στο σχήμα 3.13 παρουσιάζεται ένας 3φ-3φ κυκλομετατροπέας γέφυρας, ο οποίος προέκυψε από τη σύνδεση τριών κυκλομετατροπέων 3φ-1φ γέφυρας σε σύνδεση αστέρα. Ο κυκλομετατροπέας 3φ-3φ

ημιγέφυρας λέγεται και τριών παλμών, ενώ ο κυκλομετατροπέας 3φ-3φ γέφυρας λέγεται και έξι παλμών. Η ανάλυση της λειτουργίας του 3φ-3φ κυκλομετατροπέα σε κάθε φάση είναι ίδια με αυτή που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα.



Σχήμα 3.12 3φ-3φ κυκλομετατροπέας ημιγέφυρας



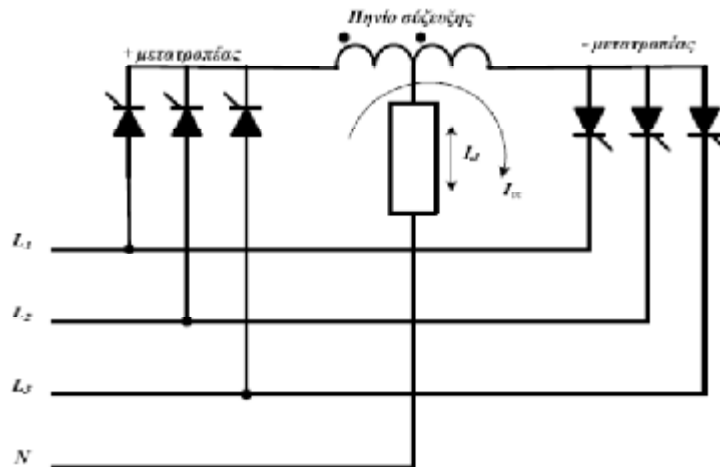
Σχήμα 3.13 3φ-3φ κυκλομετατροπέας γέφυρας

Αρμονικές συνιστώσες

Οι κυκλομετατροπείς παράγουν πολλές αρμονικές τάσεις στην έξοδο. Οι ανώτερες αρμονικές φιλτράρονται συνήθως από την αυτεπαγωγή μηχανών, επομένως το ρεύμα των μηχανών έχει λιγότερες αρμονικές. Οι υπόλοιπες αρμονικές προκαλούν απώλειες. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην τοπολογία του κυκλομετατροπέα, αντίθετα με τους άλλους μετατροπείς, δεν υπάρχει πηνίο ή πυκνωτής, δηλαδή στοιχείο αποθήκευσης ενέργειας, γι' αυτό το λόγο, η στιγμιαία ισχύς εισόδου και η ισχύς εξόδου είναι ίσες. Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν το αρμονικό περιεχόμενο των κυματομορφών. Κατά τη λειτουργία τύπου διακοπής παράγονται πιο πολλές αρμονικές απ' ό,τι κατά τη λειτουργία τύπου κυκλικού ρεύματος, λόγω της μηδενικής παραμόρφωσης του ρεύματος. Εκτός αυτού, ο αριθμός των παλμών επηρεάζει το αρμονικό περιεχόμενο. Μεγαλύτερος αριθμός παλμών έχει μικρότερο αρμονικό περιεχόμενο. Επομένως, ένας 6-παλμών (γέφυρας) κυκλομετατροπέας παράγει λιγότερες αρμονικές από έναν 3-παλμών (ημιγέφυρας) κυκλομετατροπέα. Επιπλέον, εάν η συχνότητα εξόδου είναι πιο κοντά στη συχνότητα εισόδου, οι αρμονικές αυξάνονται. Τέλος, ο χαμηλός συντελεστής ισχύος και η διακοπόμενη αγωγή συμβάλλουν στη δημιουργία αρμονικών.

3.4.2 Λειτουργία τύπου διακοπής και λειτουργία τύπου κυκλικού ρεύματος

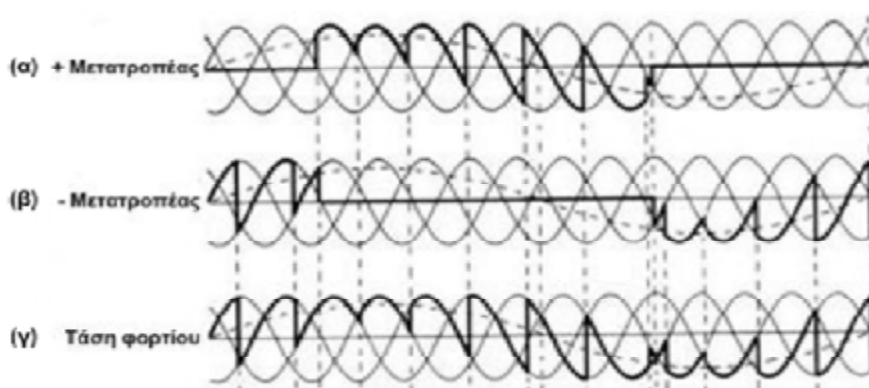
Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η πολικότητα του ρεύματος καθορίζει εάν ο θετικός ή ο αρνητικός μετατροπέας παρέχει ισχύ στο φορτίο. Όταν το ρεύμα είναι θετικό, ο θετικός μετατροπέας (ανορθωτής) παρέχει την απαιτούμενη τάση στο φορτίο και ο αρνητικός είναι απενεργοποιημένος. Αντίστροφα, όταν το ρεύμα είναι αρνητικό, ο αρνητικός μετατροπέας παρέχει την απαιτούμενη τάση στο φορτίο και ο θετικός είναι απενεργοποιημένος. Αυτή η λειτουργία λέγεται λειτουργία διακοπής και οι κυκλομετατροπείς που χρησιμοποιούν αυτή τη διαδικασία λέγονται τύπου διακοπής. Ωστόσο, εάν για οποιονδήποτε λόγο και οι δύο μετατροπείς είναι ενεργοποιημένοι, τότε γίνεται βραχυκύκλωμα. Για να αποφευχθεί αυτό το βραχυκύκλωμα, μπορεί να τοποθετηθεί ένα πηνίο σύζευξης (Inter-Group Reactor, IGR) μεταξύ των μετατροπέων όπως φαίνεται στο σχήμα 9. Αντί να απενεργοποιούνται οι μετατροπείς κατά τη διάρκεια της αντιστροφής του ρεύματος (αν και οι δύο είναι ενεργοποιημένοι) δημιουργείται ένα κυκλικό ρεύμα. Αυτό το κυκλικό ρεύμα είναι μιας κατεύθυνσης, επειδή τα διακοπτικά στοιχεία επιτρέπουν στο ρεύμα να ρέει μόνο προς μια κατεύθυνση. Μερικοί κυκλομετατροπείς επιτρέπουν τη ροή αυτού του κυκλικού ρεύματος κάθε χρονική στιγμή και λέγονται κυκλομετατροπείς τύπου κυκλικού ρεύματος.



Σχήμα 3.14 Κυκλικό ρεύμα και πηνίο σύζευξης

3.4.2.1 Κυκλομετατροπείς τύπου διακοπής λειτουργίας

Η λειτουργία αυτών των κυκλομετατροπέων εξηγήθηκε εν συντομία στις προηγούμενες ενότητες. Δεν επιτρέπουν τη ροή κυκλικού ρεύματος, και επομένως δεν απαιτείται πηνίο σύζευξης (IGR), το οποίο είναι ογκώδες. Όταν το ρεύμα μηδενίζεται, και οι δύο μετατροπείς (θετικός και αρνητικός) είναι απενεργοποιημένοι. Οι μετατροπείς παραμένουν απενεργοποιημένοι για ένα σύντομο χρονικό διάστημα τέτοιο, που να είναι βέβαιο ότι το ρεύμα στο φορτίο είναι μηδενικό. Στη συνέχεια, ανάλογα με την πολικότητα, ένας από τους μετατροπείς ενεργοποιείται. Μετά από κάθε μηδενισμό του ρεύματος ενεργοποιείται ο μετατροπέας, ο οποίος ήταν εκτός λειτουργίας πριν από το μηδενισμό. Στο σχήμα 3.15 παρουσιάζονται οι κυματομορφές λειτουργίας για έναν τριών παλμών κυκλομετατροπέα τύπου διακοπής.



Σχήμα 3.15 Κυματομορφές λειτουργίας τύπου διακοπής

(α) Τάση εξόδου + μετατροπέα

(β) Τάση εξόδου - μετατροπέα

(γ) Τάση φορτίου

Η λειτουργία τύπου διακοπής έχει μερικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σχέση με τη λειτουργία τύπου κυκλικού ρεύματος

Μειονεκτήματα :

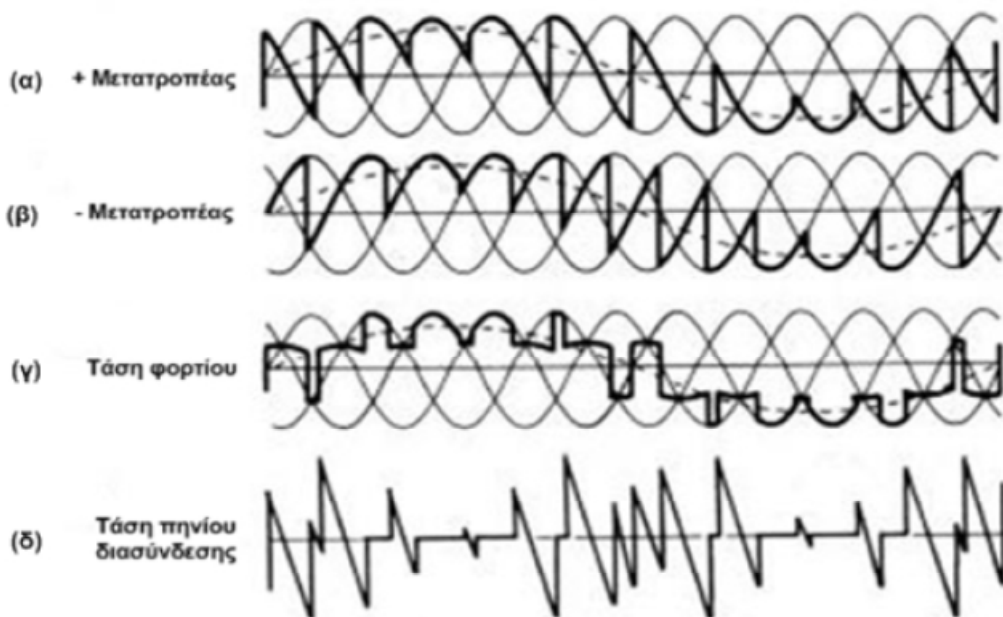
- Κατά το χρονικό διάστημα που οι μετατροπείς είναι απενεργοποιημένοι, το ρεύμα παραμένει μηδενικό, παραμορφώνοντας τις κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος. Αυτή η παραμόρφωση σημαίνει ανάπτυξη περισσότερων αρμονικών σε σχέση με τους κυκλομετατροπείς κυκλικού ρεύματος
- Η απαιτούμενη αντιστροφή του ρεύματος κάνει τον έλεγχο πιο πολύπλοκο.

Πλεονεκτήματα :

- Δεν απαιτείται πηνίο σύζευξης (IGR), το οποίο είναι ογκώδες, κι έτσι το μέγεθος και το κόστος είναι μικρότερο από ότι στην περίπτωση της λειτουργίας τύπου κυκλικού ρεύματος.
- Ένας μόνο μετατροπέας είναι πάντα σε αγωγή και όχι δύο, με αποτέλεσμα να προκύπτουν λιγότερες απώλειες, άρα ο κυκλομετατροπέας να εμφανίζει υψηλότερο βαθμό απόδοσης.

3.4.2.2 2.2. Κυκλομετατροπείς τύπου κυκλικού ρεύματος

Σε αυτήν την περίπτωση, και οι δύο μετατροπείς λειτουργούν πάντα παράγοντας την ίδια θεμελιώδη αρμονική της τάσης εισόδου. Οι γωνίες έναυσης των μετατροπέων ικανοποιούν τη σχέση 3, κατά συνέπεια όταν ένας μετατροπέας λειτουργεί στη φάση της ανόρθωσης, ο άλλος λειτουργεί στη φάση της αντιστροφής και αντίστροφα. Εάν και οι δύο μετατροπείς παράγουν καθαρά ημιτονοειδείς κυματομορφές δεν δημιουργείται κυκλικό ρεύμα, επειδή η στιγμιαία πιθανή διαφορά μεταξύ των εξόδων των μετατροπέων είναι μηδενική. Στην πραγματικότητα όμως, μεταξύ των εξόδων των δύο μετατροπέων ελέγχου φάσης (είτε στη φάση ανόρθωσης είτε στη φάση αντιστροφής) συνδέεται πάντα ένα πηνίο σύζευξης (IGR). Η κυματομορφή της τάσης στα άκρα του πηνίου σύζευξης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.16(δ) και προκύπτει από τη διαφορά των στιγμιαίων τάσεων εξόδου των δύο μετατροπέων. Η τάση αυτή γίνεται μηδενική, όταν και οι δύο μετατροπείς παράγουν την ίδια στιγμιαία τάση.



Σχήμα 3.16 Κυματομορφές λειτουργίας τύπου κυκλικού ρεύματος

- (α) Τάση εξόδου + μετατροπέα
- (β) Τάση εξόδου – μετατροπέα
- (γ) Τάση φορτίου
- (δ) Τάση πηνίου σύζευξης

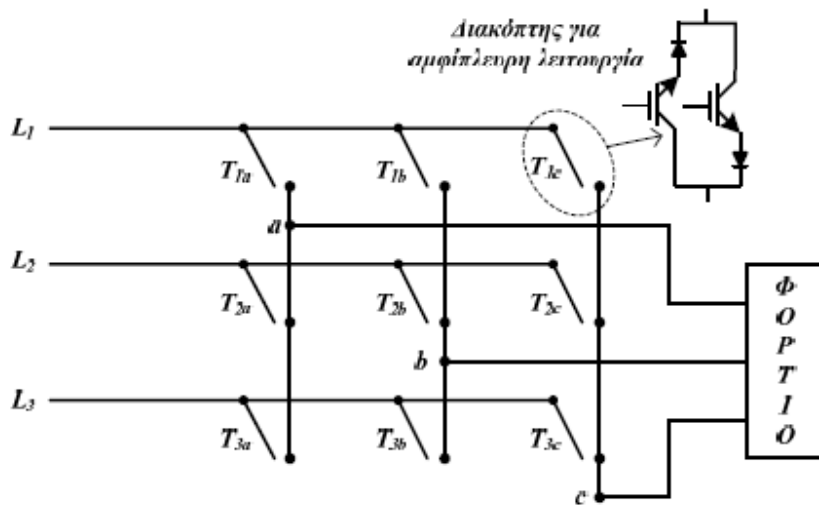
Ο κυκλομετατροπέας τύπου κυκλικού ρεύματος παράγει μια ομαλότερη τάση φορτίου με λιγότερες αρμονικές σε σχέση με την περίπτωση τύπου διακοπής λειτουργίας. Επιπλέον, ο έλεγχος είναι απλός επειδή δεν υπάρχει αναγκαιότητα αντιστροφής του ρεύματος. Εντούτοις, το ογκώδες πηνίο σύζευξης (IGR) είναι ένα μεγάλο μειονέκτημα για αυτόν τον μετατροπέα. Εκτός από αυτό, το σύστημα οδήγησης είναι πιο πολύπλοκο από αυτό του μετατροπέα τύπου διακοπής λειτουργίας. Λόγω αυτών των μειονεκτημάτων, αυτός ο κυκλομετατροπέας δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένος.

Ο κυκλομετατροπέας τύπου διακοπής λειτουργίας και ο κυκλομετατροπέας τύπου κυκλικού ρεύματος μπορούν να συνδυαστούν δίνοντας ένα υβριδικό σύστημα, το οποίο να παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα και των δύο κυκλομετατροπέων. Ο κυκλομετατροπέας που προκύπτει, μοιάζει με αυτόν του τύπου κυκλικού ρεύματος, αλλά ανάλογα με την πολικότητα του ρεύματος εξόδου ενεργοποιείται μόνο ο ένας μετατροπέας, ενώ ο άλλος είναι εκτός λειτουργίας, όπως γίνεται με τον κυκλομετατροπέα τύπου διακοπής λειτουργίας. Όταν το ρεύμα του φορτίου μειώνεται κάτω από ένα όριο, και οι δύο μετατροπείς ενεργοποιούνται. Κατά συνέπεια, το ρεύμα παρουσιάζει ομαλή αντιστροφή. Όταν το ρεύμα αυξάνεται πάνω από ένα όριο αλλά στην αντίθετη κατεύθυνση, ο εξερχόμενος μετατροπέας τίθεται εκτός λειτουργίας. Αυτός ο υβριδικός κυκλομετατροπέας λειτουργεί τις περισσότερες φορές ως τύπου διακοπής λειτουργίας, κι έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μικρότερο πηνίο σύζευξης. Ο βαθμός απόδοσης είναι ελαφρώς

υψηλότερος από αυτόν του κυκλομετατροπέα τύπου κυκλικού ρεύματος αλλά πολύ μικρότερος από αυτόν του κυκλομετατροπέα τύπου διακοπής λειτουργίας. Επίσης, η παραμόρφωση που προκαλείται από τη λειτουργία τύπου διακοπής λειτουργίας εξαφανίζεται λόγω της λειτουργίας κυκλικού ρεύματος γύρω από μηδενικό ρεύμα. Επιπλέον, ο έλεγχος του μετατροπέα είναι ακόμα πιο απλός από αυτόν του κυκλομετατροπέα τύπου διακοπής λειτουργίας.

3.4.3 Μετατροπέας τύπου μήτρας

Ο μετατροπέας τύπου μήτρας είναι μια σχετικά νέα τοπολογία, η οποία προτάθηκε στην αρχή της δεκαετίας του '80. Ένας μετατροπέας τύπου μήτρας αποτελείται από μια μήτρα 9 διακοπτικών στοιχείων, που συνδέουν τις τρεις φάσεις εισόδου με τις τρεις φάσεις εξόδου άμεσα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.17. Οποιαδήποτε φάση εισόδου μπορεί να συνδεθεί με οποιαδήποτε φάση εξόδου, οποιαδήποτε στιγμή, ανάλογα με τον έλεγχο. Όμως, δεν πρέπει να είναι ταυτόχρονα ενεργοποιημένοι δύο διακόπτες της ίδιας φάσης, γιατί αυτό θα προκαλέσει βραχυκύκλωμα στις φάσεις εισόδου. Αυτοί οι μετατροπείς ελέγχονται συνήθως με την τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών (PWM) για να παραγάγουν τις τριφασικές μεταβαλλόμενες τάσεις με μεταβλητή συχνότητα.

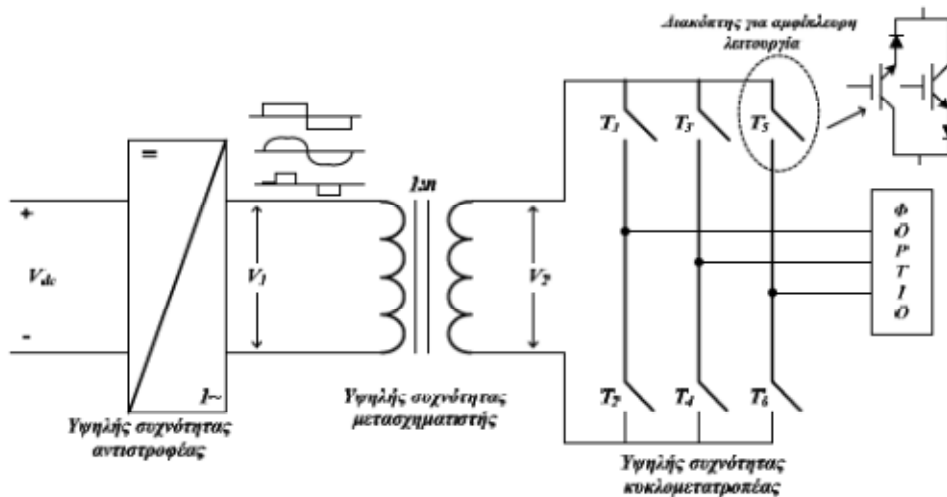


Σχήμα 3.17 Τοπολογία κυκλομετατροπέα τύπου μήτρας

3.4.3.1 Κυκλομετατροπέας από μονοφασικός σε τριφασικό (1φ-3φ)

Τα τελευταία χρόνια, λόγω της συνεχούς μείωσης του μεγέθους και της τιμής των ηλεκτρονικών διακοπτικών στοιχείων ισχύος, οι κυκλομετατροπείς παρουσιάζουν όλο και περισσότερο ερευνητικό ενδιαφέρον. Συνήθως, σε ένα σύστημα παραγωγής ισχύος χρησιμοποιείται ένας αντιστροφέας, που παράγει κυματομορφή τάσης υψηλής συχνότητας, με την οποία τροφοδοτείται ο κυκλομετατροπέας, είτε μέσω ενός μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας είτε όχι. Εάν χρησιμοποιείται μετασχηματιστής, αυτός παρέχει γαλβανική απομόνωση μεταξύ του αντιστροφέα και του κυκλομετατροπέα. Σε αντίθεση με αυτό, επιπλέον taps από τον

μετασχηματιστή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ενεργοποιήσουν άλλους μετατροπείς, παράγοντας μια τοπολογία υψηλής συχνότητας. Η μονοφασική τάση υψηλής συχνότητας (hfac) μπορεί να είναι ημιτονοειδής ή τραπεζοειδής. Ίσως υπάρχουν διαστήματα μηδενικής τάσης για λόγους ελέγχου ή μετατροπές μηδενικής τάσης(σχήμα 13). Τέτοιοι μετατροπείς βρίσκονται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο.

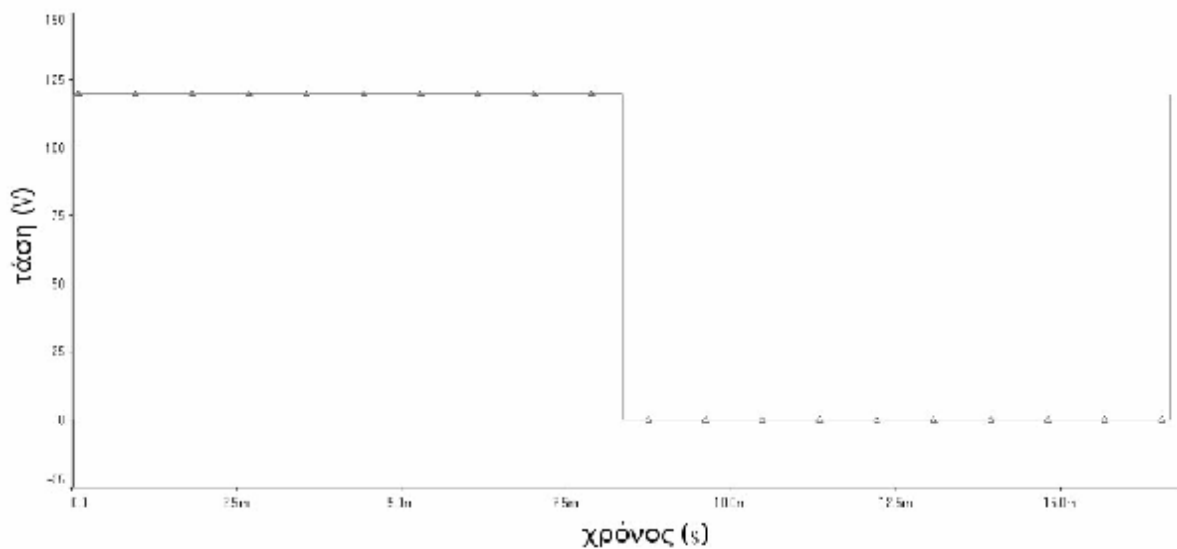


Σχήμα 3.18 Τοπολογία μετατροπής ισχύος με μετασχηματιστή υψηλής συχνότητας και κυκλομετατροπέα 1φ-3φ

Κεφάλαιο 4^ο Διαμόρφωση εύρους παλμού και λειτουργία «ινβέρτερ»

4.1 Αντιστροφέας τετραγωνικής κυματομορφής

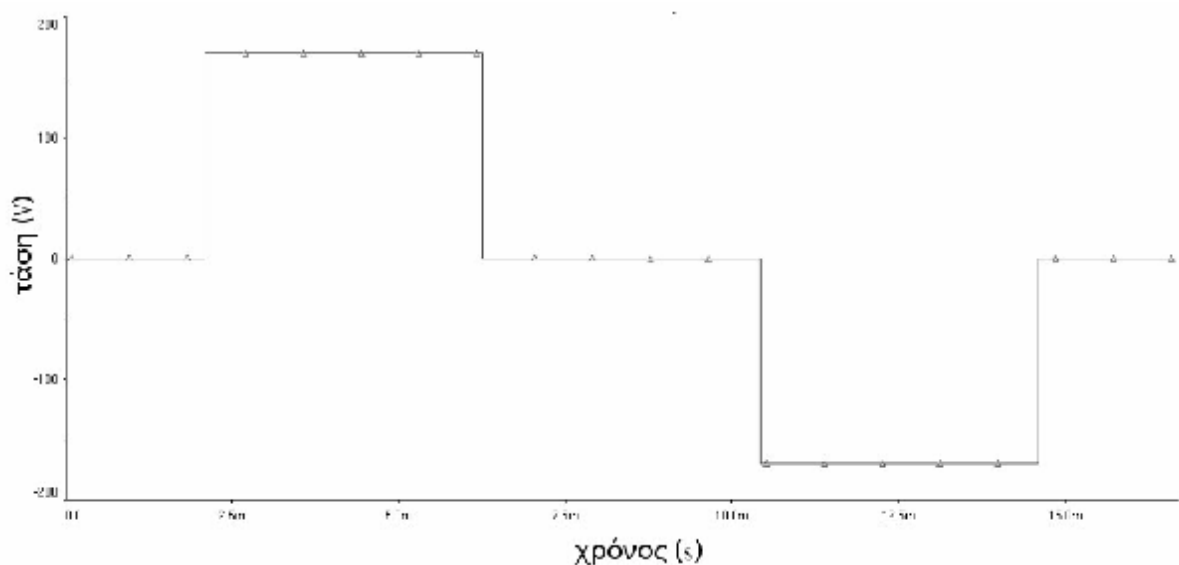
Η μετατροπή του Σ.Ρ. σε Ε.Ρ. γίνεται με διακοπτικά στοιχεία (ηλεκτρονικά ισχύος), τις περισσότερες φορές με χρήση MOSFET, τα οποία με βάση την τοπολογία τους στο κύκλωμα έχουν την δυνατότητα να μεταβάλλουν την τάση στο φορτίο έτσι ώστε το σήμα μας να μιμείται το Ε.Ρ. Για την παραγωγή ενός τετραγωνικού παλμού το ρεύμα στο φορτίο μεταβάλλεται μεταξύ V_{max} και V_{min} όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1. Για να μεταφέρουμε την ίδια ισχύ με το ημιτονοειδές σήμα πρέπει το πλάτος του τετραγωνικού μας σήματος να ισούται με την RMS τιμή του ημιτονοειδούς σήματος. Οι αντιστροφείς που παράγουν τετράγωνο στην έξοδο δεν χρησιμοποιούνται πλέον λόγω της φύσης και του σχεδιασμού των φορτίων, αλλά αποτελούν την βάση στην οποία στηρίχθηκαν οι μελλοντικοί αντιστροφείς.



Σχήμα 4.1 Τετραγωνική κυματομορφή παρογόμενη από αντιστροφή

4.2 Αντιστροφείς τροποποιημένου ημιτόνου

Οι αντιστροφείς τροποποιημένου ημιτόνου είναι η εξέλιξη των αντιστροφέων τετραγώνου. Στην έξοδο αυτού του είδους των αντιστροφέων παίρνουμε μια τάση η οποία έχει 3 τιμές τάσης, θετική, αρνητική και μηδενική. Όπως βλέπουμε στο σχήμα 4.2 υπάρχει μια νεκρή ζώνη μεταξύ των μεταβάσεων από θετικές σε αρνητικές τιμές. Σαφώς αυτή η κυματομορφή θυμίζει περισσότερο την ημιτονοειδή καμπύλη και οι αντιστροφείς αυτοί είναι αρκετά δημοφιλείς καθώς έχουν μικρό κόστος αγοράς και είναι συμβατοί με τις περισσότερες οικιακές καταναλώσεις. Όμως και στους αντιστροφείς τροποποιημένου ημιτόνου έχουμε έντονο αρμονικό περιεχόμενο, άρα μεγάλες απώλειες, και συσκευές όπως οι κινητήρες δεν λειτουργούν σωστά. Αυτού του είδους οι αντιστροφείς χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε συσκευές αδιάλειπτης παροχής ενέργειας γνωστές με τον διεθνή όρο UPS.

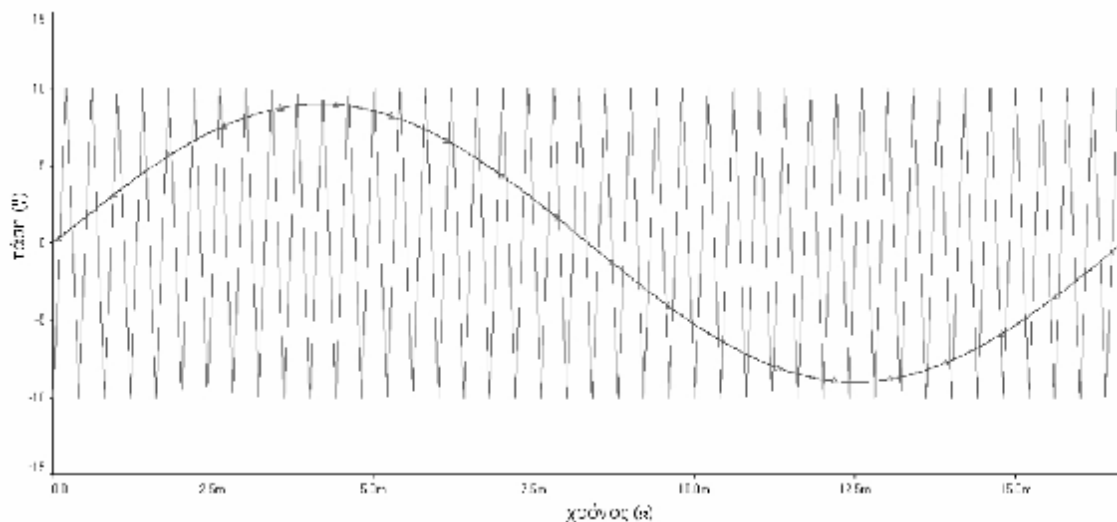


Σχήμα 4.2 Κυματομορφή τροποποιημένου ημιτόνου

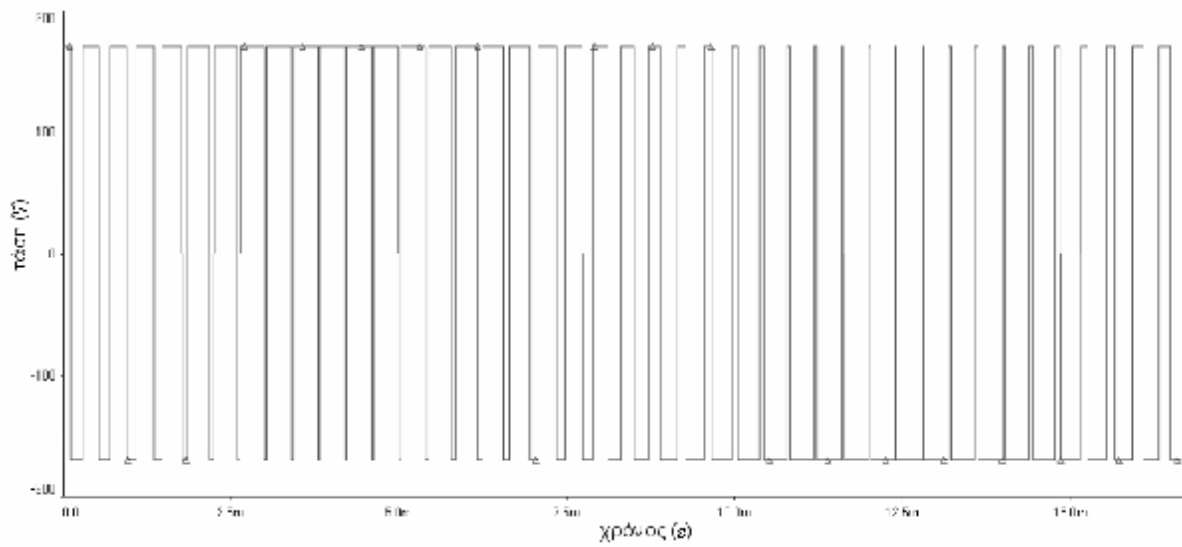
4.3 PWM – Διαμόρφωση Εύρους Παλμού

PWM 2 επιπέδων

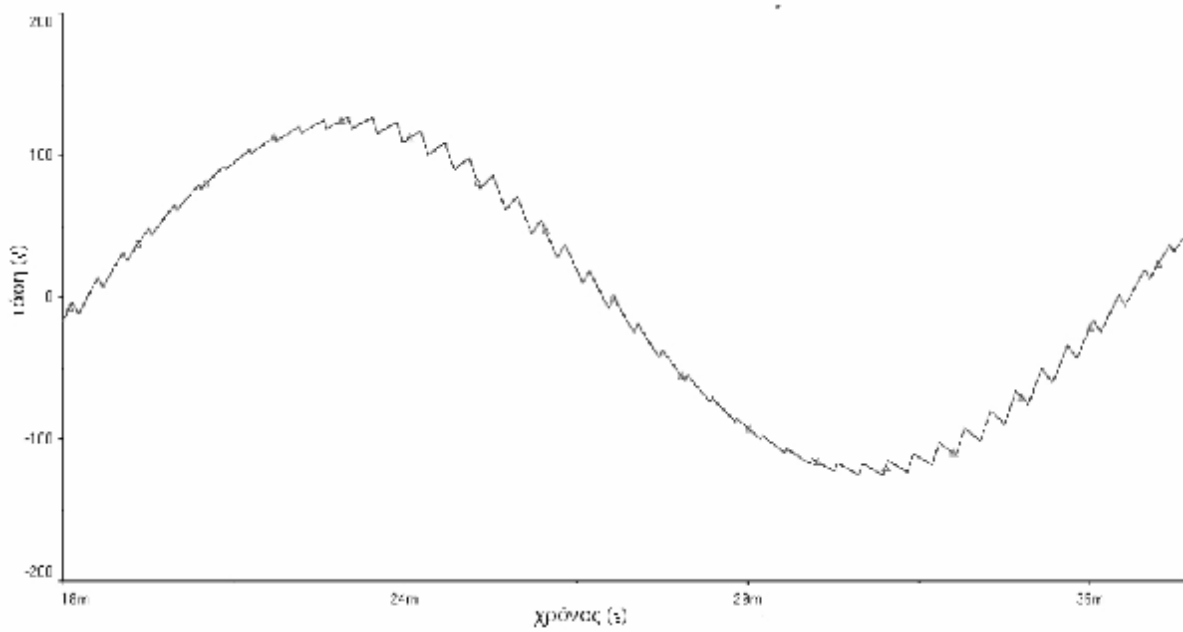
Η πιο κοινή και αποτελεσματική τεχνική για την παραγωγή ψηφιακών ημιτονοειδών σημάτων είναι η διαμόρφωση εύρους παλμού ή PWM στα διεθνή. Η τεχνική PWM περιλαμβάνει την παραγωγή ψηφιακής κυματομορφής για την οποία ο βαθμός εργασίας (duty cycle) μεταβάλλεται ώστε το τελικό αποτέλεσμα να είναι ένα σήμα που προσδιορίζει το ημίτονο. Ο απλούστερος τρόπος παραγωγής ημιτονοειδούς σήματος είναι μέσω σύγκρισης ενός μικρής ισχύος ημιτονοειδούς σήματος αναφοράς, με μια τριγωνικής κυματομορφής τάση, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3. Προωθώντας τα 2 αυτά σήματα σε έναν συγκριτή, η έξοδός του, θα είναι η PWM 2 επιπέδων όπως φαίνεται στο σχήμα 4.4. Αυτό το σήμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ελέγχει τα διακοπτικά στοιχεία, τα οποία συνδέονται σε διαύλους μεγαλύτερης τάσης, ώστε τελικά να έχουμε πλήρη αντιγραφή του σήματος με το πλάτος που επιθυμούμε. Εάν περάσουμε το σήμα μας από ένα LC φίλτρο (σχήμα 4.5), το PWM σήμα θα μοιάζει περισσότερο με την ημιτονοειδή καμπύλη. Με τη μέθοδο αυτή κατορθώνουμε να παράγουμε ένα σήμα το οποίο μοιάζει με ημίτονο, αλλά περιέχει έντονο αριθμό αρμονικών.



Σχήμα 4.3 Τριγωνική και ημιτονοειδής τάση



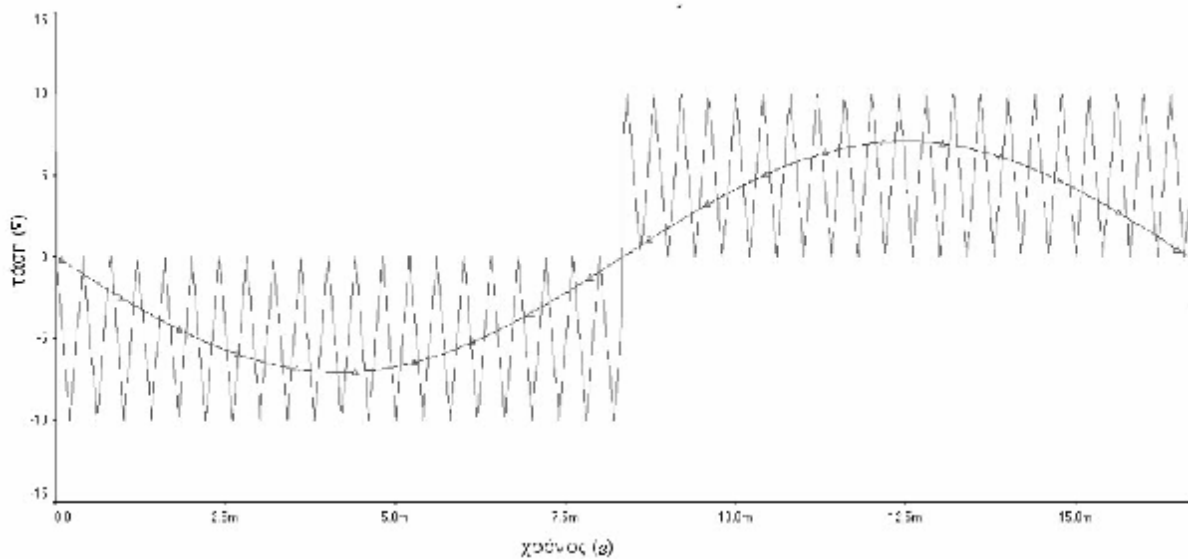
Σχήμα 4.4 PWM 2 επιπέδων



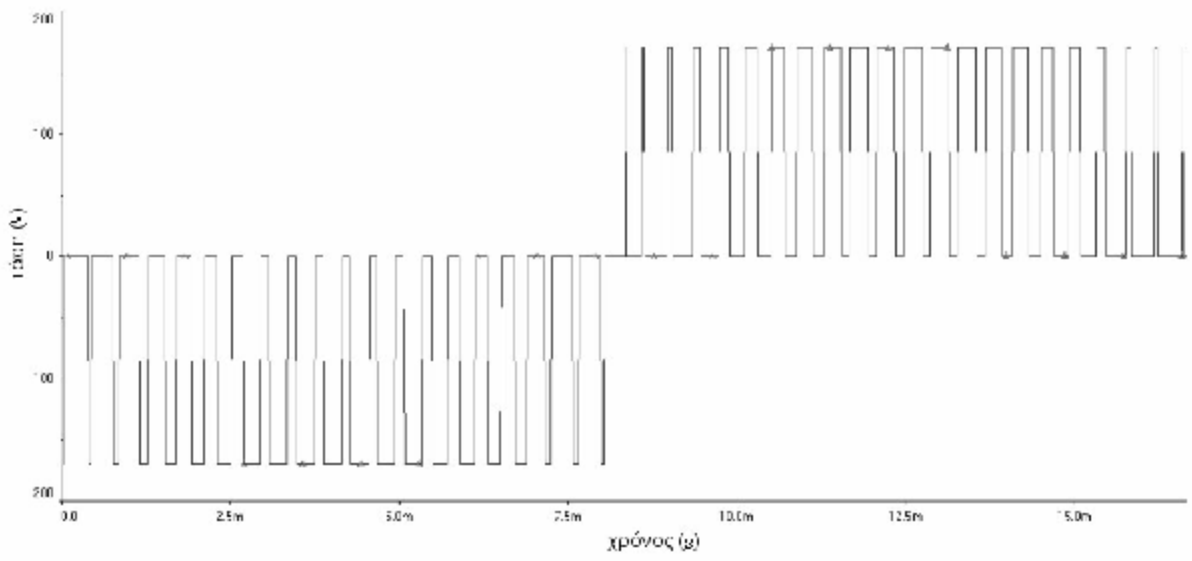
Σχήμα 4.5 Τελικό σήμα PWM με εξομάλυνση

PWM 3 επιπέδων

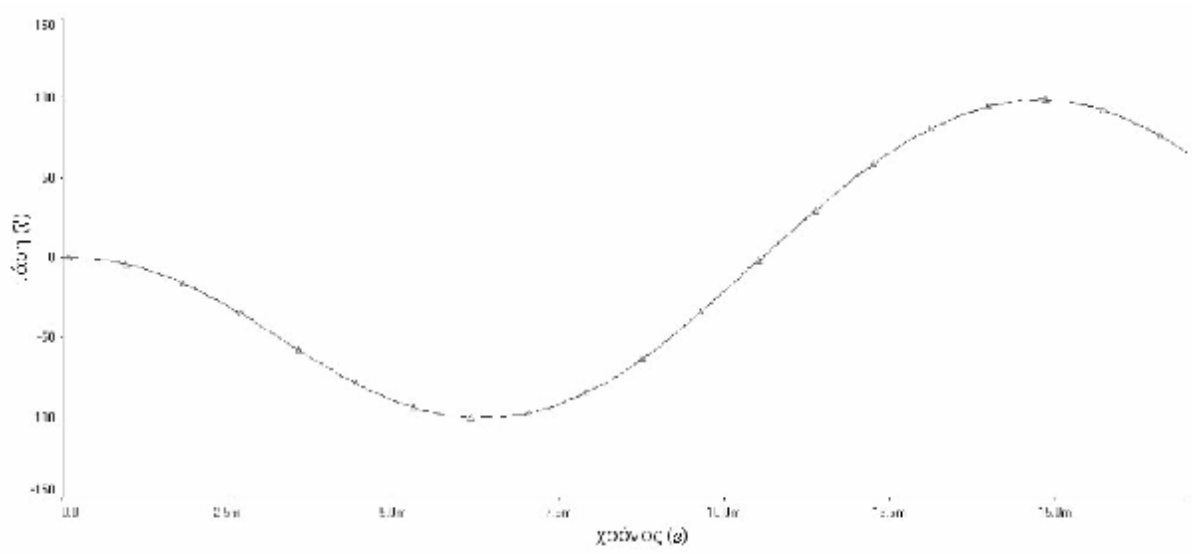
Για να εξασφαλίσουμε ένα καλύτερο ημιτονοειδές σήμα χρησιμοποιούμε την τεχνική PWM 3 επιπέδων. Για να παράγουμε αυτό το σήμα όμως, κατά την σύγκριση το σήμα πρέπει να είναι και αυτό 3 επιπέδων, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.6. Χρησιμοποιείται μια τριγωνική τάση όπως στην PWM 2 επιπέδων, με την διαφορά ότι έχει το μισό πλάτος και είναι υπερτίθεται σε μια τετραγωνική τάση ώστε να έχουμε σύγκριση του μισού ημιτονοειδούς σήματος ανά ημιπερίοδο. Το παραγόμενο ημιτονοειδές σήμα χρησιμοποιείται για να ελέγξει την μια πλευρά της γέφυρας H (H bridge), η οποία ελέγχει τον χρόνο που θα συνδέει το φορτίο με την τάση. Η άλλη πλευρά της γέφυρας, καθορίζει την πολικότητα της τάσης του φορτίου, και ελέγχεται από μια τετράγωνη κυματομορφή η οποία εφόσον παράγεται κατά την παραγωγή του ημιτονοειδούς μας σήματος, λογικό είναι να είναι συμφασική με το ημιτονοειδές σήμα και να έχει την ίδια συχνότητα. Το σήμα που παράγουμε με αυτήν την τεχνική φαίνεται στο σχήμα 4.7, το οποίο σαφώς μπορεί να περαστεί από διάφορα φίλτρα ώστε να πάρουμε το σήμα που φαίνεται στο σχήμα 4.8. Στο παράδειγμά μας βλέπουμε ότι η συχνότητα της τριγωνικής κυματομορφής, άρα και του τελικού σήματος είναι αρκετά μικρή. Πρακτικά όμως χρησιμοποιούμε τα διακοπτικά στοιχεία σε πολύ μεγάλες συχνότητες για να αποφύγουμε τις ακουστικές συχνότητες (ανθρώπινο αντί 20 Hz - 20kHz) η οποίες θα προκαλούσαν προβλήματα κατά την εργασία στο ανθρώπινο δυναμικό.



Σχήμα 4.6 Σήμα 3 επιπέδων



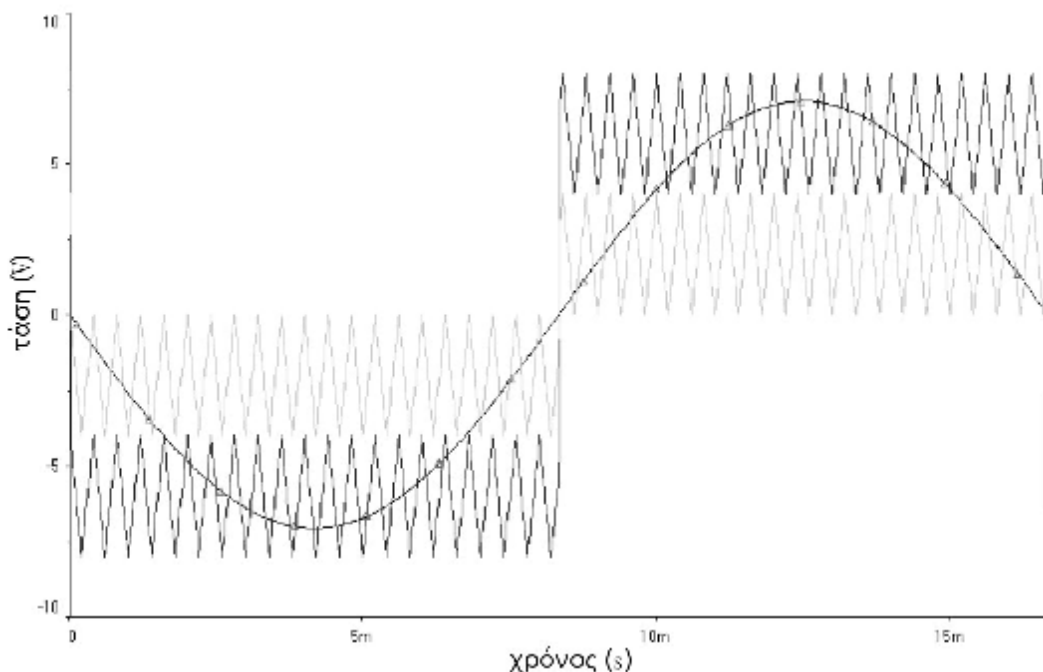
Σχήμα 4.7 PWM 3επιπέδων



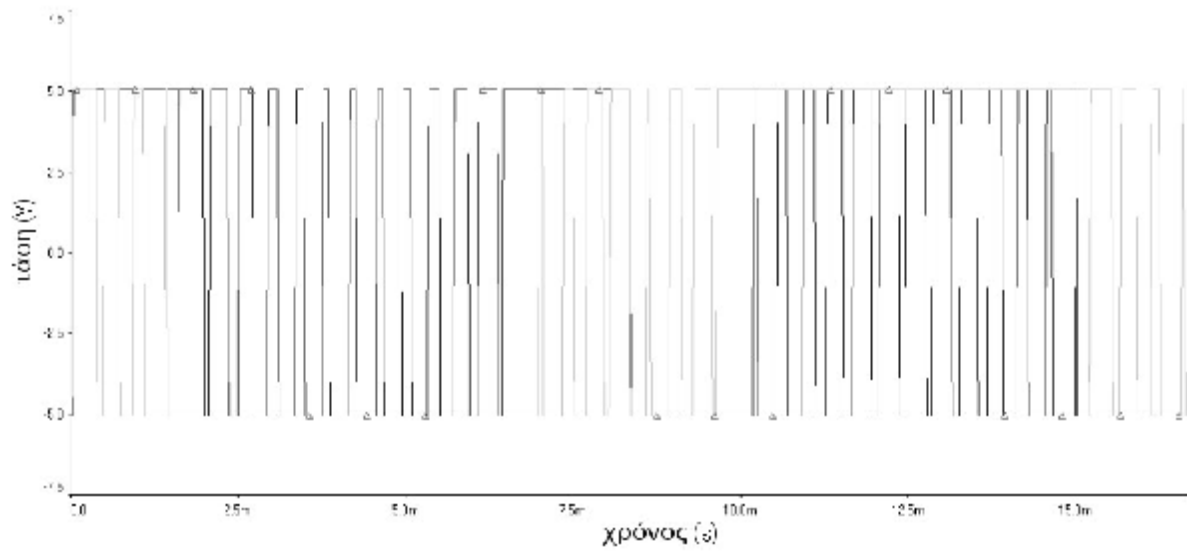
Σχήμα 4.8 Η έξοδος με χρήση φίλτρου εξομάλυνσης

PWM 5 ή περισσότερων επιπέδων

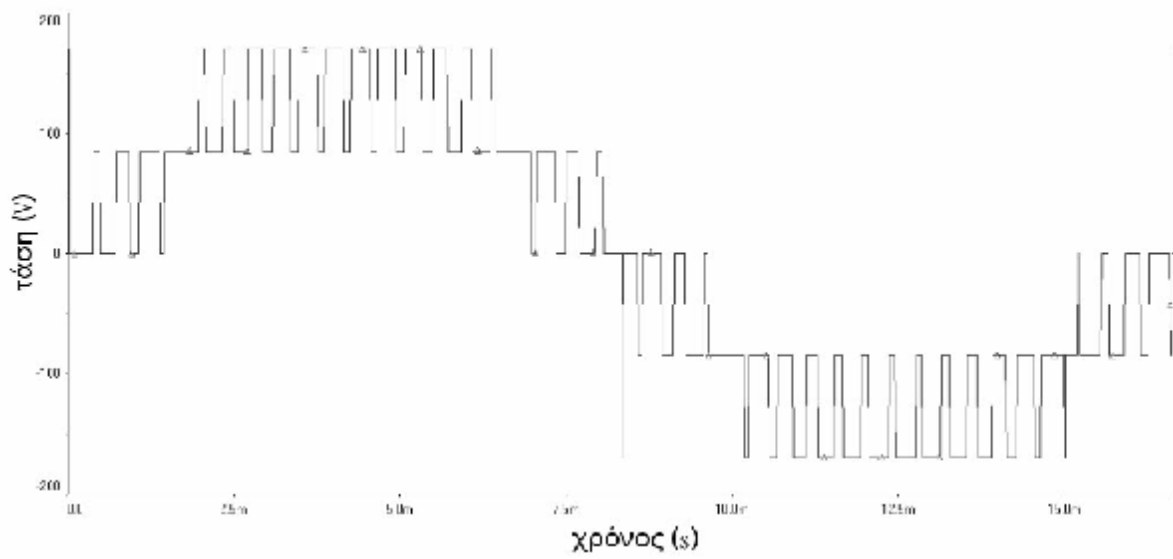
Αμα χρειαζόμαστε μεγαλύτερη ακρίβεια στο παραγόμενο σήμα μας, η τεχνική 3 επιπέδων που περιγράψαμε μπορεί να τροποποιηθεί κατάλληλα ώστε να παράγουμε ένα ημιτονοειδές σήμα 5,7,9+ επιπέδων. Για να πετύχουμε επιπλέον 2 επίπεδα, απλά προσθέτουμε μια γέφυρα H (H bridge), έναν συγκριτή και έναν αθροιστή παραπάνω στο κύκλωμά μας. Τα σήματα ελέγχου για κάθε γέφυρα όμως πρέπει να είναι ξεχωριστά (σχήμα 4.9), γεγονός που εισάγει μια πολυπλοκότητα στην ανάπτυξη του κυκλώματος, αλλά είναι απαραίτητα γιατί το καθένα αντιστοιχεί στο κάθε επίπεδο του ημιτονοειδούς σήματος, όπως διακρίνουμε στο σχήμα 4.8. Στην PWM 5 επιπέδων, η μία μεριά της γέφυρας H ελέγχεται από την τετράγωνη κυματομορφή όπως στην PWM 3 επιπέδων, ενώ η άλλη μεριά από την έξοδο του αντίστοιχου συγκριτή. Το παραγόμενο σήμα φαίνεται στο σχήμα 4.11. Η τελική μορφή που παίρνει το σήμα μας όταν περάσει από φίλτρα φαίνεται στο σχήμα 4.12. Το κύριο πλεονέκτημα της PWM μεγαλύτερων επιπέδων έγκειται στο γεγονός ότι εφόσον το σήμα αναπτύσσεται σε διάφορα επίπεδα, αυτόματα σημαίνει ότι έχει μικρότερες μεταβολές μεταξύ των ακραίων θετικών και αρνητικών τιμών, το οποίο με τη σειρά του σημαίνει μειωμένες dV/dt απώλειες. Επομένως εύκολα καταλαβαίνουμε πως οι αντιστροφείς με περισσότερα επίπεδα είναι πιο αποδοτικοί. Δεν πρέπει όμως να ξεχνάμε ότι τα ηλεκτρονικά καταναλώνουν ενέργεια και εισάγουν καθυστέρηση στο κύκλωμά μας με συνέπεια να χρειάζεται μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ. Επίσης ένα δεύτερο πλεονέκτημα είναι ότι με την PWM περισσότερων επιπέδων καταφέρνουμε να ελαττώσουμε το περιεχόμενο των αρμονικών.



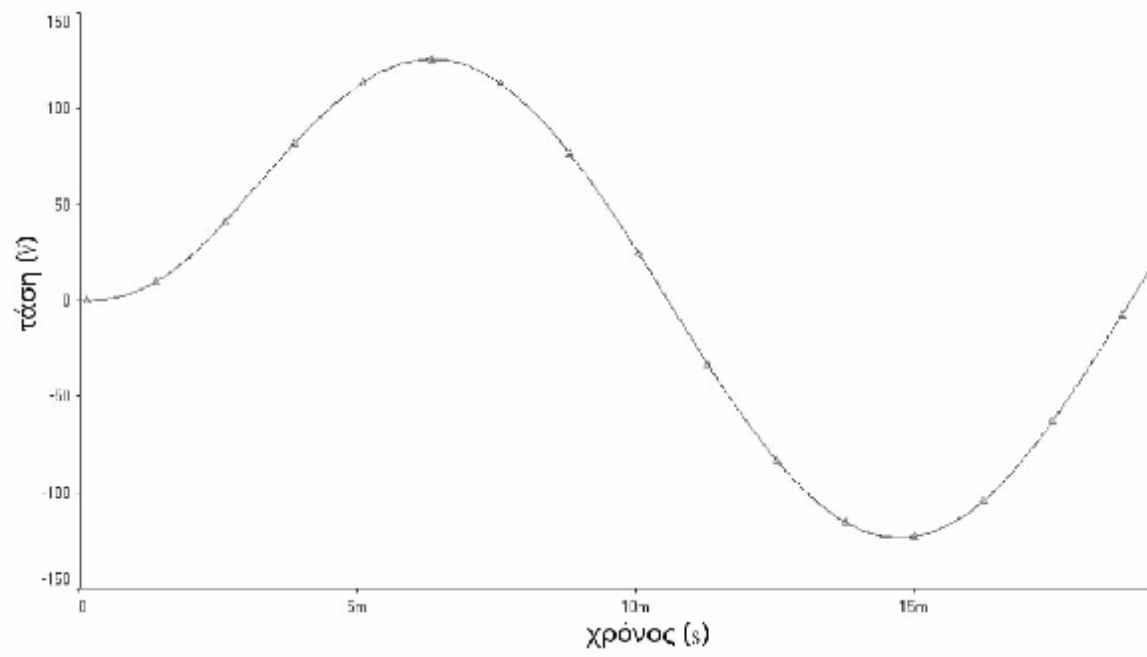
Σχήμα 4.9 Σήμα 5 επιπέδων



Σχήμα 4.10 PWM 5 επιπέδων, διακρίνονται τα 2 σήματα



Σχήμα 4.11 Το παραχθέν σήμα 5 επιπέδων



Σχήμα 4.12 Το τελικό σήμα με χρήση φίλτρων

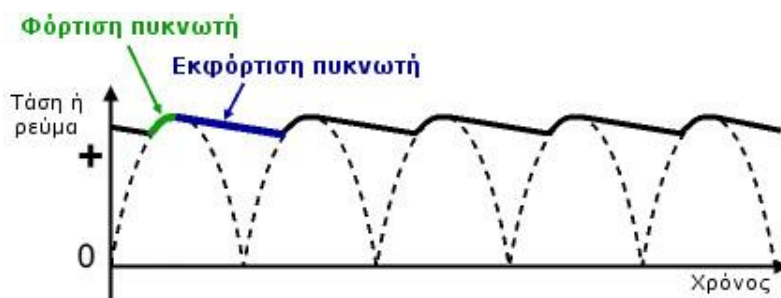
4.4 Τα μέρη ενός VFD (οδηγού μεταβαλλόμενης ταχύτητας)

Μι τυπική διάταξη ενός οδηγού μεταβαλλόμενης συχνότητας αποτελείται από την ανορθωτική διάταξη, το φίλτρο (πυκνωτής) εξομάλυνσης και τον αντιστροφέα. (Σχήμα 4.14)

Για την τροφοδοσία χρησιμοποιείται συνήθως το τριφασικό δίκτυο. Υπάρχουν VFD που μπορούν να συνδεθούν σε μονοφασικό δίκτυο και χρησιμοποιούνται όταν η ισχύς του κινητήρα είναι μικρή (της τάξεως μέχρι 2-3hp), αλλά η έξοδος και πάλι θα είναι τριφασική, καθώς ο VFD πρακτικά δεν χρησιμοποιείται για την οδήγηση μονοφασικού κινητήρα.

Το κύκλωμα του ανορθωτή αποτελείται συνήθως από μια μη ελεγχόμενη γέφυρα ανόρθωσης πλήρους κύματος (σχήμα 4.13) . Η ανορθωτική διάταξη αποτελεί το στάδιο μετατροπής του AC σε DC. Επειδή όμως το σήμα που παίρνουμε στην έξοδο της γέφυρας, περιέχει μια εναλλασσόμενη συνιστώσα (AC component) στα 100 Hz, πρέπει να την φιλτράρουμε.

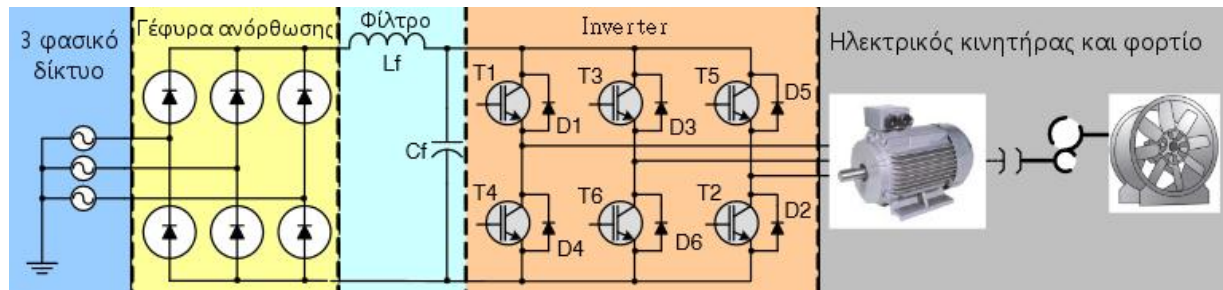
Στο στάδιο κατά το οποίο γίνεται η εξομάλυνση του συνεχούς ρεύματος (σχήμα 4.13), υπάρχει ένας ή περισσότεροι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές παράλληλα στην έξοδο της γέφυρας, καθώς και σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχει και πηνίο. Οι πυκνωτές έχουν μεγάλη χωρητικότητα και η τάση στην οποία σχεδιάζονται είναι στο μέγιστο της τάσης εισόδου τους. Λ.χ. για πλήρη εξομάλυνση και τάση τροφοδοσίας 400V ο πυκνωτής πρέπει να αντέχει τουλάχιστον τα 560V. Ένα κύκλωμα περιορισμού ή μια γέφυρα αποτελούμενη από SCR (σε ακριβότερους μετατροπείς), χρησιμοποιείται για τον περιορισμό των μεγάλων ρευμάτων που οφείλονται στο μεταβατικό φαινόμενο (όταν ανοίξουμε την συσκευή) κατά το οποίο φορτίζονται οι πυκνωτές. Μετά από αυτές τις διατάξεις ακολουθεί ένα κύκλωμα αποφόρτισης των πυκνωτών σε περίπτωση διακοπής της τροφοδοσίας για λόγους προστασίας. Το κύκλωμα μεταξύ γέφυρας και του αντιστροφέα αποτελεί το γνωστό -στα διεθνή- όρο, DC link.



Σχήμα 4.13 Εξομάλυνση του ανορθωμένου σήματος

Ο inverter ή γέφυρα του inverter ή μετατροπέας DC-AC όπως συχνά αποκαλείται, αποτελείται από 6 ημιαγωγά στοιχεία ισχύος. Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα είναι τα IGBT (διπολικά τρανζίστορ μεμονωμένης πύλης). Ο λόγος έγκειται στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα IGBT έναντι των MOSFET, όπως ότι έχουν την ικανότητα να άγουν περισσότερο ρεύμα, έχουν μικρότερες απώλειες $V_{ce,sat}$ συγκριτικά με τις $R_{ds,on}$, αφού στο IGBT οι απώλειες βασίζονται στο ρεύμα συλλέκτη, ενώ στα MOSFET βασίζονται στο τετράγωνο του ρεύματος εκροής. Αντιπαράλληλα με αυτά, δηλαδή στα άκρα συλλέκτη – εκπομπού, υπάρχουν οι δίοδοι ελευθέρως ροής. Οι δίοδοι αυτές είναι απαραίτητες, επειδή τα διακοπτικά στοιχεία τροφοδοτούν επαγωγικά

φορτία και τα φορτία αυτά προκαλούν μεγάλες αιχμές τάσης (kickback voltages). Αν δεν υπάρχει κατάλληλο μονοπάτι οι διακόπτες ισχύος κινδυνεύουν να καταστραφούν.



Σχήμα 4.14 Γραφική αναπαράσταση των μερών του οδηγού μεταβολής συχνότητας

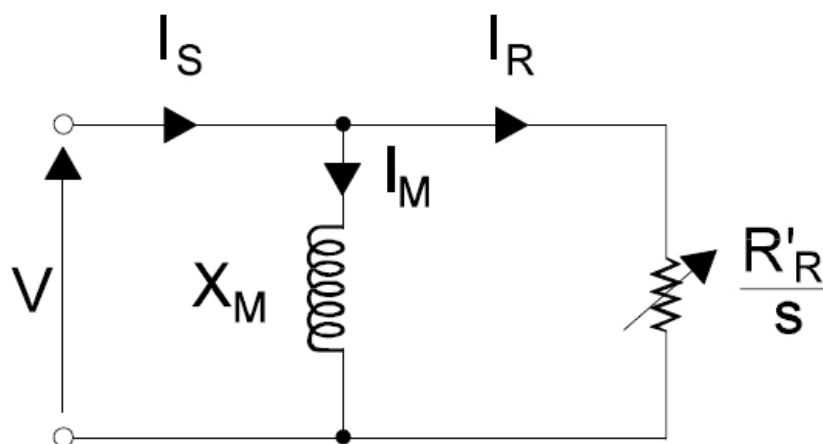
4.5 Διανυσματικός έλεγχος

Ο όρος διανυσματικός έλεγχος είναι μάλλον ο πιο καταχρηστικός όρος που συνδέεται με την βιομηχανία και την κίνηση, και προκαλεί μεγάλη σύγχυση στους επαγγελματίες. Μολονότι ο όρος υφίσταται από τα μέσα του 80, άρχισε να χρησιμοποιείται εκτενώς τελευταία και να αναφέρεται στα συστήματα που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά σταθερής κατάστασης (solid state electronics) και μικροεπεξεργαστές (microprocessors). Στις μέρες μας ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τεχνολογία η οποία προσφέρει μεγαλύτερη αποδοτικότητα από την αντίστοιχη που προσφέρουν οι οδηγοί V/f.

Σύμφωνα με την θεωρία των μηχανών όπως έχει αναπτυχθεί στα προηγούμενα κεφάλαια η ροπή είναι αποτέλεσμα επίδρασης των 2 μαγνητικών πεδίων, ήτοι του στάτη και του δρομέα, στο διάκενο.

Στους κινητήρες Σ.Ρ. είναι προφανές ότι η ροπή είναι ανάλογη του γινομένου των δύο διανυσμάτων ρεύματος, τουτέστιν του ρεύματος τυμπάνου (I_a) και του ρεύματος πεδίου I_f τα οποία είναι κάθετα μεταξύ τους. Αμφότερα τα ρεύματα μπορούν να μετρηθούν εύκολα και να χρησιμοποιηθούν για την ρύθμιση των στροφών του κινητήρα.

Αντίθετα στους επαγωγικούς κινητήρες, το ρεύμα μαγνήτισης (I_m), και το ρεύμα που παράγει την ροπή (I_r) βρίσκονται εσωτερικά του κινητήρα και δεν μπορούμε ούτε να τα μετρήσουμε, αλλά ούτε και να τα διαχειριστούμε μεμονωμένα. (σχήμα 4.15) Όπως στους κινητήρες Σ.Ρ. έτσι και στους επαγωγικούς κινητήρες τα ρεύματα αυτά είναι κάθετα μεταξύ τους και το διανυσματικό τους άθροισμα είναι ίσο με το ρεύμα στον στάτη I_s , το οποίο είναι και το μόνο που μπορεί να μετρηθεί. Η λειτουργία επομένως του οδηγού διανυσματικού ελέγχου είναι να διαχωρίσει και να κατορθώσει να διαχειριστεί τα 2 ρεύματα (I_m , I_r) μετρώντας και αυξομειώνοντας το ρεύμα του στάτη (I_s). Έτσι λοιπόν ο οδηγός αυτός υπολογίζει τα 2 ρεύματα ώστε να πετύχει την συνεχόμενη ροή ρεύματος στον κινητήρα, άραγε και να κρατήσει την ροπή σταθερή σε όλο το εύρος ταχύτητας και φόρτισης του κινητήρα.



Σχήμα 4.15 Απλοποιημένο ισοδύναμο

Ο υπολογισμός των ρευμάτων μαγνήτισης και δρομέα περιλαμβάνει την μέτρηση μεταβλητών όπως: το ρεύμα του στάτη I_s , την τάση του στάτη V_s , την διαφορά φάσης I_s - V_s , την συχνότητα, την ταχύτητα του άξονα. Αυτές τις παραμέτρους τις εισάγουμε στο μοντέλο της μηχανής, στο οποίο υπάρχουν και οι παράμετροι της μηχανής όπως: η εμπέδηση του στάτη, η εμπέδηση του δρομέα, η αντίσταση μαγνήτισης, ο αριθμός των πόλων κλπ. Λόγω του μεγάλου όγκου των παραμέτρων υπάρχουν και διαφορές στα μοντέλα, λογικό συμπέρασμα είναι ότι όσες περισσότερες μεταβλητές χρησιμοποιηθούν τόσο πιο αποδοτικό και σταθερό-ακριβές θα είναι το σύστημά μας, βέβαια αυτό επιφέρει την ανάγκη για μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ (άραγε και αυξημένο κόστος).

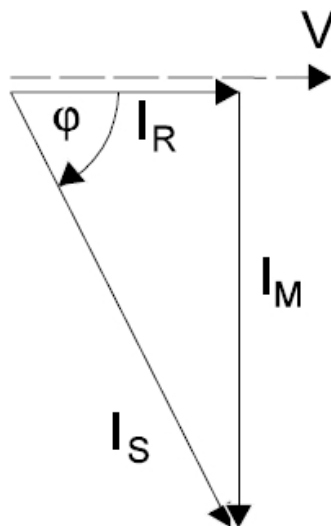
Παρακάτω θα αναλύσουμε την συμπεριφορά του κινητήρα κατά τις 3 περιπτώσεις (χωρίς φορτίο, με χαμηλό φορτίο και με υψηλό φορτίο).

- Λειτουργία χωρίς φορτίο.

Όπως βλέπουμε στο σχήμα 4.15 όταν η μηχανή λειτουργεί χωρίς φορτίο το ρεύμα I_s αποτελείται σχεδόν εξ ολοκλήρου από το ρεύμα μαγνήτισης. Υπάρχει σαφώς και ένα μικρό I_r που παράγει την ροπή το οποίο χρειάζεται μόνο για να ξεπεραστούν οι απώλειες τριβών και εξαιρισμού της μηχανής. Η ολίσθηση είναι σχεδόν μηδέν (0). Το ρεύμα του στάτη καθυστερεί 90 μοίρες της τάσης, άρα ο συντελεστής ισχύος είναι κοντά στο μηδέν (0).

- Λειτουργία με χαμηλό φορτίο. (σχήμα 4.16)

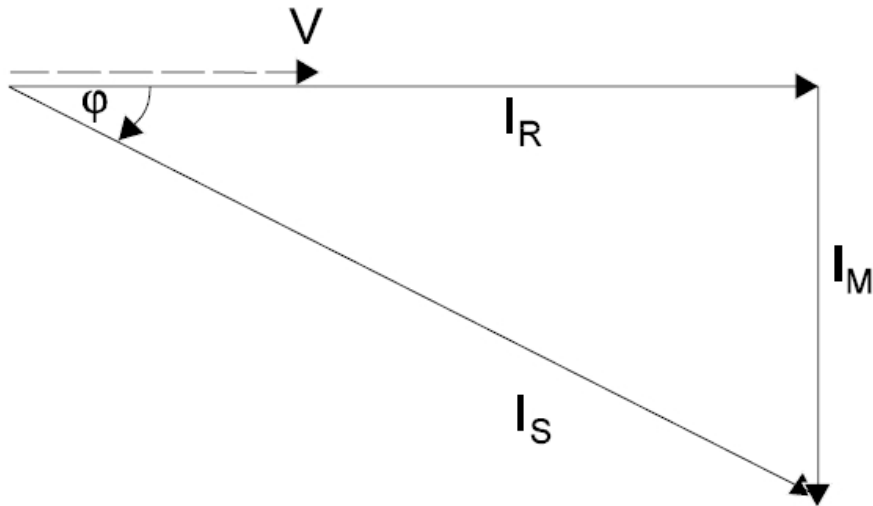
Κατά την λειτουργία με χαμηλό φορτίο το ρεύμα του στάτη αποτελείται από το διανυσματικό άθροισμα του ρεύματος μαγνήτισης (ίδιο πλάτος με την προηγούμενη περίπτωση), και του αυξημένου –σε σχέση με πριν- ρεύματος δρομέα. Επειδή το ρεύμα του στάτη καθυστερεί της τάσης κατά μεγάλη σχετικά γωνία φ , ο συντελεστής ισχύος είναι χαμηλός ($\cos\varphi \ll 1$). Η ολίσθηση είναι και αυτή μικρή.



Σχήμα 4.16 Λειτουργία με χαμηλό φορτίο

- Λειτουργία με υψηλό φορτίο (σχήμα 4.17)

Κατά την λειτουργία του κινητήρα σε μεγάλη φόρτιση, το ρεύμα του στάτη αποτελείται από το διανυσματικό άθροισμα του ρεύματος μαγνήτισης I_m , το οποίο παραμένει ίδιο και στις 3 περιπτώσεις, και του αρκετά αυξημένου ρεύματος δρομέα. Το ρεύμα του στάτη καθυστερεί της τάσης κατά γωνία φ , άραγε ο συντελεστής ισχύος προσεγγίζει τον ονομαστικό συντελεστή ισχύος του κινητήρα ($\cos\varphi \sim 0.8$).

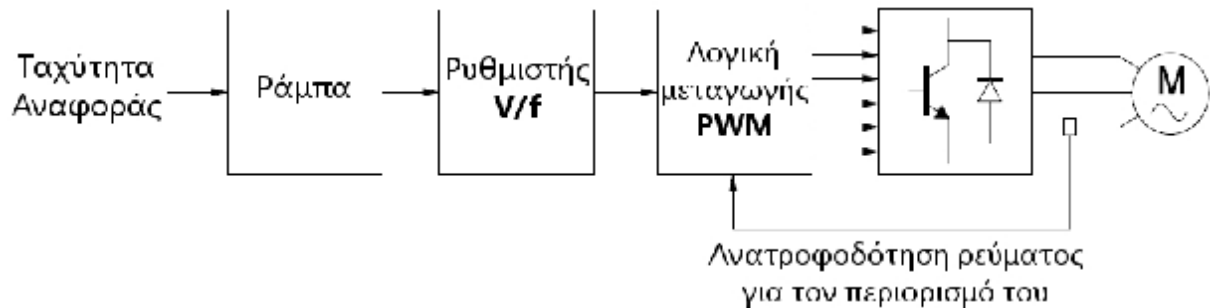


Σχήμα 4.17 Λειτουργία με υψηλό φορτίο

Σύμφωνα με τα παραπάνω καταλαβαίνουμε ότι πυρήνας του διανυσματικού ελέγχου είναι ένα ενεργό μοντέλο του κινητήρα, το οποίο συνεχώς υπολογίζει και μεταβάλλει τις διάφορες παραμέτρους του κινητήρα. Σύγχρονοι οδηγοί διανυσματικού ελέγχου υπολογίζουν τις διάφορες παραμέτρους (ρεύμα δρομέα, ρεύμα μαγνήτισης κλπ) πάνω από 2000 φορές το δευτερόλεπτο, πράγμα που σημαίνει ότι έχουμε αναβάθμιση των παραμέτρων σε λιγότερο από 0.5 ms.

4.6 Βαθμωτός έλεγχος (έλεγχος V/f).

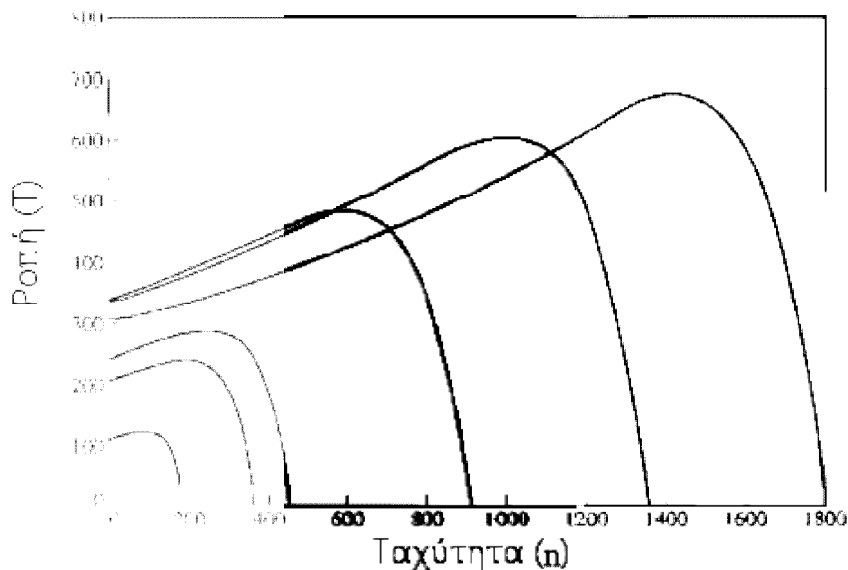
Ο βαθμωτός έλεγχος ανοιχτού βρόχου χρησιμοποιείται στους οδηγούς μεταβλητής συχνότητας εκτενώς, ένεκα των πλεονεκτημάτων που πηγάζουν από την κατασκευή του και είναι κυρίως οικονομικοί. Η απλότητα στον σχεδιασμό και η αξιοπιστία αυτών των συστημάτων αποτελεί εναλλακτική του διανυσματικού ελέγχου σε εφαρμογές που δεν χρειαζόμαστε μεγάλη ακρίβεια. Ο συγκεκριμένος βαθμωτός έλεγχος χρησιμοποιεί τη μέθοδο του ανοιχτού βρόχου, δηλαδή χωρίς ανατροφοδότηση όπως φαίνεται στο κάτωθι μπλόκ διάγραμμα (σχήμα 4.18).



Σχήμα 4.18 Μπλόκ διάγραμμα ελέγχου V/f

Εάν η συχνότητα του σήματος, που οδηγούμε τον στάτη της μηχανής μεταβληθεί, προφανώς θα μεταβληθεί και η σύγχρονη ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου ανάλογα. Όταν ο κινητήρας τροφοδοτηθεί με την ονομαστική συχνότητα, η συχνότητα αυτή καλείται βασική συχνότητα. Κάνοντας χρήση ενός οδηγού VFD μπορούμε να μεταβάλλουμε την συχνότητα είτε πάνω είτε κάτω από την βασική. Παρόλα ταύτα είναι σημαντικό να κρατάμε την τάση και την ροπή στα επιθυμητά όρια, καθώς μεταβάλλουμε την συχνότητα, ούτως ώστε να εξασφαλίζουμε την ομαλή και ασφαλή λειτουργία του κινητήρα.

Όταν ο κινητήρας τροφοδοτηθεί με συχνότητα χαμηλότερη της βασικής, είναι αναγκαίο να μειώσουμε την τάση τροφοδοσίας -ανάλογα-, ώστε να αποφύγουμε την περίσσεια ροή δυναμορεμάτων. Όταν η τάση του κινητήρα μεταβάλλεται ανάλογα με την συχνότητα, η μαγνητική ροή στο διάκενο της μηχανής θα παραμένει περίπου σταθερή. Άραγε η ροπή θα κυμαίνεται σε αρκετά υψηλά επίπεδα. Μολαταύτα, η ισχύς του κινητήρα θα πρέπει να μειωθεί, καθώς με αυτόν τον τρόπο θα προστατέψουμε τον κινητήρα από την υπερθέρμανση του τυλίγματος του στάτη.



Σχήμα 4.19 Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας για διάφορες τιμές V/f

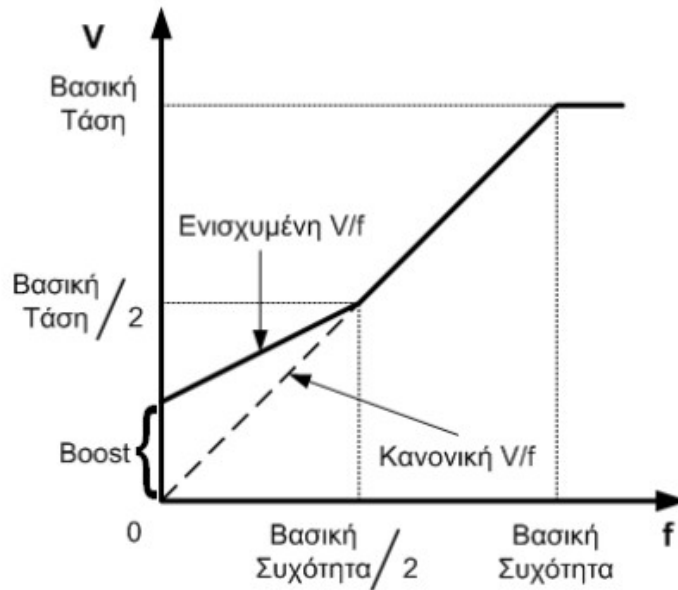
Ο οδηγός αυτός όπως είπαμε μετράει το ρεύμα του στάτη αλλά δεν μπορεί να το διαχωρίσει στις 2 συνιστώσες I_m και I_r , αγνοώντας έτσι την συζευγμένη μορφή των εξισώσεων του μοντέλου της επαγωγικής μηχανής. Όπως βλέπουμε στο μπλόκ διάγραμμα, το ρεύμα που μετρά και ανατροφοδοτεί το σύστημά μας, εξυπηρετεί στην προστασία από υπερφόρτιση, στην προστασία των ηλεκτρονικών διακοπτικών στοιχείων και στον περιορισμό του ρεύματος στα τυλίγματα του κινητήρα. Μερικοί σύγχρονοι οδηγοί βαθμωτού ελέγχου εισάγουν την τεχνολογία της αντιστάθμισης της ολίσθησης (slip compensation) ώστε να κρατάνε σταθερή την ροπή του κινητήρα ανεξαρτήτου φόρτισής του.

Η μέθοδος οδήγησης V/f συνίσταται σε εφαρμογές οι οποίες έχουν μάλλον σταθερές συνθήκες λειτουργίας (σταθερό φορτίο) όπως σε αντλίες, συμπιεστές, ταινιόδρομους και φτερωτές. Τα φορτία αυτά λειτουργούν με σταθερή μάλλον ταχύτητα, και μικρές μεταβολές αυτής δεν έχουν κάποιο ιδιαίτερο αντίκτυπο στο τελικό αποτέλεσμα.

Εφαρμογές κατά τις οποίες δεν συνίσταται η χρήση οδηγού με βαθμωτό έλεγχο είναι :

- Εφαρμογές στις οποίες ο κινητήρας στρέφεται με χαμηλές στροφές (κάτω από 5Hz).

Στις χαμηλές στροφές η ροπή είναι μικρή επειδή η πτώση τάσης στον στάτη επηρεάζει το πλάτος του ρεύματος του δρομέα. Καθώς λοιπόν κρατάμε σταθερό τον λόγο V/f αντιλαμβανόμαστε την δυσκολία του κινητήρα να περιστραφεί στις χαμηλές στροφές. Πολλοί οδηγοί V/f χρησιμοποιούν την τεχνική start boost ή ενίσχυση τάσης εκκίνησης ελλημιστή, που επιτρέπει στην τάση να έχει μεγαλύτερη τιμή εκκίνησης (ενισχυμένη) ώστε να δημιουργηθεί μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης. Παρακάτω στο σχήμα 4.20 φαίνεται η χαρακτηριστική τάσης – συχνότητας και γίνεται αντιληπτή η λειτουργία της ενίσχυσης τάσης (voltage boost).

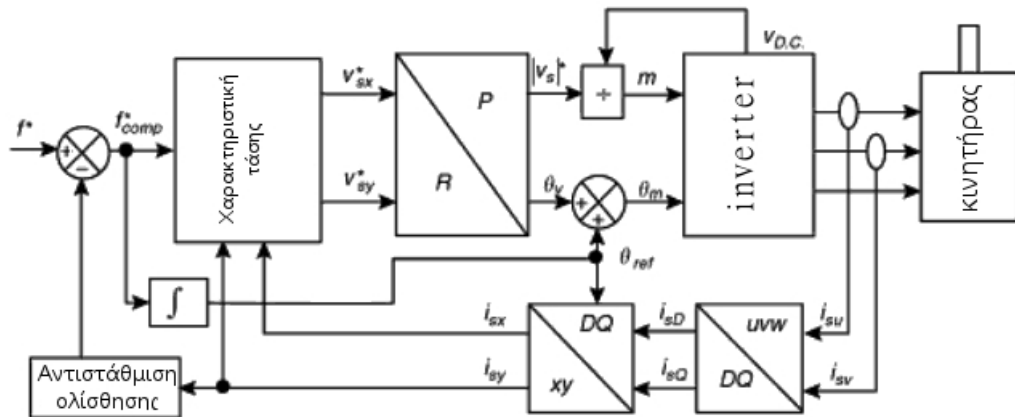


Σχήμα 4.20 Λειτουργία voltage boost

- Εφαρμογές οι οποίες απαιτούν μεγαλύτερη δυναμική συμπεριφορά – απόδοση, μεγαλύτερη από 50rad/sec,
- Εφαρμογές οι οποίες απαιτούν γραμμικό έλεγχο ροπής για τον προσδιορισμό της θέσης ή της δύναμης
- Εφαρμογές οι οποίες απαιτούν τον ευθύ έλεγχο ροπής μέσω της μεταβολής του ρεύματος του δρομέα, παρά μέσω της μεταβολής της συχνότητας.
- Εφαρμογές οι οποίες απαιτούν ακριβή έλεγχο της ταχύτητας.

4.7 Διανυσματικός έλεγχος ανοιχτού βρόχου

Η ανάπτυξη του διανυσματικού ελέγχου ανοιχτού βρόχου έγινε για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί που εισάγει ο οδηγός με βαθμωτό έλεγχο, με σημαντικότερο την ιδιαίτερα μικρή ροπή στις χαμηλές στροφές όπως αναφέρθηκε πιο πριν. Το μπλόκ διάγραμμα του συστήματος φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 4.21 Μπλόκ διάγραμμα διανυσματικού ελέγχου ανοιχτού βρόχου

Αυτού του είδους ο οδηγός διαφοροποιείται αισθητά από τον αντίστοιχο (ανοιχτού βρόχου) οδηγό βαθμωτού ελέγχου ως προς τα ακόλουθα :

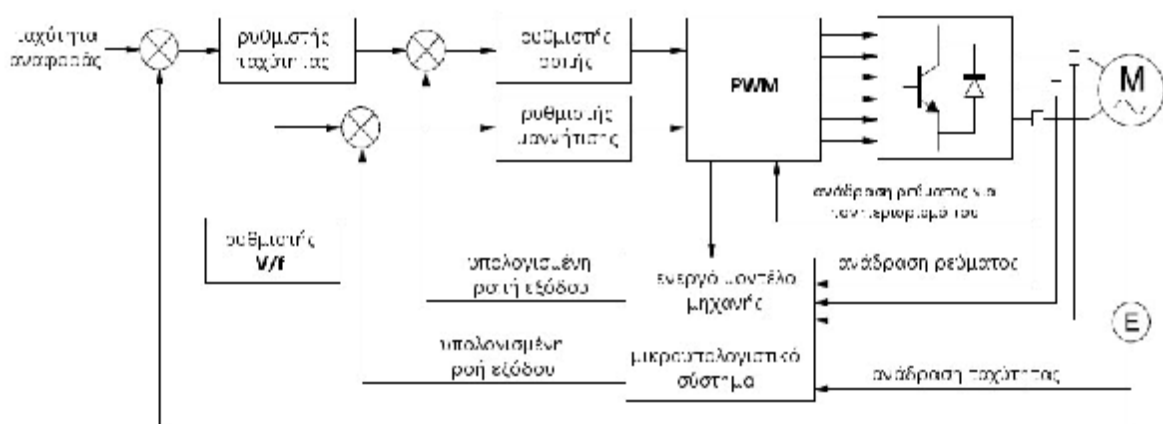
- Ο οδηγός διανυσματικού ελέγχου ανοιχτού βρόχου χρησιμοποιεί μαθηματικό μοντέλο για την ανάλυση και τον υπολογισμό των δύο διανυσμάτων ρεύματος (I_m και I_r) σε πραγματικό χρόνο,
- Προσδιορίζει την ολίσθηση ώστε να παρέχει την ακριβή ταχύτητα του δρομέα, βασιζόμενος στις διάφορες παραμέτρους του κινητήρα, χωρίς την χρήση περιστροφικού κωδικοποιητή. Αυτή η μέθοδος οδηγεί σε καλύτερη αντιστάθμιση ολίσθησης σε όλο το εύρος λειτουργίας του κινητήρα.

Όλα τα παραπάνω έχουν ως συνέπεια την καλύτερη και αποδοτικότερη λειτουργία του κινητήρα. Με βάση τον τελευταίο έλεγχο μπορούμε πλέον να λειτουργήσουμε τον κινητήρα σε αργές στροφές με αυξημένη ροπή. Δεν πρέπει να ξεχνάμε όμως ότι επειδή υπολείπεται της χρήσης ανατροφοδότησης της εξόδου, ουσιαστικά δεν είμαστε σε θέση να ρυθμίσουμε την ροπή του κινητήρα (γίνεται προσεγγιστικά).

4.8 Διανυσματικός έλεγχος κλειστού βρόχου

Ο οδηγός διανυσματικού ελέγχου κλειστού βρόχου αποτελεί ένα σύστημα με ανατροφοδότηση 2 επιπέδων, που αναλύεται σε 2 κλάδους ελέγχου, έναν για τον έλεγχο της ταχύτητας και έναν για τον έλεγχο του ρεύματος (δηλαδή της ροπής).

Ο έλεγχος της ταχύτητας του κινητήρα γίνεται κατά τα γνωστά, δηλαδή με τον έλεγχο της συχνότητας που τροφοδοτούμε τον κινητήρα μέσω του οδηγού. Από την άλλη ο έλεγχος της ροπής γίνεται μέσω της μεταβολής του ρεύματος του δρομέα. Στο σχήμα 4.22 φαίνεται ένα ενδεικτικό μπλόκ διάγραμμα που περιγράφει την λειτουργία του οδηγού διανυσματικού ελέγχου κλειστού βρόχου.



Σχήμα 4.22 Μπλόκ διάγραμμα συστήματος διανυσματικού ελέγχου με ανατροφοδότηση

Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι γίνεται χρήση αισθητηρίου για την ρύθμιση της ταχύτητας, κάτι το οποίο δεν γίνεται στον οδηγό διανυσματικού ελέγχου ανοιχτού βρόχου. Η λειτουργία του συστήματος δεν διαφέρει ιδιαίτερα από τις υπόλοιπες τοπολογίες που παρουσιάσαμε προηγουμένως. Η τάση αναφοράς οδηγείται σε έναν συγκριτή ώστε να έχουμε το σφάλμα του ελεγκτή ταχύτητας. Έπειτα το σήμα σφάλματος μετατρέπεται στο ρεύμα αναφοράς, καθώς έτσι διαχειριζόμαστε την ροπή. Το σήμα αυτό συγκρίνεται με το υπολογισμένο ρεύμα που ανατροφοδοτείται από το κύκλωμα της μηχανής, και το σφάλμα αυτό μας δείχνει αν πρέπει ο κινητήρας να επιταχύνει ή να επιβραδύνει. Όπως και πριν έχουμε ένα κύκλωμα για τον έλεγχο V/f. Στο τέλος τα σήματα εισέρχονται στην μονάδα ελέγχου του inverter και τα διακοπτικά στοιχεία ανάλογα τον αλγόριθμο βγάζουν την έξοδο.

Όπως είδαμε οι οδηγοί που χρησιμοποιούν την τεχνική διανυσματικού ελέγχου είναι πολύπλοκοι στην κατασκευή άρα και ασύμφοροι οικονομικά. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ελάχιστα στην βιομηχανία, παρά μόνο σε ελάχιστες εφαρμογές. Οι εφαρμογές αυτές απαιτούν πολύ ακριβή ρύθμιση των στροφών (0,001%), πολύ γρήγορη απόκριση ροπής της τάξεως των 1-10msec. Τυπικές εφαρμογές που χρησιμοποιούνται τέτοιου είδους κινητήρες είναι σε γεραμούς, βιομηχανικούς εκτυπωτές, αυτοματοποιημένα συστήματα κατασκευής αγαθών κλπ

Οι οδηγοί αυτοί, επειδή έχουν ανατροφοδότηση, γρήγορα καταλαβαίνουμε ότι αποτελούνται από 2 ελεγκτές, ήτοι έναν αναλογικό και έναν ολοκληρωτικό. Σε παλαιότερα συστήματα ο χειριστής εισήγαγε χειροκίνητα τις τιμές για τα P και I που υπολόγιζε, πράγμα το οποίο απαιτούσε πολύ εμπειρία, ώστε να επιτευχθεί σφάλμα μόνιμης κατάστασης πολύ μικρό. Τελευταία καθώς η τεχνολογία των υπολογιστών αναπτύσσεται ραγδαία έχουν γραφτεί αλγόριθμοι για την ρύθμιση των μεταβλητών μέσω του συστήματος χωρίς να επεμβαίνει ο χειριστής.

Τα μειονεκτήματα αυτού του είδους των οδηγών συνίσταται σε :

- Οικονομικά ασύμφοροι, λόγω του πολύπλοκου τρόπου ελέγχου
- Ο περιστροφικός κωδικοποιητής είναι δύσκολο να τοποθετηθεί στον δρομέα της μηχανής, οπότε αυξάνεται πάλι το κόστος.
- Η αναγεννητική πέδηση είναι δυσκολότερη με οδηγό διανυσματικού ελέγχου παρά με βαθμωτού

4.9 Πλεονεκτήματα χρήσης VSD

Εξοικονόμηση ενέργειας

Οι ηλεκτρονικοί οδηγοί προσφέρουν εξοικονόμηση ενέργειας με 2 τρόπους, άμεσα με μικρότερη κατανάλωση και έμμεσα με την βελτίωση του τελικού προϊόντος.

Η άμεση εξοικονόμηση ενέργειας είναι δυνατή μόνο φυγοκεντρικά (στρεφόμενα) φορτία όπως είναι οι περιστροφικές αντλίες, οι φτερωτές, οι φυσητήρες κλπ. Αυτές οι εφαρμογές, στο παρελθόν, λειτουργούσαν με σταθερή ταχύτητα, ενώ στις μέρες μας λειτουργούν με βάση την εφαρμογή καθώς ο οδηγός της μηχανής μπορεί να αλλάζει την ταχύτητά του οπότε και να ρυθμίζει την ροή σε μια αντλία λ.χ. Άλλο παράδειγμα που χρησιμοποιούνται οι οδηγοί για την εξοικονόμηση της ενέργειας είναι τα γνωστά σε όλους πλέον κλιματιστικά «ινβέρτερ», που χρησιμοποιούν παρόμοια ιδεολογία.

Σύμφωνα με τους νόμους της ομοιότητας (laws of affinity) που ισχύουν για φυγοκεντρικές αντλίες,

- Η παροχή της αντλίας μεταβάλλεται ανάλογα με τον αριθμό των στροφών,
- Το μανομετρικό (πίεση) της αντλίας μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας περιστροφής,
- Η ισχύς της αντλίας μεταβάλλεται ανάλογα με τον κύβο της ταχύτητας περιστροφής.

Σύμφωνα με τα παραπάνω γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι εφόσον η ισχύς της αντλίας μεταβάλλεται με τον κύβο της ταχύτητας περιστροφής της, αν μειώσουμε στο μισό την ταχύτητα, αυτομάτως μειώνουμε στο 1/8 την κατανάλωση της μηχανής μας. Με αυτόν τον τρόπο επομένως πετυχαίνουμε μεγάλη οικονομία στην καταναλισκόμενη από τον κινητήρα ενέργεια.

Ευφύεστερος και αποδοκότερος έλεγχος αυτοματοποιημένων διαδικασιών

Χρησιμοποιώντας οδηγούς για την ρύθμιση της ταχύτητας σε κινητήρες έχει άμεσο επακόλουθο τον αποδοτικότερο έλεγχο των εφαρμογών. Για παράδειγμα ξέρουμε από την μεταλλειολογία ότι για την ανοδίωση του αλουμινίου π.χ. ανάλογα με τις διαστάσεις των ράβδων υπολογίζεται ο χρόνος που θα μείνουν στο μπάνιο αλάτων (salts bath). Έτσι αυτόματα μπορούμε να μεταβάλλουμε την ταχύτητα του ταινιοδρόμου που τροφοδοτεί το μπάνιο με το υλικό μας, ώστε να μην μπλοκάρουν οι ράβδοι στο τέλος του ταινιοδρόμου, κάτι που αν μελετηθεί εκτενώς δύναται να γίνει πλήρως αυτοματοποιημένο, οδηγώντας σε αύξηση της παραγωγικότητας, αφενός και αφετέρου στην εξοικονόμηση ενέργειας.

Λιγότερη μηχανική καταπόνηση

Ξεκινώντας έναν κινητήρα απ' ευθείας από το δίκτυο προκαλούμε μεγαλύτερη καταπόνηση στα μηχανικά συστήματα που οδηγεί ο κινητήρας, καθώς αυτός αναπτύσσει τις μέγιστες στροφές σε ελάχιστο χρονικό διάστημα. Με τους οδηγούς μεταβολής ταχύτητας πετυχαίνουμε από την μία

την μεγαλύτερη ζωή των συστημάτων και από την άλλη μειώνουμε αισθητά την ανάγκη για συντήρηση.

Επίσης δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι οι επαγωγικές μηχανές κατά την εκκίνησή τους απ' ευθείας από δίκτυο έχουν πολύ μεγάλο ρεύμα εκκίνησης, πράγμα που μας προκαλεί μεγάλη πτώση τάσης στο σύστημά μας.

Βελτίωση συντελεστή ισχύος

Ανάλογα με το σύστημα που χρησιμοποιούμε για την τροφοδότηση του κινητήρα έχουμε και τον αντίστοιχο συντελεστή ισχύος. Όταν μια γέφυρα ανόρθωσης αποτελούμενη από διόδους τροφοδοτεί έναν οδηγό ο συντελεστής ισχύος είναι σχεδόν μονάδα σε όλο το εύρος ταχύτητας του κινητήρα. Αν η τροφοδότηση όμως γίνει από γέφυρα αποτελούμενη από θυρίστορ ο συντελεστής ισχύος μειώνεται στο 0,9 και μειώνεται ανάλογα με τις στροφές του κινητήρα φτάνοντας σε τιμές τάξης 0,5. Η οδηγία που χρησιμοποιούν την τεχνική PWM για να τροφοδοτήσουν τον κινητήρα προσφέρουν έναν σταθερό συντελεστή ισχύος ανεξαρτήτου φόρτισης της μηχανής μας.

4.10 Μειονεκτήματα χρήσης VSD

Φυσικά όπως όλα τα πράγματα στη φύση, έτσι και η χρήση οδηγών για την μεταβολή της ταχύτητάς τους, γίνεται με επακόλουθα κάποια μειονεκτήματα. Τα πιο απλά τύπου οικονομικό κόστος, χώρος και ψύξη του οδηγού, καθώς και τα πιο σύνθετα που παρουσιάζονται στην συνέχεια.

Προβλήματα με ακουστικό θόρυβο,

Είναι γνωστό πως σε αρκετές εγκαταστάσεις, η τροφοδότηση ενός κινητήρα μέσω οδηγού προκαλεί αύξηση του ακουστικού θορύβου που παράγει ο κινητήρας. Ο θόρυβος αυτός οφείλεται στην μη τέλεια ημιτονοειδή καμπύλη του ρεύματος στην έξοδο του αντιστροφέα, ο οποίος παράγει ταλαντώσεις στα δυναμοελάσματα του κινητήρα. Οι ατέλειες αυτές όπως έχουμε αναφέρει προηγουμένως, οφείλονται στην εν μέρει ατελή συμπεριφορά των διακοπτικών στοιχείων. Όσο αυξάνουμε την συχνότητα τους οι ατέλειες στο ημίτονο μειώνονται και παράλληλα και ο θόρυβος του κινητήρα. Ένας άλλος τρόπος για την μείωση των ταλαντώσεων, άρα και του θορύβου είναι η τοποθέτηση ενός φίλτρου LC ανάμεσα στην έξοδο του οδηγού και την είσοδο του κινητήρα.

Ένας δεύτερος ακουστικός θόρυβος όμως προέρχεται από τα ίδια τα διακοπτικά στοιχεία και την λειτουργία τους. Όπως ξέρουμε οι συχνότητες που ακούει ο άνθρωπος είναι της τάξεως των 20Hz – 20kHz, πράγμα που σημαίνει πως τα διακοπτικά στοιχεία πρέπει να λειτουργούν σε συχνότητες υψηλότερες από 20kHz. Αυτό οδηγεί σε προσεκτικότερη μελέτη και επιλογή των ηλεκτρονικών ισχύος, αυξημένες απαιτήσεις ψύξης κλπ.

Προβλήματα υπερθέρμανσης του κινητήρα

Οι περισσότεροι κατασκευαστές κινητήρων, όπως είδαμε προηγουμένως, πιστοποιούν τα προϊόντα τους βάση NEMA, IEC κλπ. Οι χαρακτηριστικές λειτουργίες τους, επομένως βασίζονται στα ονομαστικά μεγέθη λειτουργίας (τάση, ένταση, συχνότητα, φορτίο) του κινητήρα.

Για τις περισσότερες εφαρμογές κίνησης που απαιτούν μικρή ισχύ οι οδηγοί μεταβολής της ταχύτητας είναι αρκετά ικανοποιητικοί και αποδοτικοί. Λόγω της υψηλής διακοπτικής συχνότητας κατορθώνουν να παράγουν ημιτονοειδής σήματα με μικρό αρμονικό περιεχόμενο.

Στους ινβέρτερς όμως που τροφοδοτούν μεγαλύτερους κινητήρες, επειδή τα διακοπτικά στοιχεία έχουν περιορισμούς όπως αναφέρθηκε κατά την διάρκεια της εργασίας, εισάγουν έντονο αρμονικό περιεχόμενο. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί στην ανάπτυξη αρμονικών ρεύματος και μεγαλύτερης θερμοκρασίας (απώλειες σιδήρου – χαλκού) στα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα.

Με βάση τις σημερινές μεθόδους για την παραγωγή ημιτονοειδών σημάτων μέσω τεχνικών διαμόρφωσης εύρους πλάτους, οι κατασκευαστές είναι σε θέση να περιορίσουν τις αρμονικές που παράγουν οι οδηγοί. Σε μεγαλύτερους κινητήρες, όμως, που λειτουργούν με τάση 6600VAC

λ.χ. οι απότομες μεταβολές τις τάσεις μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στις μονώσεις των τυλιγμάτων.

Στους αυτόψυκτους – αερόψυκτους κινητήρες, ελάττωση ταχύτητας του άξονα του κινητήρα συνεπάγεται με μείωση της ροής του αέρα. Σε συνθήκες λειτουργία υπό πλήρη ροπή και μειωμένη ταχύτητα ο κινητήρας προφανώς αναπτύσσει μεγαλύτερη θερμοκρασία πράγμα που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στις μονώσεις των τυλιγμάτων του κινητήρα και σαφώς επηρεάζει την μακροζωία του.

Πρόβλημα με αρμονικές στην τροφοδοσία

Οι οδηγοί μεταβολής ταχύτητας επειδή συμπεριφέρονται σαν μη γραμμικά φορτία μολύνουν με αρμονικές τάσεις – έντασης το δίκτυο. Οι ανώτερες αρμονικές μπορούν να προκαλέσουν υπερθέρμανση των μετασχηματιστών, των καλωδίων, των μηχανών και των πυκνωτών που ανήκουν στην ίδια γραμμή διανομής. Υπάρχουν διάφορα πρωτόκολλα που ρυθμίζουν το μέγιστο αρμονικό περιεχόμενο που μπορεί να έχει μια γραμμή όπως π.χ. το IEEE 519.

Παρακάτω, στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούνται από τους κατασκευαστές για να μειωθεί το αρμονικό περιεχόμενο των οδηγών, και τα διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε μιας.

Όπως αναφέραμε και πριν σε εφαρμογές μικρής ισχύος η μείωση των αρμονικών γίνεται με την αύξηση της διακοπτικής συχνότητας εξόδου του οδηγού, πράγμα που δεν μπορεί να υλοποιηθεί σε μεγαλύτερους οδηγούς. Εκεί μονόδρομος είναι η χρήση μεγαλύτερης τάξης παλμών γέφυρας κατά την μετατροπή του E.P. σε Σ.Ρ.

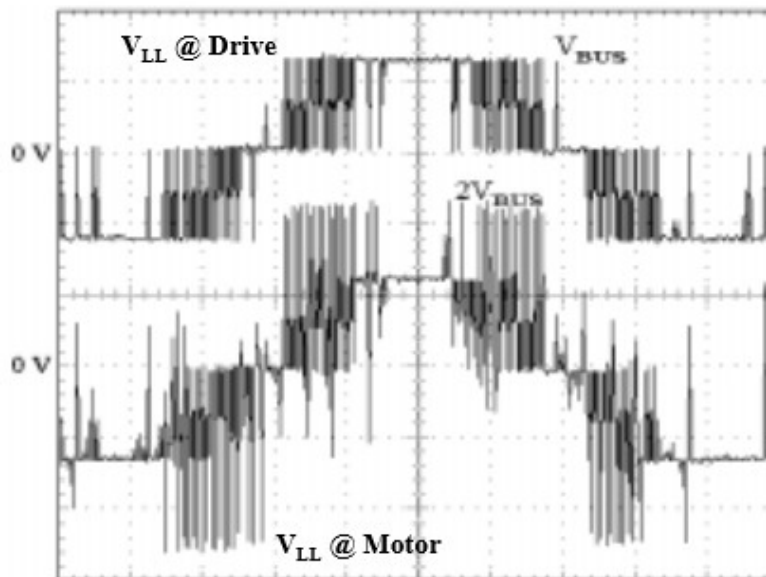
Τοπολογία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
6 παλμική γέφυρα με φίλτρο LC	<ul style="list-style-type: none"> Χαμηλό κόστος Απλή τεχνολογία Εύκολη εφαρμογή 	<ul style="list-style-type: none"> Ογκώδης Λιγότερο αποδοτική στο φιλτράρισμα των αρμονικών
12 παλμική γέφυρα	<ul style="list-style-type: none"> Εξαλείφει την 5^η, 7^η, 17^η, 19^η αρμονική Απλή τεχνολογία Εύκολη εφαρμογή 	<ul style="list-style-type: none"> Ογκώδης Ακριβότερη από την 6παλμική γέφυρα Πολλές 12 παλμικές γέφυρες μεταφέρουν το αρμονικό περιεχόμενο στην 11^η και την 13^η αρμονική
Φίλτρα αρμονικών	<ul style="list-style-type: none"> Φιλτράρουν την εγκατάσταση Εξαλείφουν σε μεγάλο ποσοστό τις αρμονικές Φτηνά στην αγορά 	<ul style="list-style-type: none"> Υπολογισμένα για συγκεκριμένη εφαρμογή Απαιτούν μελέτη υπολογισμού
Ενεργά φίλτρα	<ul style="list-style-type: none"> Υψηλή τεχνολογία Πολύ αποδοτικά Μπορούν να 	<ul style="list-style-type: none"> Πολύ υψηλή τιμή

- χρησιμοποιηθούν τοπικά ή σε όλη την εγκατάσταση
- Εξαλείφουν το αρμονικό περιεχόμενο
 - Μπορούν να συνδυαστούν με περισσότερα φίλτρα

Πίνακας 4.1 Διάφορες τεχνικές μείωσης του αρμονικού περιεχομένου

Προβλήματα λόγω του φαινομένου αντανάκλασης κύματος (**reflected wave phenomenon**)

Η παλμοσειρά (PWM) που παράγει ο αντιστροφέας μεταδίδεται μέσω του καλωδίου στα τερματικά του κινητήρα. Η τάση κορυφής της εξόδου του αντιστροφέα έχει ίσο πλάτος με την τάση που έχει ο οδηγός μετά την ανόρθωση V_{bus} (DC bus) και σαφώς μπορεί να περιγραφεί από 2 χρόνους, ανόδου και καθόδου, τους οποίους ρυθμίζουν τα διάφορα διακοπτικά στοιχεία. Η τάση στα τερματικά του κινητήρα δεν είναι η V_{bus} αλλά εξαρτάται και από άλλους παράγοντες με σημαντικότερους το μήκος του καλωδίου τροφοδοσίας και την σύνθετη αντίσταση του κινητήρα. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια παλμοσειρά στην οποία φαίνονται ξεκάθαρα οι αιχμές που παρουσιάζει η τάση στα τερματικά του κινητήρα το πλάτος της οποίας είναι μέχρι και 2 φορές μεγαλύτερο της V_{bus} . Άμεσο επακόλουθο των τάσεων αυτών είναι ότι προκαλείται φθορά στις μονώσεις των τυλιγμάτων, πράγμα το οποίο οδηγεί στην πρόωρη γήρανση του κινητήρα.



Σχήμα 4.23 επάνω η τάση εξόδου του μετατροπέα, κάτω η τάση στα τερματικά του κινητήρα

Η λύση σε αυτού του είδους τα προβλήματα είναι η τοποθέτηση ενός RC φίλτρου στα τερματικά του κινητήρα. Η χωρητικότητα απορροφά τις υψηλής συχνότητας αιχμές dV/dt . Το φαινόμενο της

αντανάκλασης του κύματος θα αποφευχθεί αν η τιμή της αντίστασης είναι πολύ κοντά στην τιμή της σύνθετης αντίστασης του καλωδίου.

Βιβλιογραφία

Practical Variable Speed Drives and Power Electronics – Malcolm Barnes ISBN 07506 58088

Power Electronics Handbook 3rd edition – Muhammad H. Rashid ISBN 978-0-12-382036-5

Electric Machinery Fundamentals 5th edition – Stephen J. Chapman ISBN 978-0-07-352954-0

<http://www.schneider-electric.hu/documents/automation-and-control/asg-3-motors-and-loads.pdf>

http://www.hna.gr/~seecs/cv/ht/ikx_ergasies/s-IKX-ergasia-aa-58.pdf

<http://www.reliance.com/pdf/drives/whitepapers/D7161.pdf>

http://dspace.lib.ntua.gr/bitstream/123456789/5542/3/marampeasp_fuelcells.pdf

http://library.utem.edu.my/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=5058&Itemid=342

<http://en.wikipedia.org/>

<http://www.ab.com/support/abdrives/documentation/techpapers/ieee/pcic.pdf>

http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/br/1204-br000_-en-p.pdf

<http://www.gamak.com>