

Πτυχιακή Εργασία

Θέμα:

Μελέτη & Κατασκευή Κυκλώματος Ελέγχου Αντιστροφέα και Έλεγχος Τριφασικού Ασύγχρονου Κινητήρα



Υπεύθυνοι σπουδαστές:

Γρηγόρης Κορομηλάς

Γιάννης Μαρής

Υπεύθυνος Καθηγητής:

Ηρακλής Αθ. Βυλλιώτης

Τμήμα Ηλεκτρολογίας Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ανάγκη της σημερινής εποχής καθιστούν τους ηλεκτρικούς κινητήρες ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για την ζωή μας. Η χρήση τους σε απλές εγκαταστάσεις, ανελκυστήρες, αντλίες κτλ έως και σε μονάδες παραγωγής όπως εργοστάσια, βιοτεχνίες κτλ έχουν φθάσει το πλήθος και την λειτουργία τους σε προχωρημένα επίπεδα.

Εκτός όμως από τους ηλεκτρικούς κινητήρες σημαντικό κομμάτι είναι και ο έλεγχός τους με διατάξεις που λέγονται αντιστροφείς. Με αυτές τις διατάξεις η λειτουργία των κινητήρων απλοποιήθηκε και έγινε περισσότερο ευέλικτη. Έτσι λοιπόν με τους αντιστροφείς είναι εφικτή η αλλαγή φοράς, η ρύθμιση στροφών και η ομαλή πέδηση του κινητήρα με ανόδινο τρόπο για τον άνθρωπο αλλά και για τους κινητήρες.

Στη πτυχιακή άσκηση θα επικεντρωθούμε στους ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα καθώς επίσης και στη διάταξη ελέγχου με αντιστροφή AC/DC/AC.

Το κατασκευαστικό μέρος περιλαμβάνει την βάση στήριξης, την διάταξη του αντιστροφέ, καθώς επίσης και τον πίνακα ελέγχου, ο οποίος περιλαμβάνει τον αυτόματο διακόπτη START – STOP και τα όργανα μέτρησης.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Ορισμός ηλεκτρικού κινητήρα	1
Κεφάλαιο 2: Γενική δομή μηχανών	2
Κεφάλαιο 3: Κατηγορίες ηλεκτροκινητήρων	5
Κεφάλαιο 4: Ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες	7
4.1 Κατασκευαστικό μέρος ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων	9
4.1α Τύλιγμα Κλωβού	9
4.2 Αρχή λειτουργίας ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων	9
4.2α Είδη ασύγχρονων κινητήρων	10
4.3 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά δρομέα ATK	12
4.4 Ένταση ρεύματος ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα	14
4.5 Εκκίνηση ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα και οι διατάξεις εκκίνησης ..	16
4.5β Εκκίνηση με αστέρα τρίγωνο.....	17
4.5γ Άλλες μέθοδοι εκκίνησης.....	18
4.6 Αλλαγή φοράς περιστροφής.....	19
4.7 Η εκκίνηση και η λειτουργία του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα σε μονοφασικό δίκτυο	20
4.8 Ροπή ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.....	21
4.9 Πέδηση των ασύγχρονων κινητήρων.....	22
4.10 Διφασική λειτουργία ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.....	24
4.11 Απώλειες ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα	26
4.12 Βαθμός απόδοσης.....	27
4.13 Υπολογισμός της διατομής των αγωγών του τυλίγματος.....	27
4.14 Πινακίδα ηλεκτροκινητήρων.....	28
4.15 Προδιαγραφές.....	29
4.16 Ασφάλειες – Διακόπτες – Αγωγοί.....	31
4.17 Βλάβες και επισκευές ATK	
4.18 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της συχνότητας του δικτύου.....	34
4.18α Έλεγχος της συχνότητας με μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας.....	38
Κεφάλαιο 5: Αντιστροφείς ή Inverters	40
5.1 Γενικά περί αντιστροφέων	40
5.1α Κατηγορίες αντιστροφέων	40

5.1β Αρχή λειτουργίας αντιστροφέων	42
5. 2 Μονοφασικός αντιστροφέας σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας.	45
5.2α Γενικά	45
5.2β Λειτουργία με ωμικό φορτίο	46
5.3 Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας	47
5.3α Θεωρητικό μέρος	47
5.3β Λειτουργία με ωμικό φορτίο	48
5.3γ Λειτουργία με επαγωγικό φορτίο	51
5.3δ Λειτουργία με χωρητικό φορτίο	54
5.3ε Λειτουργία με ωμικό – επαγωγικό φορτίο	54
5.3στ Λειτουργία με ωμικό – χωρητικό φορτίο	57
5.4 Τριφασικός αντιστροφέας με πηγή συνεχούς τάσης	58
5.4α Εισαγωγή	58
5.4β Αρχή λειτουργίας τριφασικού αντιστροφέα με πηγή συνεχούς τάσης	59
5.4γ Τριφασικός αντιστροφέας με πηγή συνεχούς τάσης σε συνδεσμολογία φορτίο σε αστέρα	62
5.5 Αντιστροφέας με πηγή συνεχούς ρεύματος	68
5.5α Εισαγωγή	68
5.5β Λειτουργία του αντιστροφέα	69
Κεφάλαιο 6 : Κυκλώματα χειροκίνητου ελέγχου του αντιστροφέα.....	72
6α : κύκλωμα ισχύος.....	73
6β:Βοηθητικό κύκλωμα.....	74
6γ:Εσωτερικο κύκλωμα αντιστροφέα- ρυθμιση παραμέτρων....	75
Κεφάλαιο 7 : Μετρήσεις	76
Βιβλιογραφία.....	79

Κεφάλαιο 1: Ορισμός ηλεκτρικού κινητήρα

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες αποτελούν μια κατηγορία στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών. Το βασικό στοιχείο μιας στρεφόμενης ηλεκτρικής μηχανής είναι η μετατροπή ενέργειας από ηλεκτρική σε μηχανική μορφή και αντίστροφα. Υπάρχουν τρεις τρόποι λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών. Η λειτουργία τους σαν κινητήρες, σαν γεννήτριες και σαν πέδες.

Στην ηλεκτροτεχνία οι κινητήρες και οι γεννήτριες ρεύματος είναι μηχανήματα αντίστοιχης δομής και αντίστροφης λειτουργίας. Σε μια γεννήτρια συνεχούς ρεύματος η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική και αυτό εκφράζεται με την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ στους κινητήρες το ηλεκτρικό ρεύμα μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια.

Η λειτουργία τόσο των ηλεκτρικών γεννητριών όσο και των ηλεκτρικών κινητήρων στηρίζεται στη ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Με βάση λοιπόν το φαινόμενο της επαγωγής όταν ένας αγωγός (δηλαδή ένα αγωγίμο ηλεκτρικά υλικό) κινείται μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο τότε μέσα στον αγωγό αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή δηλαδή ηλεκτρικό δυναμικό το οποίο είναι και το αίτιο εμφάνισης ηλεκτρικού ρεύματος στον αγωγό. Στους κινητήρες αντίστοιχα αξιοποιείται ένα άλλο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

Όταν ένας αγωγός που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα βρεθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο τότε στον αγωγό αυτό ασκείται από το μαγνητικό πεδίο μια δύναμη που τείνει να τον κινήσει. Η δύναμη (F) αυτή είναι ανάλογη με την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος (I), την ένταση του μαγνητικού πεδίου (B), αλλά και το μήκος του αγωγού (L).

$$F = B I L$$

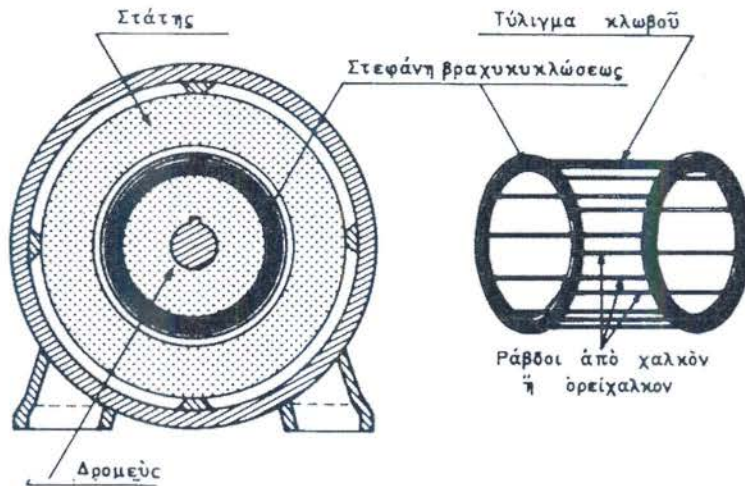
Σημειώνεται πως η φορά της ασκούμενης στον αγωγό δύναμης αντιστρέφεται είτε αν αλλάξει η φορά του ρεύματος, είτε αν αντιστραφεί η πολικότητα του μαγνητικού πεδίου.

Κεφάλαιο 2: Γενική δομή μηχανών

Οι στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές είτε αυτές είναι γεννήτριες, είτε είναι κινητήρες έχουν μια ανάλογη δομή καθώς κατά βάση συνιστούν στρεφόμενα πηνία ειδικής κατασκευής και ποικίλου μεγέθους.

Στις **γεννήτριες εναλλασσομένου ρεύματος** τα δύο άκρα της σπείρας συνδέονται με δύο μεταλλικά δακτυλίδια που είναι ηλεκτρικά μονωμένα ως τον άξονα του τυμπάνου, είναι στερεωμένα πάνω σ' αυτόν και περιστρέφονται μαζί του. Η διάταξη του επαγωγικού τυμπάνου στις γεννήτριες εναλλασσομένου ρεύματος συμπληρώνεται από ψήκτρες από άνθρακα που είναι στερεωμένες στο ακίνητο μέρος της μηχανής και εφάπτονται στα μεταλλικά δακτυλίδια. Οι ψήκτρες αυτές συνδέονται μεταξύ τους με μια εξωτερική αντίσταση. Αυτή η αντίσταση αποτελεί είτε το φορέα του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται από τη γεννήτρια είτε το φορέα τροφοδοσίας ενός κινητήρα.

Οι **κινητήρες** με τη σειρά τους παρά την αρκετά εκτεταμένη διάκρισή τους σε διάφορες κατηγορίες και υποκατηγορίες έχουν κάποια κοινά στοιχεία δομής. Μια παραδοσιακή δομή των ηλεκτροκινητήρων παρουσιάζεται παρακάτω. Οι ηλεκτροκινητήρες έχουν δύο μέλη, ένα σταθερό μέλος που λέγεται **στάτης** (stator) και ένα στρεφόμενο μέλος που λέγεται **δρομέας** (rotor). Επειδή θέλουμε να έχουμε μειωμένη τη μαγνητική αντίσταση των δρόμων της μαγνητικής ροής, οι πυρήνες του στάτη και του δρομέα κατασκευάζονται από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή μονωμένων μεταξύ τους ελασμάτων. Αυτό αποσκοπεί στην ελάττωση των απωλειών δινορρευμάτων. Κάνοντας μια γενική περιγραφή μπορούμε να πούμε πως ο δρομέας είναι βασικά ένας κύλινδρος και ο στάτης ένας κούφιος κύλινδρος. Ο δρομέας και ο στάτης χωρίζονται από ένα μικρό διάκενο αέρα. Το μήκος του διακένου αυτού είναι πολύ μικρό αν συγκριθεί με τη διάμετρο του δρομέα. Το τύλιγμα τυμπάνου βρίσκεται είτε στο στάτη, είτε στο δρομέα. Το μαγνητικό κύκλωμα συμπληρώνεται μέσα από το σιδηρομαγνητικό υλικό του άλλου κύριου μέλους της μηχανής. Στο μέλος αυτό τοποθετούνται τα πηνία διέγερσης ή τυλίγματα πεδίου που ενεργούν σαν κύριες πηγές μαγνητικής ροής.



Σχήμα 2.1: Τύλιγμα κλωβού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα

Στους **κινητήρες επαγωγής** η τοποθέτηση των τυλιγμάτων συνίσταται στην τοποθέτηση πηνίων σε ομοιόμορφα διανεμημένες αύλακες, τόσο στο στάτη όσο και στο δρομέα. Η απόσταση μεταξύ των πλευρών του πηνίου είναι συνήθως ίση με ένα απλό πολικό βήμα. Για να σχηματισθεί ένα πλήρες τύλιγμα τοποθετούνται όμοια πηνία σε άλλα ζευγάρια αυλακιών και στη συνέχεια όλα τα πηνία συνδέονται μεταξύ τους σε ομάδες. Οι ομάδες των πηνίων μπορεί τότε να συνδεθούν σε σειρά ή παράλληλα και σε τριφασικές μηχανές κατ' αστέρα ή κατά τρίγωνο. Μερικά τυλίγματα είναι διπλού στρώματος. Σε τέτοια τυλίγματα κάθε αύλακα περιέχει δύο πλευρές πηνίου, μια στην κορυφή και μια στον πυθμένα της. Κάθε πηνίο έχει μια πλευρά σε πάνω μέρος και την άλλη σε κάτω μέρος αύλακας.

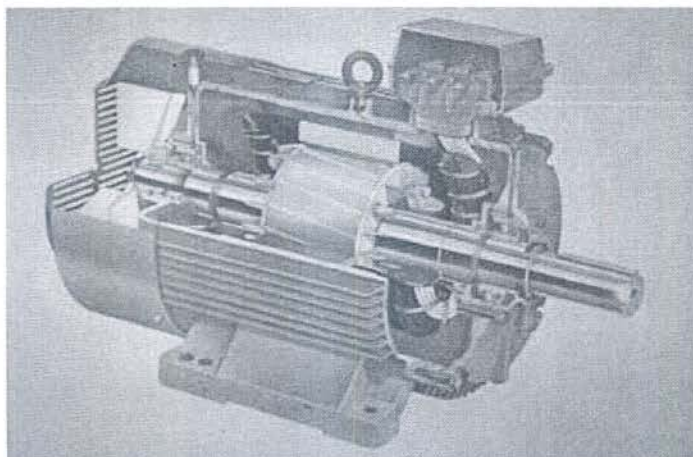
Ένας εναλλακτικός τρόπος τοποθέτησης τυλιγμάτων είναι η διαμόρφωση έκτυπων πόλων γύρω από τους οποίους τυλίγονται συγκεντρωμένα πηνία, που αποτελούν τύλιγμα διέγερσης. Οι έκτυποι πόλοι μπορούν να είναι στο στάτη ή στο δρομέα. Έκτυποι πόλοι στο στάτη χρησιμοποιούνται συνήθως στις μηχανές συνεχούς ρεύματος και πολύ σπάνια σε μικρού μεγέθους σύγχρονες μηχανές. Έκτυποι πόλοι στο δρομέα χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες μηχανές, όπου το τύλιγμα πεδίου είναι στο δρομέα και το τύλιγμα τυμπάνου στο στάτη.

Στις **μηχανές συνεχούς ρεύματος** η σχεδιαστική διαφοροποίηση της δομής τους έγκειται κυρίως στο ότι αντί για δύο μεταλλικά δακτυλίδια το συνεχές ρεύμα τροφοδοτείται με τη βοήθεια μιας διάταξης που λέγεται συλλέκτης. Στην απλούστερη

μορφή του ο συλλέκτης αποτελείται από ένα δακτυλίδι κομμένο στη μέση σε δύο κομμάτια (τομείς του συλλέκτη), τα οποία είναι στερεωμένα στον άξονα του επαγωγικού τυμπάνου, περιστρέφονται μαζί με αυτόν και είναι μονωμένα μεταξύ τους και ως προς τον άξονα. Τα άκρα των δύο αγωγών που συνιστούν μια σπείρα τυλίγματος είναι συνδεδεμένα μόνιμα με τους τομείς του συλλέκτη. Οι ψήκτρες οι οποίες και στις μηχανές συνεχούς ρεύματος είναι στερεωμένες στο ακίνητο μέρος της μηχανής κι εφάπτονται στους τομείς του συλλέκτη, είναι τοποθετημένες σε σημεία αντιδιαμετρικά ως προς τον άξονα.

Κατά τη λειτουργία ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος, διοχετεύεται μέσω των ψηκτρών και του συλλέκτη, συνεχές ρεύμα συγκεκριμένης έντασης, στις σπείρες του τυλίγματος, οι οποίες όμως όπως εξηγήθηκε παραπάνω βρίσκονται μέσα στο μαγνητικό πεδίο της μηχανής. Λόγω του φαινομένου της επαγωγής σε κάθε έναν από τους δύο αγωγούς που συνιστούν μια σπείρα θα ασκηθεί μια δύναμη που θα έχει διεύθυνση εφαπτόμενη στο τύμπανο. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στους δύο αγωγούς κάθε σπείρας διαμορφώνουν ένα ζεύγος δυνάμεων που ασκεί ροπή περιστροφής στο επαγωγικό τύμπανο.

Είναι προφανές ότι η φορά των δυνάμεων που ασκούνται στους δύο αγωγούς κάθε σπείρας είναι η ίδια οποιαδήποτε κι αν είναι η θέση που έχει η σπείρα των δύο αγωγών κατά την περιστροφή του τυμπάνου. Η ροπή περιστροφής του τυμπάνου είναι προφανώς ανάλογη με την ένταση του μαγνητικού πεδίου, με την ένταση του συνεχούς ρεύματος, με το μήκος της σπείρας, αλλά και με την ακτίνα της βάσης του κυλινδρικού τυμπάνου. Οι ροπές όλων των ζευγών που αναπτύσσονται από όλες τις σπείρες τυλίγματος του τυμπάνου ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος αθροίζονται και η συνισταμένη τους είναι αυτή που θέτει σε περιστροφική κίνηση το τύμπανο. Με τον τρόπο αυτό παράγεται μηχανική ενέργεια από έναν κινητήρα που τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα.



Σχήμα 2.2: Ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας

Κεφάλαιο 3: Κατηγορίες ηλεκτροκινητήρων

Οι ηλεκτροκινητήρες διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες στους κινητήρες **συνεχούς ρεύματος** και στους κινητήρες **εναλλασσόμενου ρεύματος**, οι οποίοι καλύπτουν και την πλειοψηφία των εφαρμογών. Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος με τη σειρά τους διακρίνονται σε μονοφασικούς και πολυφασικούς. Τόσο οι μονοφασικοί όσο και οι πολυφασικοί κινητήρες διακρίνονται σε σύγχρονους κινητήρες και σε κινητήρες επαγωγής ή **ασύγχρονους**.

Ένας σύγχρονος κινητήρας αποτελείται από μια σειρά τριών τυλιγμάτων στο στάτορα (στάτης) με ένα απλό στρεφόμενο μέρος. Καθώς το ρεύμα που περνάει από το πηνίο μεταβάλλεται ο κινητήρας εργάζεται ομαλά μόνο στη συχνότητα του ημιτονοειδούς ρεύματος επιτυγχάνοντας μια λειτουργία με σταθερή ταχύτητα από μηδενικό ως πλήρες φορτίο λειτουργίας. Στους ασύγχρονους κινητήρες το ηλεκτρικό ρεύμα χρησιμεύει κυρίως για να επάγει την περιστροφή των τυλιγμάτων παρά για να περιστρέφει ευθέως τον άξονα.

Οι πολυφασικοί κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος είναι κατά βάση μηχανές σταθερής ταχύτητας, αλλά διαφοροποιούνται ως προς κάποια σχεδιαστικά στοιχεία τους με συνέπεια να διαμορφώνονται τέσσερις βασικές υποκατηγορίες των κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος. Στον πιο συνήθη τύπο (DESIGN A,B) έχουμε κανονικές τιμές ροπής και ρεύματος εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση. Στον δεύτερο τύπο (DESIGN C) έχουμε υψηλή ροπή εκκίνησης με κανονική ένταση ρεύματος εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση. Στον τρίτο τύπο (DESIGN D) έχουμε επίσης υψηλή

ροπή εκκίνησης αλλά χαμηλό ρεύμα εκκίνησης, ενώ η ολίσθηση είναι υψηλή. Στον τέταρτο τύπο (DESIGN F) έχουμε χαμηλή ροπή και ρεύμα εκκίνησης αλλά και χαμηλή ολίσθηση.

Εμείς θα ασχοληθούμε κατά κύριο λόγο με τους **ασύγχρονους κινητήρες**.

Οι ασύγχρονοι κινητήρες χωρίζονται σε δύο είδη:

- **Τους μονοφασικούς ασύγχρονους κινητήρες** οι οποίοι διαθέτουν μονοφασικό τύλιγμα στο επαγωγικό τύμπανο του στάτη και η τροφοδοσία τους γίνεται από το μονοφασικό δίκτυο της ΔΕΗ 220V/50Hz.
- **Τους τριφασικούς κινητήρες** οι οποίοι διαθέτουν τριφασικό τύλιγμα στο επαγωγικό τύμπανο του στάτη τους και η τροφοδοσία τους γίνεται από το τριφασικό δίκτυο της ΔΕΗ 380V/50Hz.

Κεφάλαιο 4: Ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες

4.1 Κατασκευαστικό μέρος ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων

Οι ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες χωρίζονται σε δύο είδη:

- Βραχυκυκλωμένος δρομέας
- Δακτυλιοφόρος δρομέας

Και τα δύο είδη των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων έχουν δύο βασικά τμήματα τα οποία είναι:

- Ο Στάτης που αποτελεί το κινητό μέρος του κινητήρα και ο
- Ο Δρομέας που αποτελεί το περιστρεφόμενο μέρος του κινητήρα.

ΣΤΑΤΗΣ	
ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΔΡΟΜΕΑ	ΔΑΚΤΥΛΙΟΦΟΡΟΥ ΔΡΟΜΕΑ
<p>Τα βασικά μέρη είναι το ζύγωμα που αποτελεί το κορμό του κινητήρα. Το σχήμα του είναι κυλινδρικό ή παραλληλεπίπεδο και έχει:</p> <ul style="list-style-type: none">• Διαμόρφωση στήριξης στο κάτω μέρος ώστε να αποτελεί τη βάση και• Κρίκο μεταφοράς στο πάνω μέρος. <p>Τα καπάκια.</p> <p>Το επαγωγικό του τύμπανο που περιλαμβάνει το πυρήνα και το τριφασικό τύλιγμα.</p> <p>Το κιβώτιο ακροδεκτών του που έχει τυποποιημένο συμβολισμό</p>	<p>Τα βασικά μέρη είναι το ζύγωμα. Το επαγωγικό τύμπανο που έχει το πυρήνα και το τριφασικό τύλιγμα.</p> <p>Τα καπάκια.</p> <p>Το κιβώτιο ακροδεκτών που έχει διαμόρφωση:</p> <ul style="list-style-type: none">• Τροφοδοσίας του τυλίγματος του στάτη.• Σύνδεσης του τυλίγματος του δρομέα με τον εκκινητή. <p>Εάν υπάρχει σύστημα ανύψωσης ψηκτρών ο χειρισμός του γίνεται από στρόφαλο που βρίσκεται στο εξωτερικό μέρος του στάτη και λειτουργεί μετά την εκκίνηση του κινητήρα. Με το σύστημα αυτό:</p>

<p>ακροδεκτών.</p> <p>Η κατασκευή του είναι από χυτοσίδηρο.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ανυψώνονται οι ψήκτρες και δεν εφάπτονται πια στα δακτυλίδια και ταυτόχρονα βραχυκυκλώνονται τα τρία(3) δακτυλίδια του κινητήρα. 2. Το σύστημα αυτό έχει αποτέλεσμα να λειτουργεί ο δακτυλιοφόρος κινητήρας σαν ΑΤΚ βραχυκυκλωμένου δρομέα.
---	---

ΔΡΟΜΕΑΣ

ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΔΡΟΜΕΑ	ΔΑΚΤΥΛΙΟΦΟΡΟΥ ΔΡΟΜΕΑ
<p>Ο προορισμός του δρομέα στους ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες είναι:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Να βρίσκεται μέσα στο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη. • Να δημιουργεί στους αγωγούς του το φαινόμενο της επαγωγής και • Να περιστρέφεται. <p>Τα μέρη που περιλαμβάνει ο δρομέας είναι:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ο άξονας • Το επαγωγικό τύμπανο που έχει τον πυρήνα και το τύλιγμα του κλωβού. 	<p>Τα μέρη που περιλαμβάνει ο δρομέας των ΑΤΚ με δακτυλίδια είναι:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ο άξονας • Το επαγωγικό τύμπανο που περιλαμβάνει το πυρήνα και το τριφασικό τύλιγμα με μόνιμη σύνδεση αστέρα(Υ) από το κατασκευαστή και στους αγωγούς του δημιουργείται το φαινόμενο της επαγωγής ενώ το ηλεκτρικό σύστημα κλείνει διαμέσου του εκκινητή.

Ο πυρήνας του επαγωγικού τύμπανου του δρομέα είναι κατασκευασμένος από έλασματα σιδηρομαγνητικού υλικού που είναι μονωμένα μεταξύ τους για να αποφεύγονται τα ρεύματα Foucault. Κατά μήκος της εσωτερικής επιφάνειας του πυρήνα του επαγωγικού τύμπανου σχηματίζονται αυλάκια μέσα στα οποία τοποθετείται το **τύλιγμα του κλωβού**.

4.1α Τύλιγμα Κλωβού

Αποτελείται από:

- Τις ράβδους που πάνω τους δημιουργείται το φαινόμενο της επαγωγής και
- Τα στεφάνια βραχυκύκλωσης που δια μέσου αυτών κλείνει το ηλεκτρικό κύκλωμα του δρομέα.

Οι ράβδοι του κλωβού τοποθετούνται περαστοί μέσα στις οδοντώσεις του πυρήνα του δρομέα που είναι διαφορετικού αριθμού από τις οδοντώσεις του πυρήνα του επαγωγικού τύμπανου του στάτη και έχουν ειδική διαμόρφωση περίπου 15ο ως προς το οριζόντιο επίπεδο και τοποθετούνται τα στεφάνια βραχυκύκλωσης.

Η κατασκευή των τυλιγμάτων κλωβού είναι από χαλκό, αλουμίνιο και μπρούτζο καθώς αυτό εξαρτάται από τις απαιτήσεις του κινητήρα.

4.2 Αρχή λειτουργίας ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων

Οι ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες (ΑΤΚ) λέγονται και επαγωγικοί και αυτό οφείλεται στη λειτουργία τους η οποία βασίζεται στο φαινόμενο της επαγωγής κατά το οποίο αναπτύσσεται ΗΕΔ στους αγωγούς του τυλίγματος του δρομέα όταν στρέφεται το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Για την εξήγηση της λειτουργίας θεωρούμε ένα στοιχειώδη ΑΤΚ που στο δρομέα του υπάρχουν οι αντιδιαμετρικοί αγωγοί a και a' του τυλίγματος της μιας φάσης του.

Για τη λειτουργία ενός ΑΤΚ τα στάδια είναι τα παρακάτω:

Το τριφασικό τύλιγμα του στάτη του ΑΤΚ τροφοδοτείται με ρεύμα από το τριφασικό δίκτυο οπότε δημιουργείται σ' αυτό στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο ταχύτητας :

$$n_s = \frac{60 f}{p}$$

Όπου: f = η συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας

P = ο αριθμός ζευγών πόλων του κινητήρα

Οι αγωγοί του δρομέα (που αρχικά είναι ακίνητος) τέμνονται από τις μαγνητικές γραμμές του στρεφόμενου πεδίου, οπότε αναπτύσσεται ΗΕΔ που η φορά της προσδιορίζεται με το κανόνα του δεξιού χεριού. Οι αγωγοί αυτοί διαρρέονται και από το επαγωγικό ρεύμα γιατί το ηλεκτρικό κύκλωμα του δρομέα κλείνει μέσα από: α) τα στεφάνια βραχυκύκλωσης στους ΑΤΚ βραχυκυκλωμένου δρομέα και β) τον εκκινητή στους ΑΤΚ με δαχτυλίδια.

Στους ρευματοφόρους αγωγούς του δρομέα που βρίσκονται μέσα στο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη αναπτύσσονται δυνάμεις LAPLASE. Οι αντιδιαμετρικές από αυτές τις δυνάμεις αποτελούν μεταξύ τους ζεύγη που δημιουργούν ροπή στρέψης και περιστρέφουν το δρομέα του κινητήρα. Η ταχύτητα περιστροφής που αναπτύσσει ο δρομέας του ΑΤΚ είναι η σύγχρονη «η» και είναι μικρότερη από τη ταχύτητα περιστροφής n_s του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

$$n < n_s$$

Αλλά για να γίνουν όλα αυτά πιο κατανοητά ας ξεκινήσουμε από την αρχή Έτσι λοιπόν **ασύγχρονος κινητήρας** είναι η ηλεκτρική μηχανή εναλλασσομένου ρεύματος που κατά τη λειτουργία της παίρνει ενέργεια και την μετατρέπει σε κινητική ενέργεια.

Η ασύγχρονη ταχύτητα περιστροφής 'n' που αναπτύσσει ο δρομέας του κινητήρα εκφράζει τη κινητική ενέργεια και είναι μικρότερη από τη σύγχρονη ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου n_s . Δηλαδή $n < n_s$.

Η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής δίνεται από τη σχέση:

$$n_s = \frac{120 f}{P} \quad \text{rpm}$$

4.2α Είδη ασύγχρονων κινητήρων

Οι ασύγχρονοι κινητήρες χωρίζονται σε δύο είδη:

- Τους μονοφασικούς ασύγχρονους κινητήρες οι οποίοι διαθέτουν

μονοφασικό τύλιγμα στο επαγωγικό τύμπανο του στάτη και η τροφοδοσία τους γίνεται από το μονοφασικό δίκτυο της ΔΕΗ 220V/50Hz.

- Τους τριφασικούς κινητήρες οι οποίοι διαθέτουν τριφασικό τύλιγμα στο επαγωγικό τύμπανο του στάτη τους και η τροφοδοσία τους γίνεται από το τριφασικό δίκτυο της ΔΕΗ 380V/50Hz.

4.3 Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά δρομέα ΑΤΚ

Από την λειτουργία ενός ΑΤΚ ορισμένες ποσότητες αναφέρονται στον δρομέα ενός ΑΤΚ.

Η επαγωγική τάση E_A (ΗΕΔ) που δημιουργείται στους αγωγούς του τυλίγματος του δρομέα ενός ΑΤΚ εξαρτάται από:

Την ΗΕΔ (E_1) που αναπτύσσεται στην κάθε φάση του τυλίγματος του στάτη

Το λόγο του αριθμού σπείρων δρομέα και στάτη

W_2 και W_1 είναι δηλαδή : $E_A = (W_2 / W_1) \cdot E_1$

Στον πιο κάτω πίνακα δίνονται τα πλήρη ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του δρομέα ενός ΑΤΚ :

A/a	Συμβολισμός	Ονομασία
1	E_A	Η ΗΕΔ που αναπτύσσεται στην κάθε φάση του τυλίγματος του δρομέα (v)
2	R_A	Η ωμική αντίσταση του τυλίγματος του δρομέα ανά φάση
3	X_A	Η επαγωγική αντίσταση του τυλίγματος του δρομέα ανά φάση
4	Z_A	Η σύνθετη αντίσταση του τυλίγματος του δρομέα ανά φάση
5	F_A	Η συχνότητα του ρεύματος που διαρρέει το τύλιγμα του δρομέα
6	I_A	Η ένταση του ρεύματος (επαγωγικού) που διαρρέει το τύλιγμα του δρομέα

Πίνακας 4.1

Εκτός από την ωμική αντίσταση R_A του τυλίγματος του δρομέα ανά φάση οι υπόλοιπες ποσότητες μεταβάλλονται συναρτήσει της τιμής διολίσθησης που παρουσιάζει κατά τη λειτουργία του ο ΑΤΚ.

4.4 Ένταση ρεύματος ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα

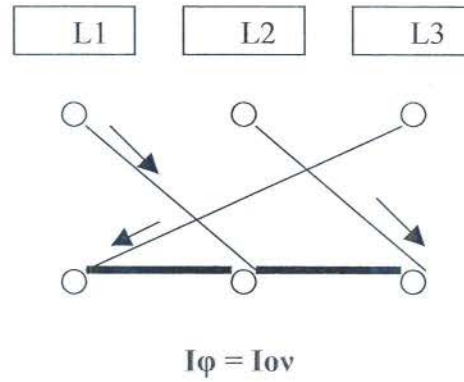
Σε έναν ασύγχρονο τριφασικό κινητήρα η ένταση του ρεύματος διακρίνεται σε :

1. ονομαστική ή κανονικής λειτουργίας (I) και
2. εκκίνησης ($I_{εκκ}$)

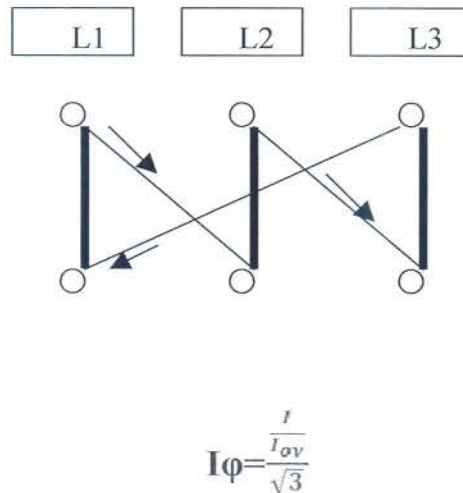
Η **ονομαστική ένταση του ρεύματος (I)** είναι εκείνη που διαρρέει την ένταση της γραμμής, όταν εργάζεται με πλήρες φορτίο, που απορροφά από το δίκτυο ηλεκτροδότησης του.

Ο τρόπος σύνδεσης του κάθε ένα από τα τυλίγματα ενός ΑΤΚ ορίζει την ένταση του ρεύματος ($I_{φ}$) που τα διαρρέει:

Υπάρχουν δύο τρόποι σύνδεσης τυλιγμάτων ενός ΑΤΚ. Ο ένας τρόπος είναι ο αστέρας:



και ο άλλος τρόπος είναι το τρίγωνο:



Η ένταση του ρεύματος εκκίνησης ($I_{\text{εκκ}}$) που απορροφά ένας ΑΤΚ κατά την στιγμή της εκκίνησης του ενώ ακόμα δεν έχει αρχίσει να περιστρέφεται ο δρομέας του δηλαδή $\eta = 0$ είναι 5-7 φορές μεγαλύτερη από την ένταση του ρεύματος $I_{\text{ον}}$ που απορροφά ο ίδιος κινητήρας στην κανονική του λειτουργία.

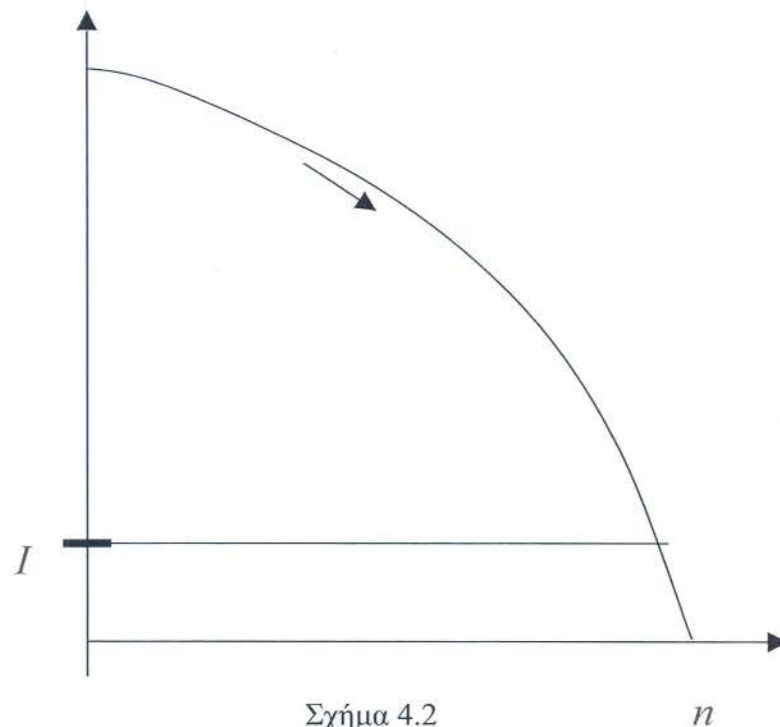
$$I_{\text{εκκ}} = (5 - 7) I_{\text{ον}}$$

Με την έναρξη της περιστροφής του δρομέα του ΑΤΚ η ένταση του ρεύματος που απορροφά αυτός από το δίκτυο ηλεκτροδότησης του μειώνεται και όταν αποκτήσει την ασύγχρονη ταχύτητα περιστροφής του απορροφά από το δίκτυο την ονομαστική του ένταση $I_{ον}$.

Η αρχή της καμπύλης $n = f(I)$ είναι από την τιμή του

$$I_{εκκ} = (5 - 8) I_{ον}, \quad \text{για } \eta = 0.$$

Έτσι από ότι καταλαβαίνουμε από το σχήμα $\eta = \eta_s$ και $I_{ον} = 0$.



4.5 Εκκίνηση ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα και οι διατάξεις εκκίνησης

Ένας ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας κατά την άμεση σύνδεση του στο δίκτυο ηλεκτροδότησης απορροφά ρεύμα εντάσεως 5 – 8 φορές μεγαλύτερο από την ένταση του ρεύματος της κανονικής του λειτουργίας, δηλαδή $I_{εκκ} = (5 - 8) * I_{ον}$

Στο δίκτυο της ΔΕΗ και χωρίς την έγκριση της έχουμε τρεις περιπτώσεις όπου επιτρέπεται η άμεση ζεύξη:

- 1) να διαθέτει η εγκατάσταση δικό της μετασχηματιστή.

Η ένταση του ρεύματος εκκίνησης του κινητήρα εξαρτάται από τη φαινόμενη ισχύ (KVA) του Μ/Σ και φαίνεται στο παρακάτω πίνακα:

Ένταση ρεύματος εκκίνησης ΑΤΚ	30	42	85	125	175	250	300
Φαινόμενη ισχύς του ΑΤΚ	15	25	50	75	100	150	250 έως 500

Πίνακας 4.2

2) η ένταση του ρεύματος που απορροφά ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας στην εκκίνηση του πρέπει να είναι μικρότερη των 30 Α.

3) ο λόγος των εντάσεων των ρευμάτων πρέπει να είναι μικρότερος

*του 2 για κινητήρα με ισχύ μέχρι 7,5 KW

**του 1,6 για κινητήρα με ισχύ μεγαλύτερη των 7,5 KW

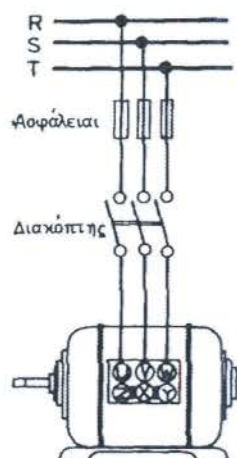
Έτσι σύμφωνα με τα παραπάνω ισχύει ο παρακάτω πίνακας:

A/a	Λόγος εντάσεων ρευμάτων	Ισχύς (KW) του ΑΤΚ
1	$I_{εκκ} / I_{ον} = 2$	$< 7,5$
2	$I_{εκκ} / I_{ον} = 1,6$	$> 7,5$

Πίνακας 4.3

4.5 Εκκίνηση ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων

Η απ'ευθείας εκκίνηση με την χρήση ενός μόνο απλού τριπολικού διακόπτη που φαίνεται στο Σχήμα 3.1, είναι η απλούστερη μέθοδος εκκίνησης τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα και χρησιμοποιείται σε σημαντικό βαθμό στην βιομηχανία.



Σχήμα 4.3

Ο λόγος που η μέθοδος δεν βρίσκει γενική εφαρμογή είναι τα μεγάλα ρεύματα εκκίνησης που προκαλούν στιγμιαία μεγάλες πτώσεις τάσης (βυθίσεις τάσης) που είναι ενοχλητικές όταν επαναλαμβάνονται συχνά στους άλλους καταναλωτές και μπορεί να προκαλέσουν γενικότερα προβλήματα σταδίκτυα. Η επιχείρηση ηλεκτρισμού έχει καθορίσει τις μέγιστες επιτρεπόμενες εντάσεις απ'ευθείας εκκίνησης χωρίς έγκρισή της κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες που φαίνονται στον Πίνακα 1 και τις μέγιστες επιτρεπόμενες εκκινήσεις κινητήρων από ιδιαίτερο μετασχηματιστή που φαίνονται στον πίνακα:

Τροφοδότησις από δίκτυον	Τριφασικοί κινητήρες με εκκινήσεις		Μονοφασικοί κινητήρες
	Σπανίας (*)	Συχνάς (*)	
Έναέριον 220/380 V	50 A	30 A	27 A
Υπόγειον 220/380 V	70 A	50 A	40 A

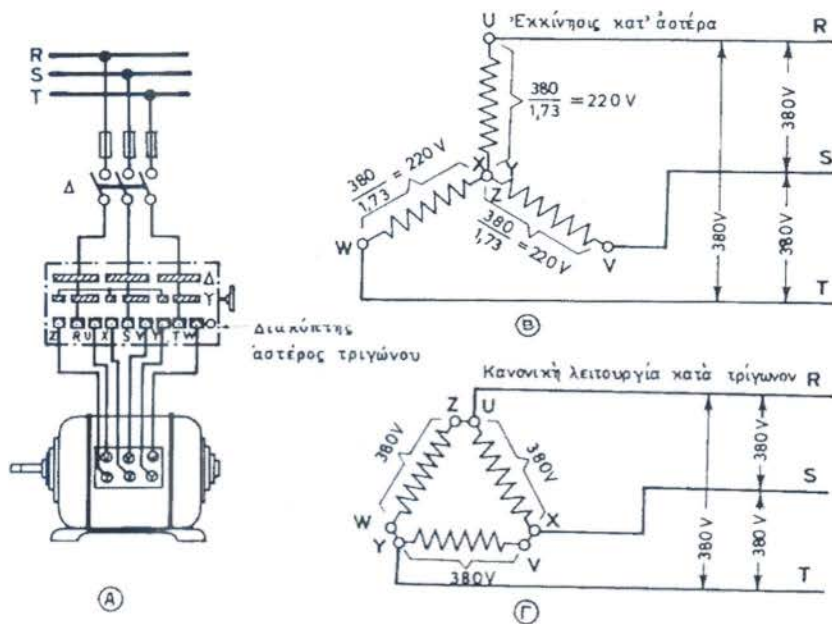
Πίνακας 4.4

4.5β Εκκίνηση με διακόπτη αστέρα – τριγώνου

Κατά την μέθοδο αυτή μέσω κατάλληλου διακόπτη που φαίνεται στο Σχήμα 4.7 και ονομάζεται διακόπτης αστέρα-τριγώνου, το τύλιγμα του στάτη που είναι κατασκευασμένο να εργάζεται κανονικά σε συνδεσμολογία τριγώνου, κατά την εκκίνηση συνδέεται σε αστέρα.

Ύψους μετασχηματιστού εις kVA	Μεγίστη έπιτρεπομένη ένταση έκκινήσεως εις A
15	30
25	42
50	85
75	127
100	170
150	255
200	300
250	300
400	300
500	300
600	300

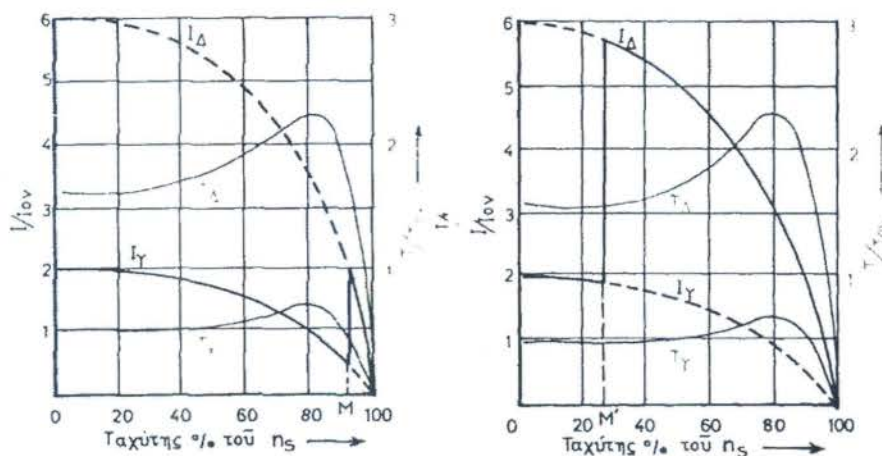
Πίνακας 4.5



Σχήμα 4.4

Έτσι αρχικά οι τάσεις που επιβάλλονται σε κάθε φάση είναι μειωμένες κατά τον παράγοντα 1.73 με αποτέλεσμα και τα αντίστοιχα ρεύματα δικτύου να μειώνονται

κατά τον αντίστοιχο παράγοντα και τα ρεύματα φάσεων να είναι ίσα με το $1/3$ των αντίστοιχων σε συνδεσμολογία τριγώνου. Κατά το ίδιο ποσοστό μειώνεται και η ροπή του κινητήρα βέβαια όπως φαίνεται στις καμπύλες του Σχήματος 4.5. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στην επιλογή της χρονικής στιγμής αλλαγής της συνδεσμολογίας από αστέρα σε τρίγωνο διότι κακή επιλογή της στιγμής μπορεί να μην έχει τα επιθυμητά αποτελέσματα.



Σχήμα 4.5

4.5γ Άλλες μέθοδοι εκκίνησης

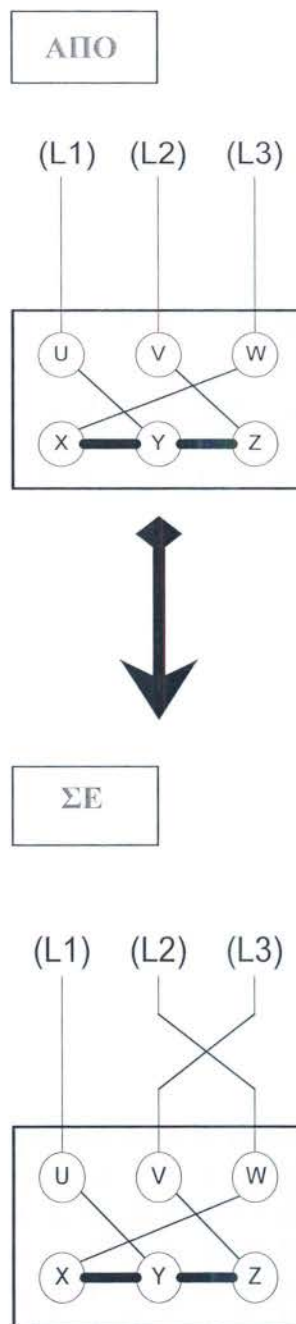
Παλιότερα χρησιμοποιήθηκε και η σταδιακή εκκίνηση με πρόσθετες αντιστάσεις εκκίνησης στον στάτη που μείωναν την τάση που επιβάλλεται στο τύλιγμα του στάτη. Για την εκκίνηση μεγάλων κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα χρησιμοποιήθηκαν επίσης και αυτό μετασχηματιστές με λογική ανάλογη της προηγούμενης και ανάλογα αποτελέσματα.

Μία ακόμη μέθοδος που χρησιμοποιείται συχνά, κυρίως σε κινητήρες μεγάλης ισχύος είναι η μέθοδος με ηλεκτρονικό εκκινητή (soft starter), με την οποία μπορούμε να προσαρμόσουμε την τάση του κινητήρα και να επιτύχουμε την βέλτιστη εκκίνηση τόσο από άποψη ροπής, όσο και από άποψη έντασης ρεύματος.

Οι ηλεκτρονικοί εκκινητές έχουν δυνατότητα ρύθμισης των χαρακτηριστικών λειτουργίας κατά την εκκίνηση και το σταμάτημα. Συνήθως διατίθενται διάφορα προγράμματα με διαφορετικές καμπύλες ρεύματος – ροπής – στροφών ώστε να προσαρμόζεται η εκκίνηση στις εκάστοτε παραμέτρους του φορτίου.

4.6 Αλλαγή φοράς περιστροφής ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα

Με την αλλαγή της φοράς περιστροφής του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου στα τυλίγματα του στάτη γίνεται η αλλαγή φοράς περιστροφής σε ασύγχρονο τριφασικό κινητήρα και αυτό πετυχαίνεται με την αλλαγή της διαδοχής μεταξύ δυο φάσεων τροφοδοσίας του.



Σχήμα 4.6

4.7 Η εκκίνηση και η λειτουργία του τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα σε μονοφασικό δίκτυο

Η συνδεσμολογία που επικράτησε για την εκκίνηση του τριφασικού κινητήρα σε μονοφασικό δίκτυο, είναι με ένα ή δυο πυκνωτές (εκκίνησης, λειτουργίας).

Οι πυκνωτές συνδέονται πάντα μεταξύ μιας φάσης. Η χωρητικότητα του πυκνωτή λειτουργίας για κάθε αποδιδόμενο [KW] ισχύος του κινητήρα δίνεται από τον πίνακα:

$f = 50 \text{ Hz}$	τάση δικτύου πολική	380	220	127
$C_1 [\mu\text{F}] / \text{KW} (M_{\text{εκ}} \leq 0,3 M_{\text{αν.τριφ}})$		20	70	200

Συνδεσμολογία κινητήρων για διάφορες τάσεις		
125 VΔ/220 VΥ	220 VΔ/380 VΥ	125 VΔ/220 VΥ
<p>Συνδεσμολογία 1</p>	<p>2</p>	<p>3</p>
Οι διακεκομμένες συνδέσεις ισχύουν για την αντίστροφη φορά περιστροφής		αποσυνδεδεμένο πύλιγμα

Σχήμα 4.7

Υπάρχουν τρεις συνδεσμολογίες. Οι πυκνωτές στις συνδεσμολογίες 1 και 2 πρέπει να αντέχουν σε διαρκή τάση ίση με το 115% της τάσης του δικτύου (= 250 V) και δίνονται στο σχήμα 4.4. Οι πυκνωτές της συνδεσμολογίας 3 έχουν την μισή ισχύ αλλά η τάση τους πρέπει να είναι 135% της τάσης του δικτύου (320V).

Η ισχύς του τριφασικού κινητήρα σε μονοφασική λειτουργία είναι 70 - 80% της ισχύος του σε τριφασική λειτουργία. Η ροπή εκκίνησης είναι 25 - 35% της ροπής σε τριφασικό δίκτυο.

Η χρήση τριφασικών κινητήρων σε μονοφασικό δίκτυο είναι λογικό για κινητήρες μέχρι 2KW περίπου γι' αυτό πέρα των 2 KW το κόστος των πυκνωτών είναι σημαντικό. Η αλλαγή φοράς περιστροφής του κινητήρα αυτού γίνεται με την αλλαγή της σύνδεσης μόνο του ακροδέκτη φάσης - δικτύου του πυκνωτή. Αυτό φαίνεται στο σχήμα παραπάνω.

4.8 Ροπή ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα

Η ροπή που αναπτύσσει ένας ΑΤΚ δίνεται από τη σχέση:

$$M = \frac{N}{\omega} \Rightarrow M = \frac{N}{2\pi n / 60}$$

Όπου: $N = \eta$ ισχύς (W) που αποδίδει ο τριφασικός κινητήρας στον άξονα του.

$\omega = \gamma$ ωνιακή ταχύτητα (rad /sec)

$n = \eta$ ασύγχρονη ταχύτητα περιστροφής (rpm / min)

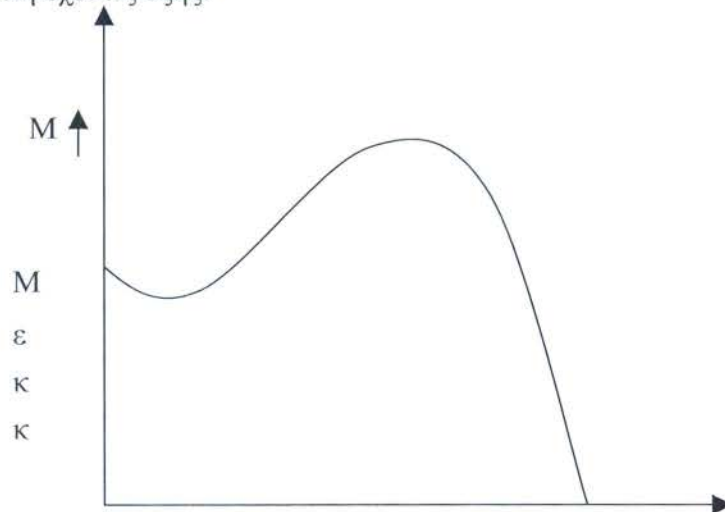
Έτσι από την παραπάνω σχέση μπορούμε να καταλάβουμε ότι η ροπή στρέψης εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος I που απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο και είναι η αιτία της δημιουργίας της ασύγχρονης ταχύτητας περιστροφής του δρομέα του κινητήρα.

Η εξάρτηση της ροπής εξαρτάται από την ασύγχρονη ταχύτητα περιστροφής του ΑΤΚ και εκφράζεται από την σχέση που ονομάζεται χαρακτηριστική ροπής και εκφράζει τη μεταβολή της ροπής στρέψης του κινητήρα αν μεταβάλλεται η ταχύτητα περιστροφής του.

$$M = f(n)$$

Η γραφική καμπύλη η οποία προκύπτει για $n = 0$ ξεκινάει από μία σταθεροποιημένη τιμή $M_{εκκ}$. Αυτή η καμπύλη αποτελεί την ροπή εκκίνησης του κινητήρα και μετριέται με σταθεροποιημένο τον δρομέα.

Η καμπύλη έχει ως εξής:



Από τη στιγμή της εκκίνησης μέχρι την στιγμή που αποκτά τη μέγιστη ροπή στρέψης M_{max} υπάρχει το διάστημα της ασταθούς λειτουργίας του. Αν στον άξονα του κινητήρα συνδεθεί μεγάλο φορτίο υπάρχει κίνδυνος να καταστραφούν τα τυλίγματα του από υπερθέρμανση. Αυτό γίνεται γιατί ο κινητήρας βρίσκεται στο στάδιο της εκκίνησης του και απορροφά μεγάλη ένταση ρεύματος από το δίκτυο τροφοδοσίας του.

Από τη στιγμή που αναπτύσσεται η μέγιστη ροπή M_{max} μέχρι τη στιγμή που ο κινητήρα αποκτά την κανονική ροπή στρέψης του M υπάρχει το διάστημα της ευσταθούς λειτουργίας και εργάζεται στις κανονικές του στροφές.

Αν όμως από τη στιγμή που αναπτύσσεται η κανονική ροπή M , υπάρξει και άλλη αύξηση των στροφών τότε η ροπή του κινητήρα ελαττώνεται μέχρι να μηδενιστεί και επανέρχεται το απότομο σταμάτημα του.

4.9 Πέδηση των ασύγχρονων κινητήρων

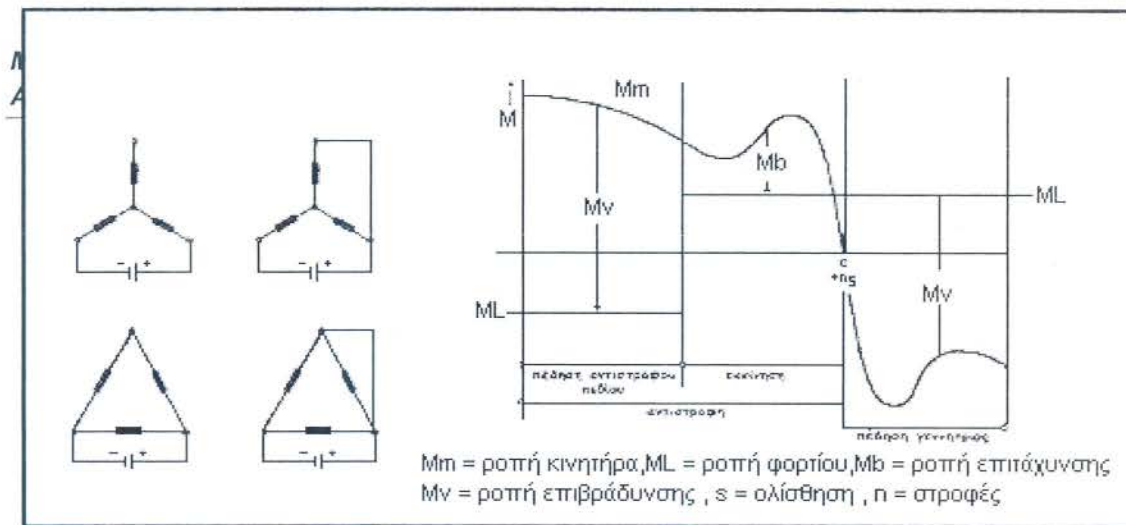
Ένας ασύγχρονος κινητήρας μπορεί να πεδηθεί αν αυτό επιβάλλεται από τις συνθήκες εργασίας του π.χ σε ανυψωτικά μηχανήματα. Υπάρχουν οι παρακάτω αναφερόμενοι μέθοδοι πέδησης που βασίζονται είτε σε εξωτερική πέδηση είτε στη λειτουργία μηχανής με αντίστροφα στρεφόμενο πεδίο είτε στη λειτουργία της ασύγχρονης γεννήτριας. Στην πράξη είναι συνηθισμένοι οι παρακάτω τρόποι:

1) Μηχανική πέδηση

Π.χ με ειδική ηλεκτρομαγνητική πέδη που είναι στον ίδιο τον άξονα. Πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν υπερθερμαίνεται ο κινητήρας.

2) Εναλλαγή δυο φάσεων

Επάγεται ένα αντίθετα στρεφόμενο πεδίο που πεδεί τον κινητήρα. Η θερμική καταπόνηση του κινητήρα στην εκκίνηση. Αν η πέδηση διαρκεί πάνω από 5 δευτερόλεπτα πρέπει να ελεγχθεί κατά πόσο υπερθερμαίνεται ο κινητήρας. Σε



δακτυλιοφόρους κινητήρες η πέδη μπορεί να γίνει με εναλλαγή δυο φάσεων και με αντιστάσεις στον δρομέα.

3) Πέδη με συνεχές ρεύμα

Ο κινητήρας αποσυνδέεται από το τριφασικό δίκτυο και συνδέεται με πηγή συνεχούς ρεύματος όπως στο σχήμα.

Η πέδη επιτρέπεται να γίνεται κατά την διάρκεια $t < 10 \text{ sec}$. Η πηγή συνεχούς ρεύματος μπορεί να συνδεθεί στον κινητήρα κατά 4 διαφορετικούς τρόπους.

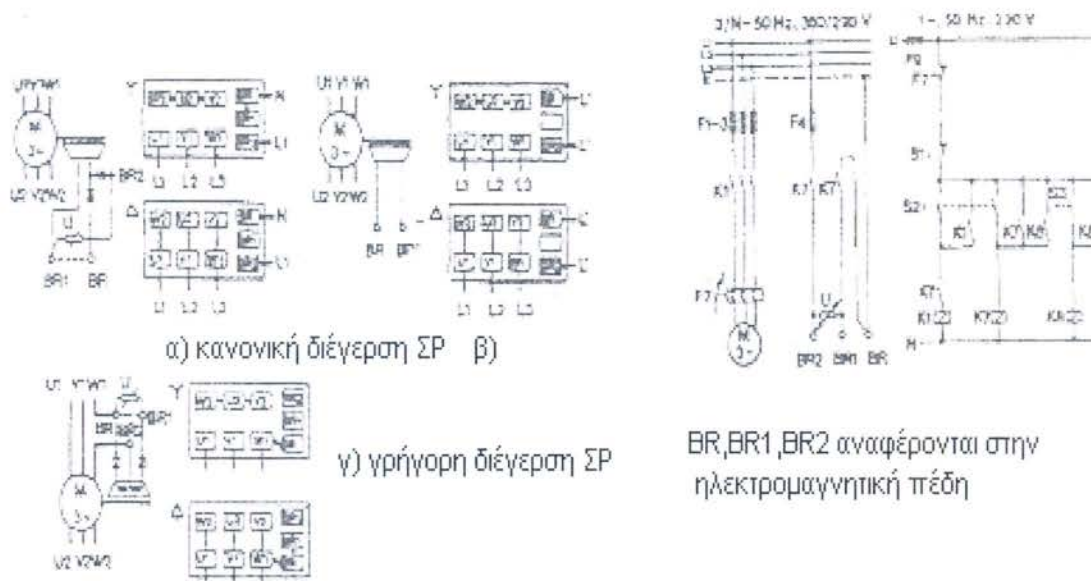
4) Πέδη με εναλλαγή του αριθμού των πόλων

Σε κινητήρες δυο ταχυτήτων αν βάλουμε την χαμηλότερη ταχύτητα ο κινητήρας φρενάρει, λειτουργώντας έτσι σαν γεννήτρια. Η θερμική καταπόνηση της μηχανής είναι ίση με αυτή κατά την εκκίνηση υπό χαμηλή ταχύτητα. Η πέδη με αλλαγή της ταχύτητας δεν προχωρά προφανώς

μέχρι την μηδενική ταχύτητα, αλλά σταματά στην ταχύτητα που έχουμε επιλέξει.

5) Κινητήρες πέδης για συνδυασμένη λειτουργία

Όπως αυτή των ανυψωτικών μηχανών είναι ειδικής κατασκευής και λειτουργίας σύμφωνα με την μέθοδο 1 της πρόσθετης ηλεκτρομαγνητικής πέδης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.9

4.10 Διφασική λειτουργία ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα

Εάν λειτουργεί ένας ΑΤΚ και διακοπεί (για κάποιον λόγο) η μια φάση τροφοδοσίας του, τότε αυτός εξακολουθεί να εργάζεται και αυτό συμβαίνει γιατί το κενό της φάσης που λείπει υπερνικάτε από :

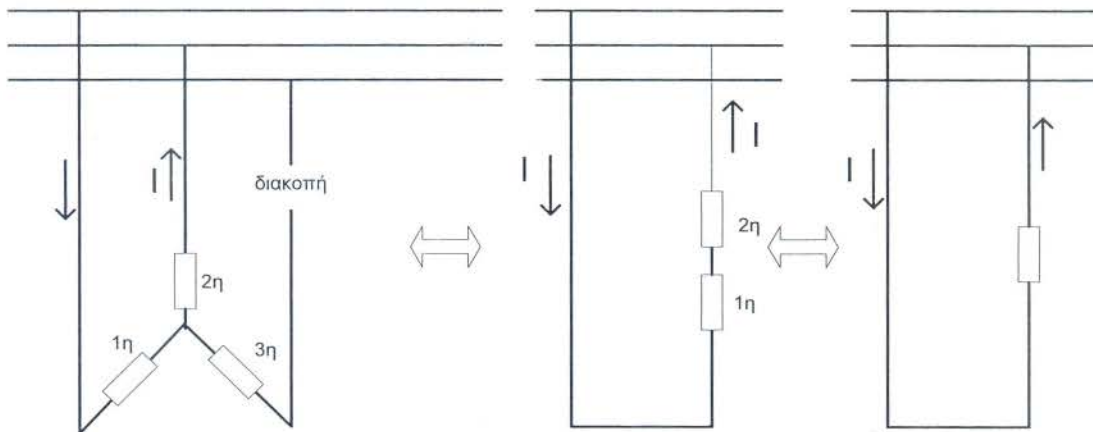
- την ταχύτητα του δρομέα που ήδη υπάρχει και
- την παρουσία του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

Βέβαια οι στροφές δεν είναι οι ίδιες αλλά λιγότερες με αποτέλεσμα ο κινητήρας να αποδίδει στον άξονα του μικρότερη ισχύ και να δημιουργεί θόρυβο (μουγκρίζει).

Εάν πάλι θέλουμε να σταματήσουμε τη λειτουργία του κινητήρα και να τον θέσουμε πάλι σε λειτουργία με κομμένη τη μια φάση του τότε αυτός δεν ξεκινά άμεσα γιατί δεν είναι δυνατός να δημιουργηθεί το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο τριφασικό του τύλιγμα.

Για να ξεκινήσει τη λειτουργία του ο κινητήρας πρέπει:

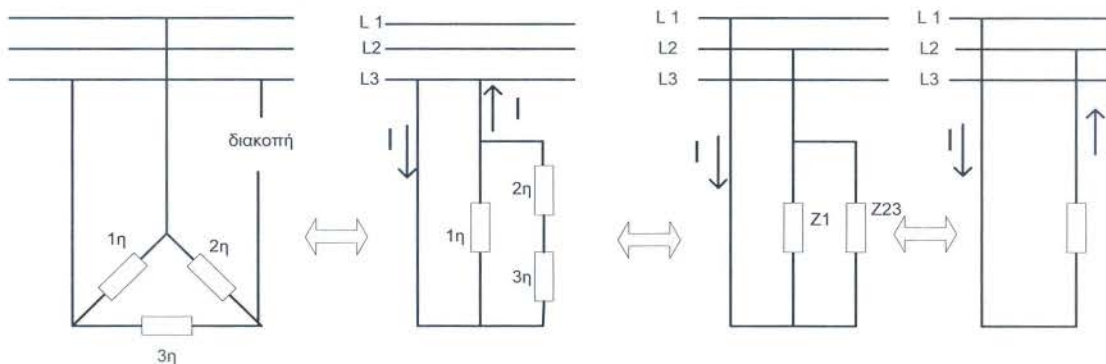
- να δοθεί ώθηση στο δρομέα ή
- να συνδεθεί πυκνωτής μεταξύ του ελευθέρου άκρου και της φάσης τροφοδοσίας του



Σχήμα 4.10 Αστέρας

Επειδή οι φάσεις του 1 και 2 που είναι συνδεδεμένες σε σειρά μεταξύ τους βρίσκονται σε τάση που είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους σε σειρά έχουμε σαν συνέπεια να βρίσκεται σε τάση ένα ισοδύναμο τύλιγμα σύνδεσης αντίστασης $Z_{ολ}$.

Έτσι το τριφασικό τύλιγμα του ATK έχει εκφυλιστεί σε μονοφασικό και η ένταση του ρεύματος που διαρρέει είναι η ίδια με αυτή των αγωγών τροφοδοσίας του κινητήρα. Το θερμικό προστατεύει τα τυλίγματα και θέτει τον ATK «εκτός» σύμφωνα με τους κανόνες που ισχύουν για τη Διφασική λειτουργία.



Σχήμα 4.11 Τρίγωνο

Επειδή και οι 3 φάσεις από τις οποίες η 1 και 3 είναι συνδεδεμένες σε σειρά μεταξύ τους και η ισοδύναμη αυτών 1 και 3 είναι παράλληλα συνδεδεμένη με την 2 βρίσκονται σε τάση έχουμε σαν συνέπεια να βρίσκεται ένα ισοδύναμο τύλιγμα σύνθετης αντίστασης $Z_{ολ}$ σε τάση όπου του τύλιγμα του ATK εκφυλίζεται σε μονοφασικό.

Εάν κατά την λειτουργία ενός ATK διακοπεί μια φάση τροφοδοσίας και αυτός εργάζεται:

Με το ονομαστικό του φορτίο

Τότε η ένταση του ρεύματος που διαρρέει

- τους υγιείς αγωγούς τροφοδοσίας του αυξάνεται κατά 50 % και
- στο τύλιγμα που βρίσκεται σε τάση αυξάνεται κατά 73%

Από την αντίστοιχη τιμή της έντασης του ρεύματος που κυκλοφορούσε στους 3 αγωγούς τροφοδοσίας και στο κάθε τύλιγμα του κατά την κανονική λειτουργία. Η αύξηση της τιμής της έντασης του ρεύματος στο τύλιγμα που βρίσκεται άμεσα σε τάση σε σχέση με την ένταση του ρεύματος των αγωγών τροφοδοσίας είναι 15%.

Χωρίς το ονομαστικό του φορτίο

Τότε υπάρχει περίπτωση κατά την αύξηση της τιμής της έντασης του ρεύματος στο τύλιγμα του ΑΤΚ κατά 15 % , να μην υπερβαίνεται η τιμή της ονομαστικής του έντασης.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μη λειτουργεί το θερμικό ενώ το τύλιγμα που βρίσκεται άμεσα σε τάση να καταπονείται θερμικός επικίνδυνα.

4.11 Απώλειες ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα

Οι απώλειες των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες οι οποίες είναι:

Οι σταθερές απώλειες:

- Εξαρτώνται από τα κατασκευαστικά και τεχνικά χαρακτηριστικά του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.
- Είναι ανεξάρτητες από τη λειτουργία του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα με φορτίο

Οι μεταβλητές ή ηλεκτρικές απώλειες:

- Εξαρτώνται από τη λειτουργία του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα με φορτίου

- Είναι ανεξάρτητες από τον τρόπο σύνδεσης των τυλιγμάτων του επαγωγικού κινητήρα
- Διακρίνονται στις απώλειες του στάτη και τουδρομέα

Ισχύς

Η μηχανική ισχύς που αποδίδει στον άξονα του ένας ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας δίνεται από τη σχέση:

$$N = 2 \pi \eta M_{εξ}$$

Όπου:

$M_{εξ}$ = η εξωτερική ροπή στρέψης που αποδίδει στον άξονα του ο ασύγχρονος

τριφασικός κινητήρας

$$\pi = 3,14$$

n = η ασύγχρονη ταχύτητα περιστροφής

4.12 Βαθμός απόδοσης

Ο βαθμός απόδοσης είναι ένας αριθμός καθαρός ο οποίος είναι μικρότερος της μονάδας και είναι ο λόγος της ισχύος που αποδίδει στον άξονα του προς την ηλεκτρική ισχύ που δέχεται για να λειτουργήσει. Έχουμε δηλαδή

$$\eta = \frac{N}{N_1}$$

4.13 Υπολογισμός της διατομής των αγωγών του τυλίγματος

Η διατομή των αγωγών του τυλίγματος του επαγωγίμου καθορίζεται με βάση την πυκνότητα του ρεύματος σ (A/mm²) και καθορίζεται από τη σχέση:

$$S_a = \frac{I_{ολ}}{2a\sigma} \quad (\text{mm}^2)$$

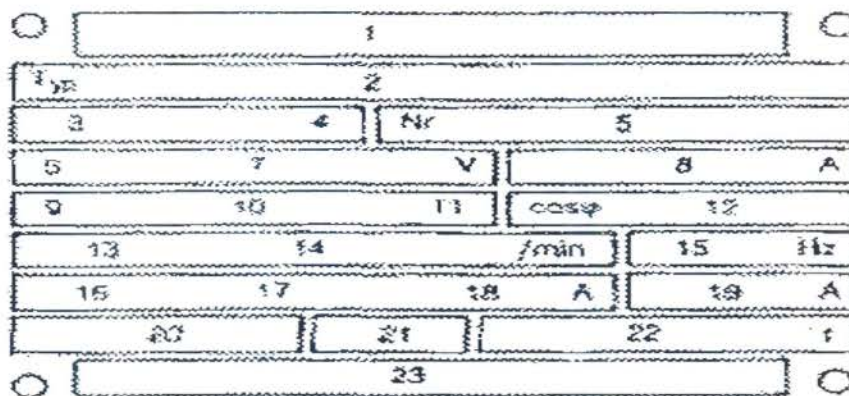
Δεχόμαστε διατομή εμπορίου την πιο κοντινή σε σχέση με τους υπολογισμούς.

Πρέπει να τονίσουμε ότι η πυκνότητα του ρεύματος εξαρτάται από τις συνθήκες αερισμού και συνήθως δεχόμαστε :

- 1) Την τιμή 5-6 Αμπέρ / mm² για αερισμό καλά μελετημένο .
- 2) Την τιμή 4 Αμπέρ / mm² για μηχανές με χαμηλό αριθμό στροφών .
- 3) Την τιμή 3 Αμπέρ / mm² για μηχανές μέσα στις οποίες κυκλοφορεί δύσκολα ο αέρας .

4.14 Πινακίδα ηλεκτροκινητήρα

Η πινακίδα ενός ηλεκτροκινητήρα έχει την παρακάτω μορφή



Σύμφωνα με τα παραπάνω νούμερα, τα οποία ορίζουν μία περιοχή στην πινακίδα, έχουμε τις εξής αντιστοιχίες:

1. ο κατασκευαστής και η φίρμα του
2. ο τύπος του κινητήρα και η σειρά κατασκευής
3. η ένδειξη του ρεύματος AC ή DC
4. η ένδειξη τρόπου λειτουργίας
5. ο αριθμός σειράς παραγωγής
6. γενικές πληροφορίες για το τύλιγμα και τις φάσεις
7. η τάση τροφοδότησης
8. το ρεύμα τροφοδότησης
9. η ισχύς που αποδίδει στην έξοδο (σε KW για DC και KVA ή VA για AC)

10. το σύμβολο KW ή KVA ή VA
11. ο προορισμός
12. ο συντελεστής ισχύος
13. η διεύθυνση περιστροφής
14. ο αριθμός στροφών
15. η συχνότητα ρεύματος
16. η διέγερση
17. πληροφορίες για τους ακροδέκτες
18. πληροφορίες για την τάση στο σύστημα διέγερσης
19. πληροφορίες για την ένταση στο σύστημα διέγερσης
20. η κατηγορία στεγανότητας
21. η αντιστοιχία με κωδικοποίησης κατά DIN 40050
22. η κατά βάρος προσέγγιση
23. πρόσθετες ενδείξεις για προδιαγραφές κατασκευής και λειτουργίας

4.15 Προδιαγραφές

Όταν γίνεται παραγγελία ενός ηλεκτροκινητήρα πρέπει αυτός να έχει προδιαγραφεί σωστά με βάση αφενός μεν τις λειτουργικές απαιτήσεις του μηχανισμού ή του μηχανήματος που θα κινήσει, αφετέρου δε τις προϋπάρχουσες συνθήκες και παραμέτρους της βιομηχανικής εγκατάστασης στη συγκεκριμένη περιοχή του πεδίου. Οι προδιαγραφές των ηλεκτροκινητήρων αναφέρονται στους παρακάτω άξονες. Στο σύστημα τροφοδοσίας, στις συνθήκες της συγκεκριμένης περιοχής του πεδίου, στις απαιτήσεις της ηλεκτρικής ισχύος που θα πρέπει να προσφέρεται στο ενεργοποιούμενο μηχάνημα και της μηχανικής ισχύος που θα πρέπει αυτό να αποδίδει, στα λοιπά λειτουργικά χαρακτηριστικά του, στα κατασκευαστικά στοιχεία του κινητήρα και στον τρόπο σύνδεσης των καλωδίων της εξωτερικής πηγής ισχύος με αυτόν.

Αναλυτικότερα αναφορικά με την τροφοδοσία του κινητήρα δίνονται παράμετροι της περιοχής του πεδίου όπως το αν η πηγή τροφοδοσίας είναι μονοφασική ή τριφασική, αν είναι 220V ή 380V, αν η συχνότητα του ρεύματος είναι 50 Hz (στις ΗΠΑ για παράδειγμα η συχνότητα διαφέρει), αν υπάρχει διακύμανση τάσης ή συχνότητας και σε ποιο ποσοστό της ονομαστικής τιμής ανέρχεται η μέγιστη

διακύμανση εκάστου μεγέθους, αλλά και των δύο μεγεθών συνδυαστικά. Τέλος δίνονται στοιχεία σχετικά με τον τύπο της υπάρχουσας στην περιοχή του πεδίου γείωσης, στην οποία θα συνδεθεί ο αγωγός γείωσης του κινητήρα.

Αναφορικά με τις συνθήκες στη συγκεκριμένη περιοχή του πεδίου δίνονται πληροφορίες σχετικά με το αν η εγκατάσταση του ηλεκτροκινητήρα θα γίνει σε εσωτερικό ή υπαίθριο χώρο, με το αν υπάρχει προστασία από βροχή ή από χιόνι (στην περίπτωση που η εγκατάσταση θα γίνει σε εξωτερικό χώρο), με το αν η περιοχή εγκατάστασής του είναι διαβαθμισμένη (δηλαδή αν υπάρχουν εκεί εκρηκτικά αέρια) και ποιά η κλάση της επικινδυνότητας και με το αν η περιβάλλουσα τον κινητήρα ατμόσφαιρα χώρος έχει διαβρωτικές ιδιότητες και τα φυσικά ή χημικά μέσα μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση. Αναφορικά με την περιβάλλουσα ατμόσφαιρα δίνονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές θερμοκρασίας και υγρασίας.

Αναφορικά με τα ζητούμενα λειτουργικά χαρακτηριστικά του κινητήρα σημειώνονται ενδεικτικά από τον πελάτη αλλά εντελώς συγκεκριμένα από τον κατασκευαστή, η αποδιδόμενη ισχύς και η απορροφούμενη ένταση ρεύματος και οι αντίστοιχες στροφές λειτουργίας του κινητήρα, καθώς επίσης ο αριθμός των πόλων του και ο βαθμός απόδοσης του. Άλλα σημαντικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του είναι η ένταση του απορροφούμενου ρεύματος κατά την εκκίνησή τους, αν η σύνδεση του θα είναι *direct on line* ή όχι, καθώς και ο χρόνος επανεκκίνησης (*reacceleration*) και η παραμένουσα τάση. Στα λεπτομερή λειτουργικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνονται το $\cos\phi$ (που σχετίζεται με τον ακριβή σχεδιασμό του συγκεκριμένου κινητήρα), η ροπή αδρανείας του στρεφόμενου τμήματος, η στάθμη του παραγόμενου θορύβου καθώς και το σημείο «υπερλειτουργίας» του κινητήρα στο οποίο αυτός θα καεί.

Τα αναλυτικά κατασκευαστικά στοιχεία τα δίνει ο κατασκευαστής και αναφέρονται στο βάρος του κινητήρα και των διαφόρων μερών του, στο αν η κατασκευή του κεύφους τους υπακούει σε προδιαγραφές μηχανικής (IP) ή αντεκρηκτικής (Excd) προστασίας, στον τρόπο στήριξης του και στη μέθοδο ψύξης του, στον τύπο των ρουλεμάν του κιβωτίου μετάδοσης καθώς και στη ενδεικνυόμενη μέθοδο λίπανσης. Αναφορικά με το τερματικό κουτί σύνδεσης των καλωδίων της εξωτερικής πηγής αναφέρεται ο τύπος του καλωδίου σύνδεσης (από τον πελάτη), οι τύποι μηχανικής και αντεκρηκτικής προστασίας, ο αριθμός των τερματικών, η θέση και ο προσανατολισμός του.

4.16 Ασφάλειες - Διακόπτες - Αγωγοί Α.Τ.Κ.

ΙΣΧΥΣ (HP)	Ασφάλεια Εκκίνηση απ' Ευθείας (A)	Ασφάλεια Εκκίνηση Υ/Δ (A)	Διακόπτης Υ/Δ (A)	Γενικός Διακόπτης Υ/Δ (A)	Διατομή Αγωγού (mm ²)
0,25	2	-	-	16	2,5
0,33	2	-	-	16	2,5
0,50	2	-	-	16	2,5
0,75	4	-	-	16	2,5
1	4	-	-	16	2,5
1,5	6	-	-	16	2,5
2	10	6	16	16	2,5
3	10	10	16	16	2,5
4	16	10	16	16	2,5
5,5	20	16	16	16	2,5
7,5	25	16	16	16	2,5
10	25	25	25	25	4
12,5	35	25	25	25	6
15	35	25	40	40	6
20	50	35	40	40	10
25	63	50	63	40	16
30	80	63	63	60	25
35	80	63	63	60	25
40	80	63	63	60	35
50	100	80	160	100	35
60	160	100	160	100	50
75	160	125	160	100	70
100	200	160	160	200	95
125	225	200	340	200	120
150	300	250	340	200	120
180	400	300	340	400	150
220	430	300	340	400	185
270	500	430	550	400	300

Πίνακας 4.6

4.17 Βλάβες και επισκευές Α.Τ.Κ

Σύμπτωμα	Πιθανή αιτία	Επισκευή
1. Ο κινητήρας δεν ξεκινάει ούτε εν κενώ ούτε σε φορτίο.	Δεν υπάρχει τάση τροφοδοσίας στους ακροδέκτες	Έλεγχος του αυτόματου διακόπτη ρεύματος για πιθανή διακοπή ρεύματος. Έλεγχος των καλωδίων τροφοδοσία. Εάν υπάρχει η σύνδεση πρέπει να γίνει πάλι.
	Μία φάση του τυλίγματος είναι καμένη	Το τύλιγμα του κινητήρα πρέπει να ελεγχθεί με megometer και να διορθωθεί.
	Τροφοδοσία με τάση μικρότερη από την ονομαστική	Οι κατάλληλες μετρήσεις πρέπει να γίνουν και να δοθεί τάση τροφοδοσίας ίση με την ονομαστική του κινητήρα
	Η ροπή του φορτίο είναι μεγαλύτερη από τη ροπή εκκίνησης	Η μηχανή που οδηγείται πρέπει να ελεγχθεί και να διορθωθεί
2. Δύσκολη εκκίνηση ακολουθούμενη από μεγάλο βύθισμα ταχύτητας	Οι μπάρες του δρομέα έχουν κοπεί ή έχουν αποσυγκολληθεί	Έλεγχος αν οι μπάρες του κλωβού εφάπτονται του δακτυλίου βραχυκύκλωσης
3. Δύσκολη εκκίνηση ακολουθούμενη από θόρυβο και υπερθέρμανση	Τα έδρανα είναι φθαρμένα	Τα κατεστραμμένα έδρανα πρέπει να αντικατασταθούν.
4. Κανονική εκκίνηση ακολουθούμενη από μεγάλη πτώση του αριθμού στροφών	Πολύ χαμηλή τάση στους ακροδέκτες λόγω μεγάλης πτώσης τάσεως στα καλώδια τροφοδοσίας	Τα καλώδια πρέπει να αντικατασταθούν
5. Ο κινητήρας υπερθερμαίνεται	Η τάση είναι πολύ υψηλή και προκαλεί απώλειες σιδήρου. η τάση είναι πολύ υψηλή και προκαλεί απώλειες χαλκού. υπερφόρτωση κινητήρα.	Η τάση πρέπει να αποκατασταθεί στην ονομαστική τιμή. Έλεγχος με βολτόμετρο και αμπερόμετρο. Έλεγχος φορτίου
	Ιμάντας πολύ σφικτός.	Διόρθωση τάσης ιμάντα
	Ασύμμετρη ηλεκτρική φόρτιση (καμένη ασφάλεια, σφάλμα στη διάταξη ελέγχου, διακοπή μιας φάσης).	Αντικατάσταση ασφάλειας, έλεγχος, σύνδεση.

	Κακός αερισμός. Λανθασμένη συνδεσμολογία στο κιβώτιο ακροδεκτών.	Έλεγχος συνδεσμολογία σωστή σύνδεση.
6.Ο Στάτης υπερθερμαίνεται σε ορισμένα σημεία και η υπερθέρμανση συνοδεύεται από υπερφόρτιση, σε μία ή δύο φάσεις, και δυνατό θόρυβο.	Εσωτερικό βραχυκύκλωμα στην περιέλιξη του στάτη.	Αντικατάσταση της περιέλιξης.
7.Όταν λειτουργεί ο κινητήρας, ο δρομέας έρχεται σε επαφή με το στάτη και δημιουργεί θόρυβο και υπερθέρμανση.	Είναι πιθανόν ότι το διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα δεν είναι πια ομοιόμορφο, λόγω ρωγμών στα έδρανα ή στα καπάκια τους ή λόγω κάποιας κλίσης του άξονα.	Τα καπάκια και τα φθαρμένα μέρη των εδράνων πρέπει να αντικατασταθούν.
8.Ο κινητήρας παρουσιάζει κραδασμούς κατά τη λειτουργία.	Λανθασμένη ευθυγράμμιση του άξονα λόγω κακής θεμελίωσης ή ανώμαλης επιφάνειας του εδάφους.	Η βάση πρέπει να στερεωθεί.
	Οι κραδασμοί μπορεί να μεταφέρονται από τη μηχανή που οδηγείται	Πρέπει να γίνει αποσύζευξη από τη μηχανή ελέγχοντας τη λειτουργία εν κενώ του κινητήρα. Εάν η λειτουργία είναι χωρίς κραδασμούς, είναι βέβαιο ότι οι κραδασμοί μεταφέρονται από τη μηχανή που κινεί ο κινητήρας.
9.Τα έδρανα υπερθερμαίνονται	Έχει εισχωρήσει σκόνη ή άλλα ξένα σώματα, ή το λιπαντικό είναι βρώμικο.	Το παλιό λιπαντικό απομακρύνεται. Τα έδρανα πλένονται και λιπαίνονται με κατάλληλο λιπαντικό.
	Το υπερβολικό γράσσο στο έδρανο αυξάνει τις απώλειες των τριβών.	Αφαιρείται το επιπλέον γράσσο.
	Η βαλβίδα λιπαντικού δεν λειτουργεί κανονικά και το έδρανο έχει φθαρεί ή καταστραφεί.	Πρέπει να αντικατασταθεί
	Ο ιμάντας που οδηγείται είναι πολύ σφιγμένος	Ο ιμάντας πρέπει να χαλαρώσει
	Η μηχανή που οδηγείται	Η έδραση των εδράνων

	δεν είναι καλά κεντραρισμένη	και το κεντράρισμα της μηχανής πρέπει να ελεγχθούν.
--	------------------------------	---

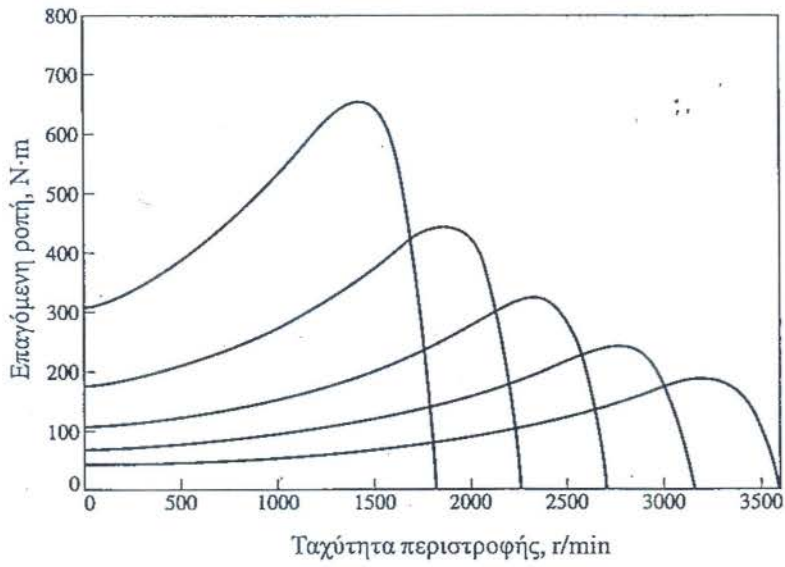
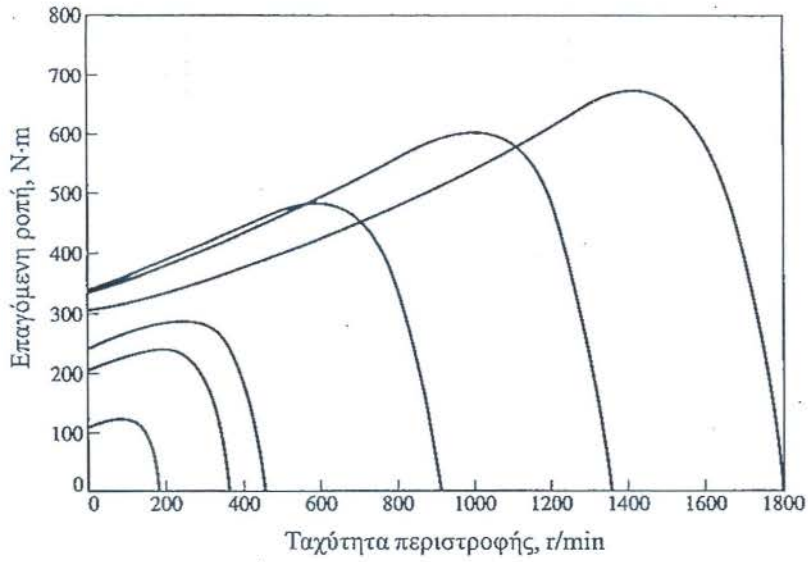
Πίνακας 4.7

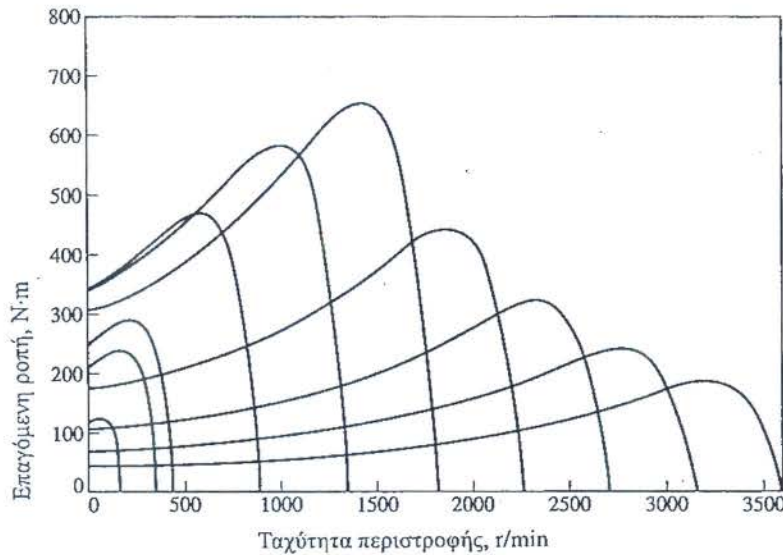
4.18 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της συχνότητας του δικτύου

Αν η συχνότητα που εφαρμόζεται στο στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα μεταβληθεί, ο ρυθμός περιστροφής των μαγνητικών πεδίων n μεταβάλλεται ανάλογα με τη μεταβολή της ηλεκτρικής συχνότητας, ενώ το σημείο λειτουργίας χωρίς φορτίο στην καμπύλη ροπής – ταχύτητας μεταβάλλεται επίσης (σχήμα 4.12). Η σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα στις ονομαστικές συνθήκες είναι γνωστή ως βασική ταχύτητα (base speed). Με τον έλεγχο μεταβλητής συχνότητας, η ταχύτητα του κινητήρα είναι δυνατόν να ρυθμίζεται πάνω και κάτω από τη βασική ταχύτητα. Μία προσεκτικά σχεδιασμένη διάταξη οδήγησης επαγωγικού κινητήρα με μεταβλητή συχνότητα μπορεί να είναι ιδιαίτερα ευέλικτη. Η ρύθμιση της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα μπορεί να ξεκινά από ένα μικρό εύρος τιμών, 5% της βασικής ταχύτητας και να φτάνει σε τιμές διπλάσιες της βασικής ταχύτητας. Όμως, είναι σημαντικό να καθοριστούν κάποια όρια για την τάση και τη ροπή του κινητήρα κατά τη μεταβολή τη ταχυτητάς του, ώστε η λειτουργία του να είναι ασφαλής.

Όταν ο κινητήρας περιστρέφεται με ταχύτητες μικρότερες της βασικής, θα πρέπει η τάση που εφαρμόζεται στο στάτη του κινητήρα να περιορίζεται, με σκοπό να είναι ασφαλή η λειτουργία του. Η τάση εισόδου στο στάτη θα πρέπει να μειώνεται γραμμικά με τη μείωση της συχνότητας. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται υποβιβασμός (derating) της τάσης. Αν δεν ακολουθείται αυτή η διαδικασία, ο χάλυβας του στάτη οδηγείται σε κορεσμό και το ρεύμα μαγνήτισης του κινητήρα μπορεί να πάρει εξαιρετικά μεγάλες τιμές.

Για να γίνει κατανοητή η αναγκαιότητα του υποβιβασμού, ας σημειωθεί ότι ο επαγωγικός κινητήρας είναι βασικά ένας τρεφόμενος μετασχηματιστής. Όπως σε κάθε μετασχηματιστή η μαγνητική ροή στον πυρήνα ενός επαγωγικού κινητήρα υπολογίζεται από το νόμο το Faraday $v(t) = -N \frac{d\varphi}{dt}$





Σχήμα 4.12 Ρύθμιση της ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα με μεταβολή της συχνότητας.

- α) Οικογένεια χαρακτηριστικών ροπής – ταχύτητας για ταχύτητες κάτω από τη βασική, που υποτίθεται ότι οι τάσεις εισόδου ελαττώνονται γραμμικά με τη ταχύτητα. β) Οικογένεια χαρακτηριστικών ροπής – ταχύτητας για ταχύτητες πάνω από τη βασική, όπου υποτίθεται ότι οι τάσεις εισόδου διατηρούνται σταθερές. γ) Οι χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας για όλες τις συχνότητες.

Αν εφαρμοστεί στον πυρήνα τάση $v(t) = V_M \sin \omega t$, η μαγνητική ροή φ που προκύπτει είναι

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \frac{1}{N_p} \int v(t) dt \\ &= \frac{1}{N_p} \int V_M \sin \omega t dt \\ \Phi(t) &= -\frac{V_M}{\omega N_p} \end{aligned}$$

Σημειώνεται ότι, η ηλεκτρική συχνότητα ω εμφανίζεται στον παρονομαστή της παραπάνω έκφρασης. Έτσι, αν ηλεκτρική συχνότητα που εφαρμόζεται στο στάτη μειωθεί κατά 10% και το πλάτος της τάσης του στάτη παραμένει σταθερό, η μαγνητική ροή στον πυρήνα του κινητήρα αυξάνεται περίπου κατά 10%, ενώ το ρεύμα μαγνήτισης στο εσωτερικό του αυξάνεται επίσης. Στην ακόρεστη περιοχή της καμπύλης μαγνήτισης του κινητήρα, η αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης θα είναι κι αυτή περίπου ίση με 10%. Η επαγωγικοί κινητήρες συνήθως κατασκευάζονται με

σκοπό να λειτουργούν κοντά στο σημείο κορεσμού της καμπύλης μαγνήτισης κι έτσι η αύξηση της μαγνητικής ροής, που οφείλεται στη μείωση της συχνότητας, προκαλεί σοβαρή αύξηση το ρεύμα μαγνήτισης του κινητήρα. Ακριβώς το ίδιο πρόβλημα παρουσιάζεται και στους μετασχηματιστές.

Πολύ συχνά η τάση που εφαρμόζεται στο στάτη ελαττώνεται σε ποσοστό ανάλογο με τη μείωση της συχνότητας, με σκοπό την αποφυγή των εξαιρετικά μεγάλων ρευμάτων μαγνήτισης, κάθε φορά που η συχνότητα μειώνεται κάτω από την ονομαστική τιμή της. Αφού η εφαρμοζόμενη τάση V_m εμφανίζεται στον αριθμητή και η ηλεκτρική συχνότητα ω στον παρονομαστή της παρακάτω εξίσωσης, τα αποτελέσματα της μεταβολής τους εξουδετερώνονται μεταξύ τους, ώστε το ρεύμα μαγνήτισης να παραμένει ανεπηρέαστο.

Όταν το πλάτος της τάσης που εφαρμόζεται σε ένα επαγωγικό κινητήρα μεταβάλλεται γραμμικά με τη συχνότητα σε ταχύτητες μικρότερες από τη βασική ταχύτητα, η μαγνητική ροή του κινητήρα παραμένει σχεδόν σταθερή. Έτσι η μέγιστη ροπή που μπορεί να προσφέρει ο κινητήρας παραμένει σχετικά υψηλή. Όμως η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς του κινητήρα θα πρέπει και αυτή να μειώνεται γραμμικά με τη μείωση της συχνότητας, ώστε το κύκλωμα του στάτη να προστατεύεται από υπερθέρμανση. Η ισχύς με την οποία τροφοδοτείται ένας τριφασικός κινητήρας, δίνεται από τη σχέση

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta$$

Αν η τάση v_l μειωθεί θα πρέπει να μειωθεί και η μέγιστη ισχύς p_l . Διαφορετικά το ρεύμα στο εσωτερικό του κινητήρα θα πάρει τόσο μεγάλες τιμές, που ο κινητήρας θα υπερθερμανθεί.

Στο σχήμα 4.12α φαίνεται μια οικογένεια χαρακτηριστικών ροπής-ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα για ταχύτητες μικρότερες από τη βασική, όπου θεωρείται ότι το πλάτος της τάσης στο στάτη μεταβάλλεται γραμμικά με τη συχνότητα.

Όταν η ηλεκτρική συχνότητα που εφαρμόζεται στον κινητήρα ξεπεράσει την ονομαστική συχνότητα, η τάση στο στάτη θα πρέπει να παραμείνει σταθερή. Αν και κάτω από αυτές τις συνθήκες οι προηγούμενοι περιορισμοί για τον κορεσμό του στάτη επιτρέπουν την αύξηση της τάσης πάνω από την ονομαστική της τιμή, η τάση συγκρατείται σε αυτή τη τιμή με σκοπό την προστασία της μόνωσης του κινητήρα.

Όσο η ηλεκτρική συχνότητα αυξάνεται πάνω από τη βασική ταχύτητα, τόσο

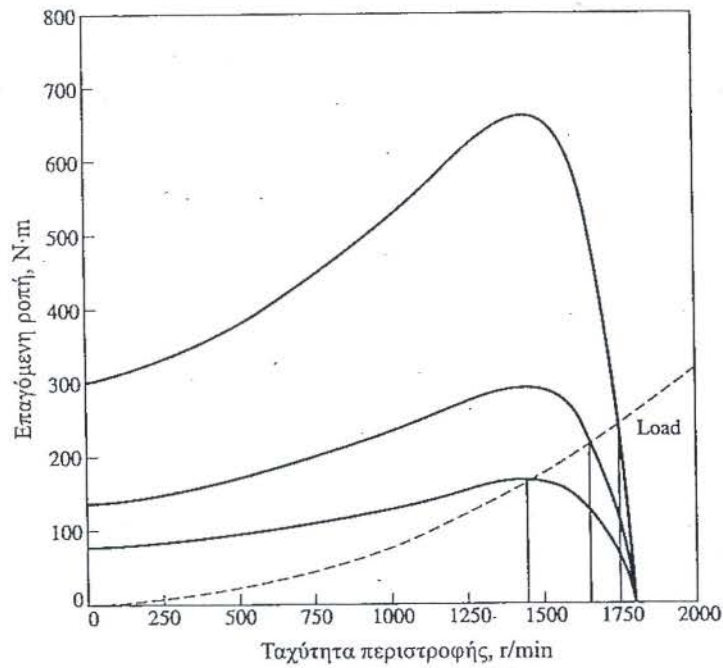
μεγαλύτερος γίνεται ο παρονομαστής της εξίσωσης. Όμως, επειδή ο αριθμητής της εξίσωσης για τιμές της συχνότητας πάνω από την ονομαστική παραμένει σταθερός η προσκαλούμενη μαγνητική ροή στη μηχανή θα μειώνεται και μαζί της μειώνεται η μέγιστη ροπή του κινητήρα. Το σχήμα 4.12β, δείχνει μια οικογένεια χαρακτηριστικών ροπής-ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα για ταχύτητες πάνω από τη βασική, στις οποίες γίνεται η υπόθεση σταθερής τάσης στο στάτη.

Στο σχήμα 4.12γ, φαίνεται η οικογένεια χαρακτηριστικών ροπής-ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα, του οποίου η τάση στο στάτη μεταβάλλεται γραμμικά με τη συχνότητα για ταχύτητες κάτω από τη βασική ταχύτητα και παραμένει σταθερή για ταχύτητες πάνω από τη βασική. Η ονομαστική ταχύτητα του επαγωγικού κινητήρα στο σχήμα 4.12 είναι 1800 r/min.

Στο παρελθόν το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου μεταβολής της ταχύτητας του κινητήρα με ρύθμιση της ηλεκτρικής του συχνότητας ήταν η έλλειψη μιας ειδικής γεννήτριας με μεταβαλλόμενη συχνότητα ή ενός μηχανικού τρόπου μεταβολής της συχνότητας. Το πρόβλημα αυτό επιλύθηκε με την ανάδειξη των σύγχρονων διατάξεων οδήγησης μεταβλητής συχνότητας με ηλεκτρονικούς διακόπτες. Στη πραγματικότητα η μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας με διατάξεις οδήγησης ηλεκτρονικών διακοπών έχει γίνει η πιο δημοφιλής μέθοδος ρύθμισης της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων. Σημειώνεται ότι αυτή τη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε επαγωγικό κινητήρα αντίθετα από τη μέθοδο μεταβολής των πόλων που απαιτεί κινητήρες με ειδικά τυλίγματα στο στάτη.

4.18α Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας

Η ροπή που αναπτύσσει ένας επαγωγικός κινητήρας εξαρτάται από το τετράγωνο της εφαρμοζόμενης τάσης. Αν το φορτίο του κινητήρα διαθέτει χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας όμοια με αυτή του σχήματος 4.13, η ταχύτητά του είναι δυνατό να ρυθμίζεται σε ένα περιορισμένο εύρος τιμών με τη μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας. Αυτή η μέθοδος ελέγχου χρησιμοποιείται συνήθως στους μικρούς κινητήρες που κινούν ανεμιστήρες.



Σχήμα 4.13. Ρύθμιση της ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα με έλεγχο της τάσης εισόδου.

Κεφάλαιο 5: Αντιστροφείς ή Inverters

5.1 Γενικά περί αντιστροφέων

Οι μετατροπείς Ε.Ρ/Σ.Ρ/Ε.Ρ., που είναι γνωστοί και ως *αντιστροφείς (Inverters)*, μετατρέπουν τη συνεχή τάση μιας πηγής συνεχούς ρεύματος, σε εναλλασσόμενη τάση, ορισμένης ενεργού τιμής U_0 και συχνότητας f .

Η χρήση των συγκεκριμένων μετατροπέων, συνίσταται κυρίως σε:

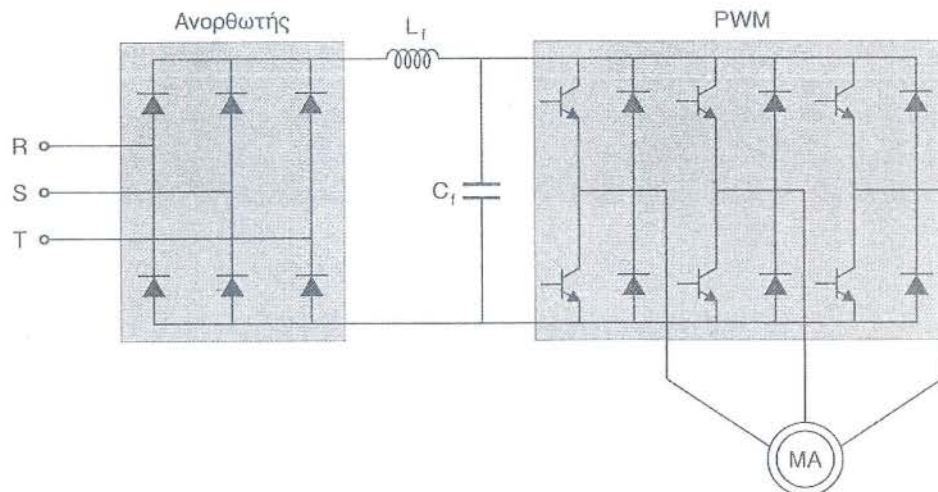
- ✓ Σε συστήματα ελέγχου των κινητήρων Ε.Π.
- ✓ Σε συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας
- ✓ Σε διατάξεις ελέγχου της θερμοκρασίας με επαγωγή
- ✓ Σε συστήματα ήπιων μορφών ενέργειας
- ✓ Σε συστήματα αδιάκοπης παροχής ισχύος (UPS)

5.1α Κατηγορίες αντιστροφέων

- ✓ Αντιστροφείς οι οποίοι τροφοδοτούνται από *πηγή Συνεχούς Τάσης (Voltage – Source Inverters, VSI)* και οι οποίοι μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες.

1. Αντιστροφείς με Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM). Στους αντιστροφείς αυτούς, η συνεχής τάση εισόδου έχει σταθερό πλάτος και για την ανόρθωση της τάσης του δικτύου, χρησιμοποιείται μια απλή ανορθωτική διάταξη με διόδους (σχήμα 5.1.).

Στην περίπτωση αυτή, ο αντιστροφέας πρέπει να ελέγχει το πλάτος και τη συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου. Αυτό επιτυγχάνεται, με τη διαμόρφωση του εύρους των παλμών των διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα.

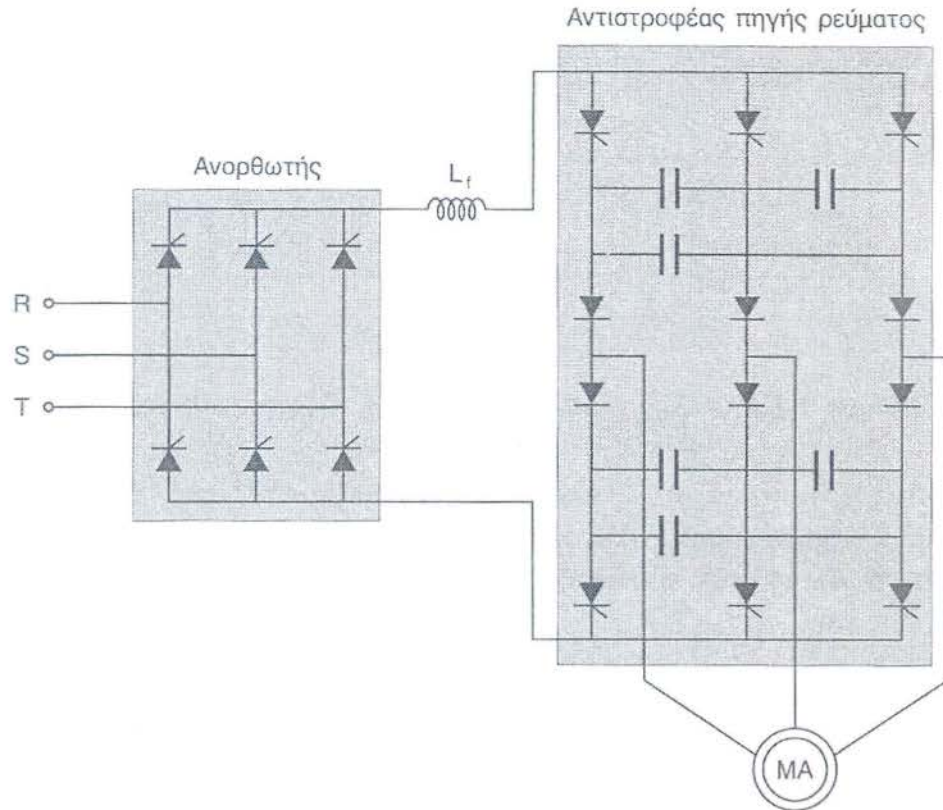


Σχήμα 5.1. Αντιστροφέας με Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM) για τον έλεγχο κινητήρα ΕΡ.

2. Αντιστροφείς με Τετραγωνική Κυματομορφή. Στους αντιστροφείς αυτούς, για τον έλεγχο του πλάτους της εναλλασσομένης τάσης εξόδου, ελέγχεται το πλάτος της συνεχούς τάσης εισόδου. Έτσι, ο αντιστροφέας πρέπει να ελέγξει μόνο τη συχνότητα της τάσης εξόδου. Η εναλλασσόμενη τάση εξόδου έχει μια κυματομορφή ποαρόμοια με τετραγωνική.

3. Μονοφασικοί Αντιστροφείς με Απαλοιφή Τάσης. Στους αντιστροφείς αυτούς συνδυάζονται τα χαρακτηριστικά των δυο προηγούμενων αντιστροφέων. Εδώ, είναι δυνατός ο έλεγχος του πλάτους και της συχνότητας της τάσης εξόδου του μετατροπέα, αν και η είσοδος του αντιστροφέα είναι μια σταθερή συνεχή τάση και στους ηλεκτρονικούς διακόπτες του μετατροπέα δεν επιβάλλεται διαμόρφωση PWM (η κυματομορφή της τάσης εξόδου είναι σχεδόν τετραγωνική). Αυτή η τεχνική, λειτουργεί μόνο στους μονοφασικούς αντιστροφείς.

- ✓ Αντιστροφείς οι οποίοι τροφοδοτούνται από **πηγή Συνεχούς Ρεύματος (Current – Source Inverters, CSI)**. Στο σχήμα 1.2 δίδεται το σχηματικό διάγραμμα του CSI όπου στην είσοδο χρησιμοποιείται ένας ελεγχόμενος μετατροπέας Ε.Ρ./Σ.Π. Επειδή στη συνεχή ζεύξη τοποθετείται μια μεγάλη αυτεπαγωγή, η είσοδος εμφανίζεται ως πηγή ρεύματος. Ο αντιστροφέας χρησιμοποιεί θυρίστορ, διόδους και πυκνωτές για την εξαναγκασμένη μετάβαση.



Σχήμα 5.2 Αντιστροφέας από πηγή Συνεχούς Ρεύματος (CSI) για τον έλεγχο κινητήρα ΕΡ

Τύποι αντιστροφέων:

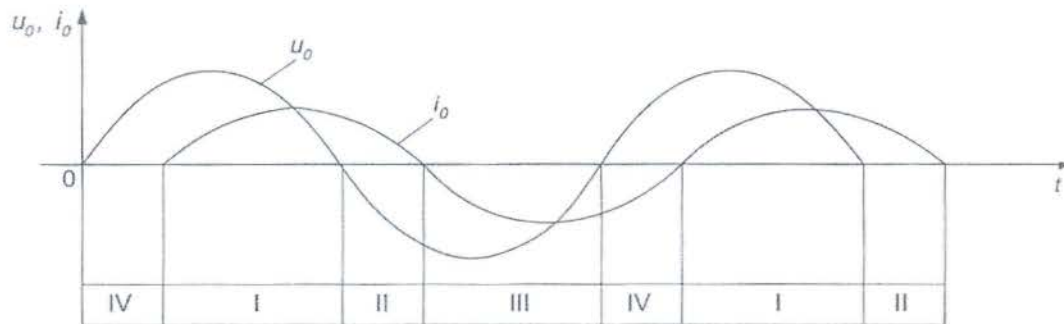
- ✓ Μονοφασικοί αντιστροφείς σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας
- ✓ Μονοφασικοί αντιστροφείς σε συνδεσμολογία γέφυρας
- ✓ Τριφασικοί αντιστροφείς σε συνδεσμολογία γέφυρας

5.1β Αρχή λειτουργίας αντιστροφέων

Για την καλύτερη κατανόηση της αρχής λειτουργίας των αντιστροφέων, εξετάζεται ένας μονοφασικός αντιστροφέας, ο οποίος παρουσιάζεται με τη μορφή λειτουργικού διαγράμματος (Σχήμα 5.3)



Σχήμα 5.3. Μονοφασικός αντιστροφέας



Σχήμα 5.4. Κυματομορφές των μεγεθών εξόδου του αντιστροφέα

Θεωρούμε ότι, η τάση εξόδου u_o του αντιστροφέα εξομαλύνεται, έτσι ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ημιτονοειδής. Το φορτίο που τροφοδοτεί ο αντιστροφέας είναι ωμικό – επαγωγικό RL , οπότε η τάση προηγείται της έντασης του ρεύματος όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4.

Ο αντιστροφέας τροφοδοτείται από μία πηγή συνεχούς ρεύματος, η οποία επιτρέπει τη ρύθμιση των μέσων τιμών της τάσης και όπως εξυπακούεται και τη ρύθμιση της ενεργούς τιμής της τάσης εξόδου u_o . Η ρύθμιση της συχνότητας και του μεγέθους της τάσης u_o , επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της τάσης ελέγχου του αντιστροφέα. Θεωρώντας μόνο τις θεμελιώδεις συνιστώσες της τάσης και του ρεύματος στην έξοδο του αντιστροφέα σε σχέση με τον χρόνο, κατά τη διάρκεια μιας περιόδου διακρίνονται τέσσερα τεταρτημόρια λειτουργίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.5.

Τεταρτημόρια I και III. Η τάση u_o και το ρεύμα i_o έχουν το ίδιο πρόσημο (τα δύο θετικά ή και τα δύο αρνητικά), οπότε η ισχύς εξόδου του αντιστροφέα, είναι:

$$p_o = u_o \cdot i_o > 0 \quad (1.1)$$

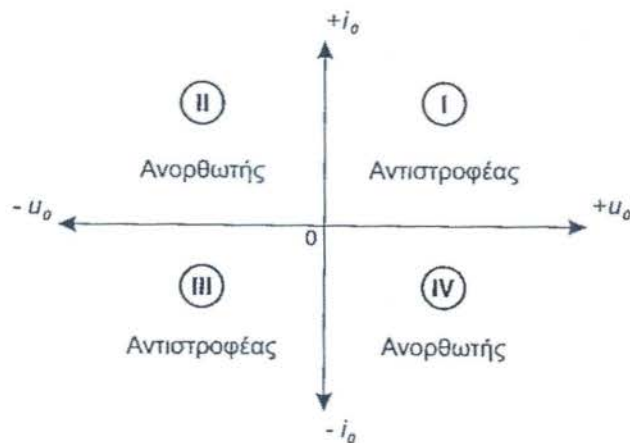
Επομένως, η ενέργεια μεταφέρεται από το κύκλωμα του συνεχούς ρεύματος προς το φορτίο, αντιστοιχώντας σε *λειτουργία αντιστροφέα*.

Τεταρτημόρια II και IV. Η τάση u_o και το ρεύμα i_o έχουν αντίθετο πρόσημο, οπότε η ισχύς εξόδου του αντιστροφέα είναι:

$$p_o = u_o \cdot i_o < 0 \quad (1.2)$$

Επομένως, η ενέργεια μεταφέρεται από το φορτίο προς το κύκλωμα συνεχούς ρεύματος αντιστοιχώντας σε *λειτουργία ανορθωτή*.

Επομένως προκύπτει ότι, ο αντιστροφέας πρέπει να μπορεί να λειτουργεί, κατά τη διάρκεια κάθε περιόδου και στα τέσσερα τεταρτημόρια του επιπέδου $u_o - i_o$.



Σχήμα 5.5. Περιοχές λειτουργίας αντιστροφέα

Αυτό μπορεί να επιτευχθεί, μόνο εάν ο αντιστροφέας αποτελείται από αμφίδρομα στοιχεία, τα οποία εξασφαλίζουν και τις δύο πολικότητες της τάσης u_o , ανεξάρτητα από τη φορά του ρεύματος i_o . Πρακτικά, αυτό επιτυγχάνεται με την αντιπαράλληλη σύνδεση σε κάθε ηλεκτρονικό διακόπτη, μιας διόδου.

Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε τα βασικά κυκλώματα και τις κυματομορφές εισόδου και εξόδου των διαφόρων τύπων των αντιστροφέων.

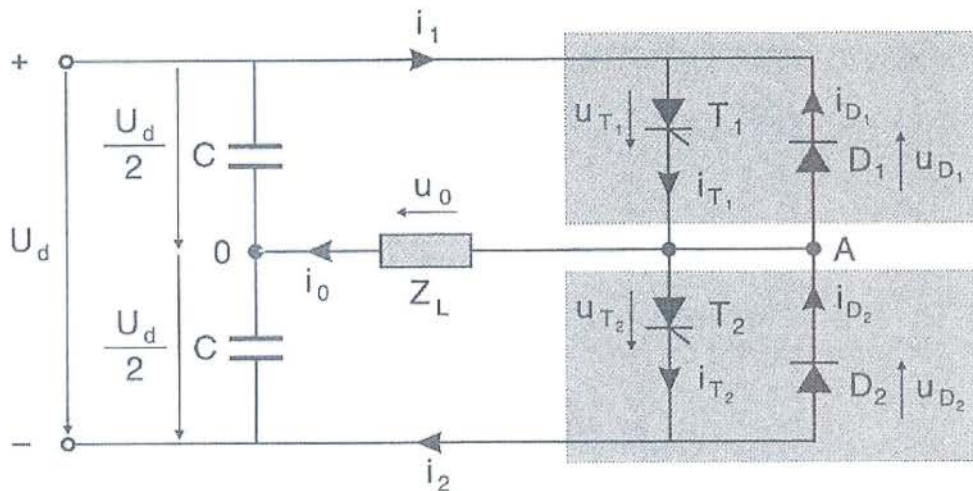
5. 2 Μονοφασικός αντιστροφέας σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας

5.2α Γενικά

Στο σχήμα 5.6, απεικονίζεται η βασική διάταξη ενός μονοφασικού αντιστροφέα μισού κύματος ή αντιστροφέα ενδιάμεσης λήψης πηγής συνεχούς τάσης. Όπως φαίνεται και στο κύκλωμα απαιτείται πηγή συνεχούς ρεύματος τριών ακροδεκτών, δηλαδή δύο ίδιες πηγές τάσης συνεχούς ρεύματος συνδεδεμένες σε σειρά, με κοινό αντινητικό ακροδέκτη.

Ως διακοπτικά στοιχεία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρανζίστορ, MOSFET, IGBT, GTO ή θυρίστορ, ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ εξόδου. Οι δίοδοι D1 και D2 χρησιμοποιούνται για να κυκλοφορεί μέσω αυτών το ρεύμα i_o του φορτίου, όταν αυτό, ανάλογα με τη φύση και το μέγεθος της σύνθετης αντίστασης φορτίου, αλλάζει φορά κατά τη διάρκεια της ημιπεριόδου της τάσης εξόδου u_o .

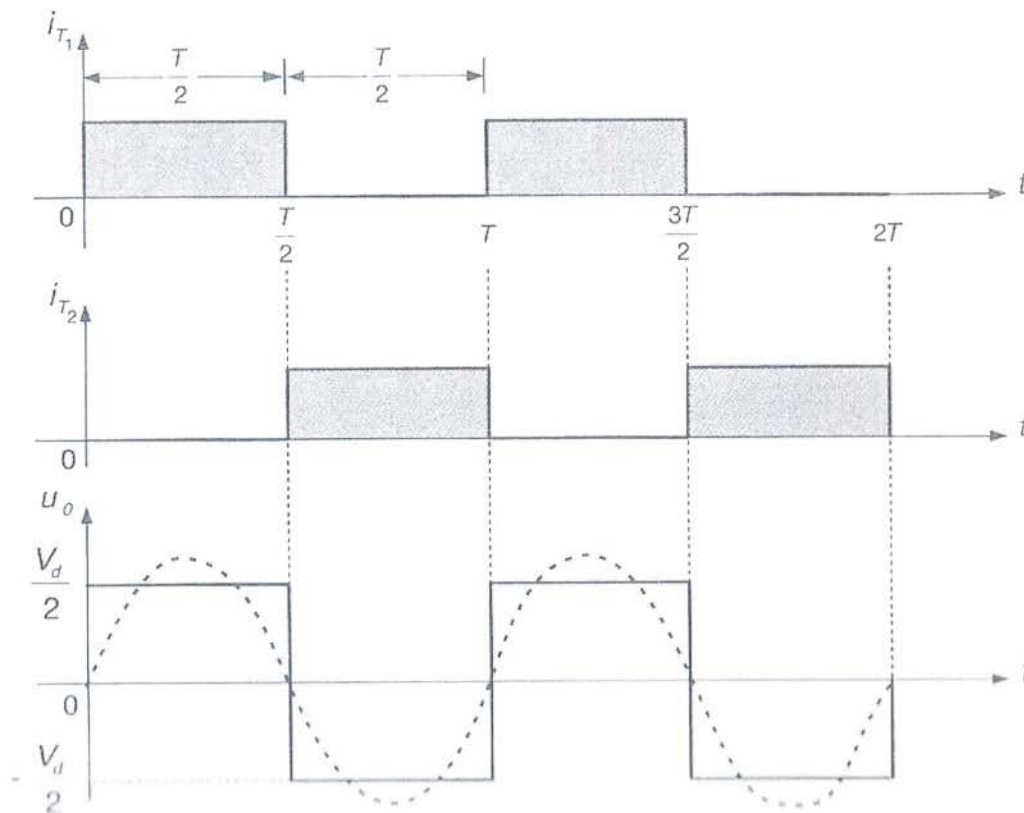
Στα άκρα της εισόδου του αντιστροφέα, συνδέονται σε σειρά δύο ίδιοι πυκνωτές που έχουν ίσες και μεγάλες χωρητικότητες. Το σημείο σύνδεσης των πυκνωτών βρίσκεται στο μισό δυναμικό, οπότε στα άκρα του κάθε πυκνωτή αναπτύσσεται τάση ίση με $V d/2$.



Σχήμα 5.6. Μονοφασικός αντιστροφέας σε συνδεσμολογία ημιγέφυρας

Ο μονοφασικός αντιστροφέας μισού κύματος αποτελείται από δύο τμήματα, που το κάθε ένα από αυτά τροφοδοτείται από πηγή συνεχούς τάσης $V d/2$. Από τα δύο τμήματα του κυκλώματος, το επάνω λειτουργεί κατά το χρονικό διάστημα $0 \leq t \leq T/2$

(σχήμα 5.7) και παρέχει τη θετική ημιπερίοδο της εναλλασσόμενης (τετραγωνικής μορφής) τάση εξόδου u_o .



Σχήμα 5.7. Κυματομορφές εισόδου – εξόδου του μονοφασικός αντιστροφέα ημιγέφυρας με ωμικό φορτίο.

Το κάτω τμήμα λειτουργεί κατά το χρονικό διάστημα $T/2 \leq t \leq T$ και παρέχει την αρνητική ημιπερίοδο της εναλλασσόμενης τάση εξόδου u_o / Το θυρίστορ $Th1$ και $Th2$ ανάβουν εναλλάξ, συνδέοντας το σημείο A στα θετικά ή στα αρνητικά άκρα της πηγής αντίστοιχα. Τα ρεύματα πύλης των θυρίστορ είναι παλμικά και έχουν τη μορφή που δείχνει το σχήμα 5.7. Η κυματομορφή του ρεύματος φορτίο i_o εξαρτάται από τη σύνθεση του ίδιου του φορτίου.

5.2β Λειτουργία με ωμικό φορτίο

Το πλάτος της θεμελιώδους αρμονικής της τάσης εξόδου u_o , με χρήση σειράς Fourier δίδεται από τη σχέση:

$$\frac{2}{T} \int_0^T U_0 \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{V_d}{2} \sin \omega \tau dt = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{V_d}{2} = \frac{2 \cdot V_d}{\pi} \quad (2.1)$$

Η ενεργός τιμή της θεμελιώδους αρμονικής της τάσης εξόδου u_0 , είναι:

$$V_{R,rms} = \frac{V_{0,rms}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{2V_d}{\pi} = \frac{\sqrt{2} V_d}{\pi} \quad (2.2)$$

και η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου u_0 , αντίστοιχα είναι:

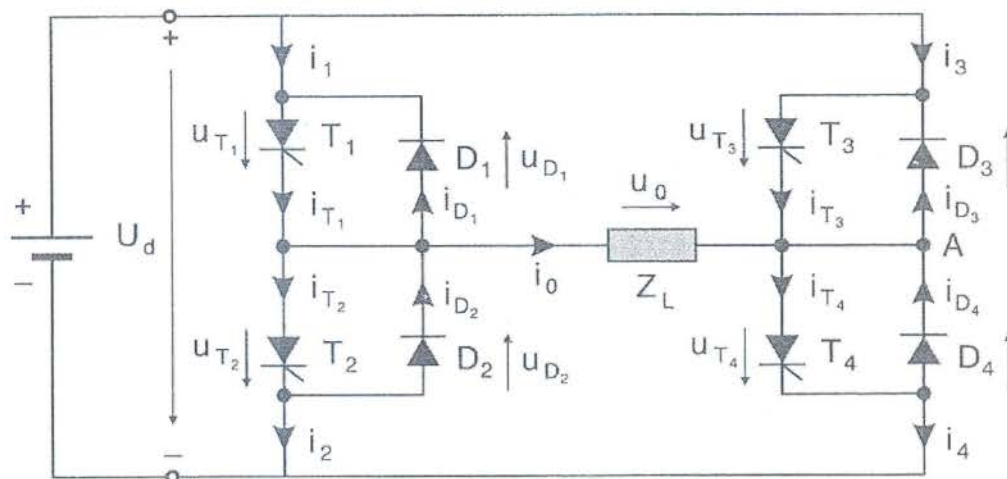
$$V_{0,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_0^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_2^{\pi} u_0^2 d\omega t} = \frac{V_d}{2} \quad (2.3)$$

5.3 Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας.

5.3α Θεωρητικό μέρος

Στο σχήμα 5.8, παρουσιάζεται το βασικό κύκλωμα που συνθέτει ένα μονοφασικό αντιστροφέας γέφυρας ή αντιστροφέα πλήρους κύματος. Αυτοί οι αντιστροφείς, ως προς τη συχνότητα και την τάση εξόδου, δεν εξαρτώνται από το φορτίο του εναλλασσόμενου ρεύματος.

Η πηγή τροφοδοσίας αυτών των αντιστροφέων είναι μια γεννήτρια συνεχούς τάσης, με πολύ μικρή εσωτερική αντίσταση (π.χ. συσσωρευτής). Όταν η τροφοδοσία γίνεται από ανορθωτική διάταξη, πρέπει στην είσοδο του αντιστροφέα να τοποθετείται πυκνωτής με μεγάλη χωρητικότητα, για να αποθηκεύει την ενέργεια που επιστρέφει από το φορτίο και παράλληλα να λειτουργεί σαν φίλτρο για να κόβει τις υψηλές αρμονικές του ρεύματος.



Σχήμα 5.8. Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας

Η διάταξη αυτή πλεονεκτεί έναντι του μονοφασικού αντιστροφέα μισού κύματος, γιατί δεν χρειάζεται πηγή συνεχούς τάσης τριών ακροδεκτών. Χρησιμοποιεί όμως αντί αυτής, δύο επιπλέον ζεύγη ημιαγωγών στοιχείων δηλαδή διπλάσιο αριθμό θυρίστωρ και διόδων.

Τα θυρίστωρ $Th1$ και $Th4$, άγουν σε σειρά ταυτόχρονα για το χρονικό διάστημα $0 \leq t \leq \pi$ της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου u_0 , όπως φαίνεται από τα ρεύματα πύλης τους στο σχήμα 3.2 και παράγουν τη θετική ημιπερίοδο. Επίσης ταυτόχρονα άγουν και τα θυρίστωρ $Th2$ και $Th3$, για το χρονικό διάστημα $\pi \leq t \leq 2\pi$ της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου u_0 και παράγουν την αρνητική ημιπερίοδο.

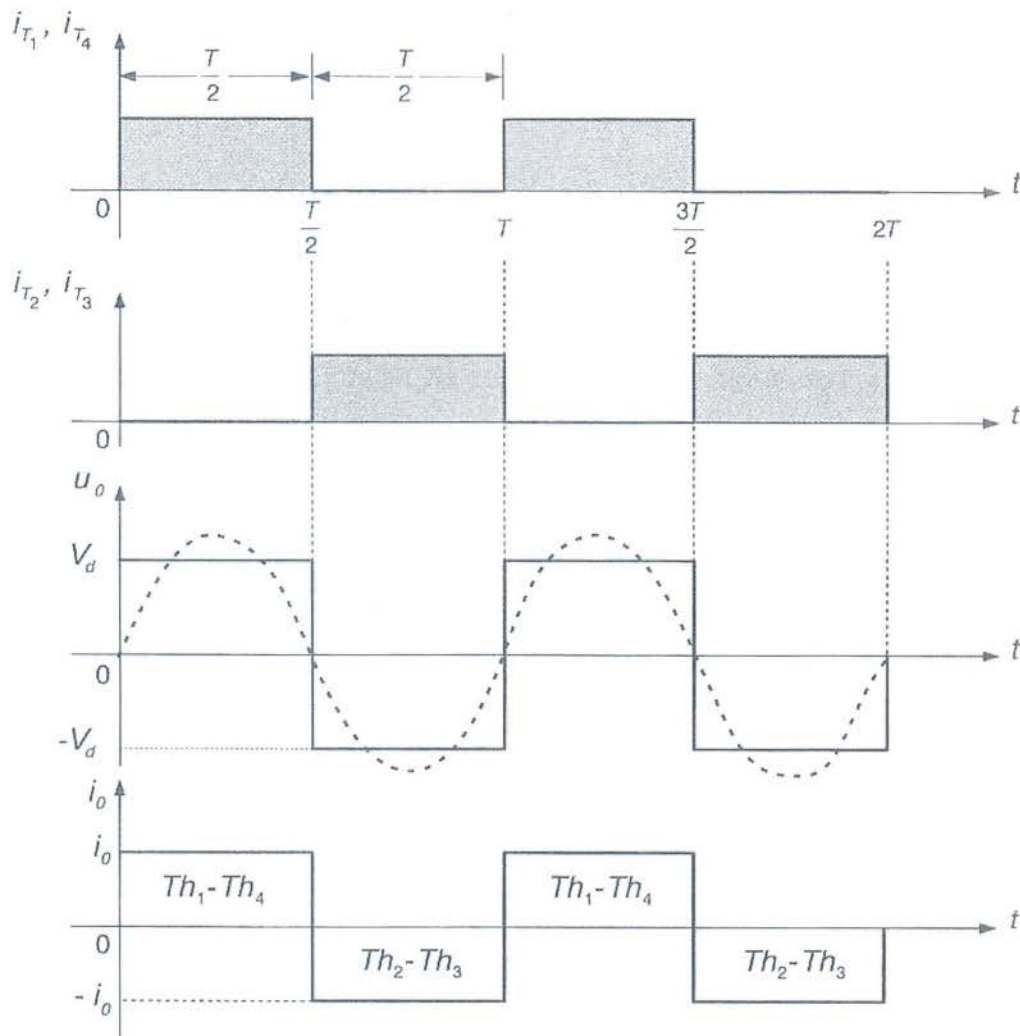
5.3β Λειτουργία με ωμικό φορτίο

Όταν το φορτίο είναι ωμικό (σχήμα 5.9), η κυματομορφή i_0 , του ρεύματος φορτίου, είναι καθαρά τετραγωνική και ακολουθεί ακριβώς την κυματομορφή της τάσης u_0 , στα άκρα της αντίστασης του φορτίου R . Το ρεύμα της κάθε ημιπεριόδου, παρέχεται εναλλάξ, μέσω των θυρίστωρ $Th1 - Th4$ και των θυρίστωρ $Th2 - Th3$. Στην ανάλυση των ελεγχόμενων κυκλωμάτων, συνήθως δεχόμαστε ότι, τα διάφορα στοιχεία είναι ιδανικά, χωρίς αυτό να επηρεάζει σημαντικά τους υπολογισμούς. Αν λοιπόν δεχθούμε ότι, τα θυρίστωρ είναι ιδανικά, θα λειτουργούν ως απλοί ηλεκτρονικοί διακόπτες.

Η τάση της πηγής δίδεται από τη σχέση:

$$U(t) = V_d \quad 0 < t < \pi$$

$$U(t) = -V_d \pi < t < 2\pi \quad (3.1)$$



Σχήμα 5.9. Κυματομορφές εισόδου – εξόδου μονοφασικού αντιστροφέα γέφυρας

Η ενεργός τιμή της τάσης εξόδου, είναι:

$$V_{o,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_0^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_2^\pi u_0^2(t) dt} = V_d \quad (3.2)$$

Η κυματομορφή της τάσης εξόδου $u_o(t)$ μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα ημιτονοειδών κυματομορφών χρησιμοποιώντας την ανάλυση κατά Fourier.

Το αποτέλεσμα, είναι το εξής:

$$V_o(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n \omega t \quad (3.3)$$

όπου:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad 3.3$$

και οι συντελεστές εύρους b_n , θα είναι:

$$b_n = \begin{cases} \frac{4V_d}{n\pi} & n=1,3, \\ \end{cases}$$

$$b_n = \begin{cases} 0 & n=2,4,5,6 \end{cases} \quad (3.4)$$

Δηλαδή, η τάση εξόδου $u_o(t)$ περιλαμβάνει μόνο περιττές αρμονικές.

Η θεμελιώδης συνιστώσα της τάσης είναι:

$$V_1(t) = \frac{4V_d}{\pi} \sin \omega t \quad (3.5)$$

και η συνιστώσα της τρίτης αρμονικής:

$$V_3(t) = \frac{4V_d}{3\pi} \sin \omega t \quad (3.6)$$

Επομένως, η συνιστώσα της τρίτης αρμονικής της τάσης εξόδου θα έχει το ένα τρίτο του εύρους της θεμελιώδους συνιστώσας.

Η μέγιστη τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης, από την ανάλυση κατά Fourier είναι:

$$V_{1,m} = \frac{2}{T} \int_0^T u_o \sin \omega t \, dt = \frac{1}{\pi} \left[2 \int_0^{\pi} V_d \sin \left(\frac{2\pi}{T} t \right) dt \right] = \frac{4}{\pi} \cdot V_d \quad (3.7)$$

Η ενεργός τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας της τάσης εξόδου, είναι:

$$V_{1,ms} = \frac{V_{1,m}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{4 \cdot V_d}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_d \quad (3.8)$$

Στην περίπτωση ενός καθαρά ωμικού φορτίου, το ρεύμα του φορτίου i_o , είναι:

$$\begin{aligned} i_o(t) &= I_{\max} = \frac{V_d}{R} & 0 < t < \pi \\ i_o(t) &= I_{\min} = -I_{\max} = -\frac{V_d}{R} & \pi < t < 2\pi \end{aligned} \quad (3.9)$$

οπότε η ενεργός τιμή της έντασης του ρεύματος, είναι:

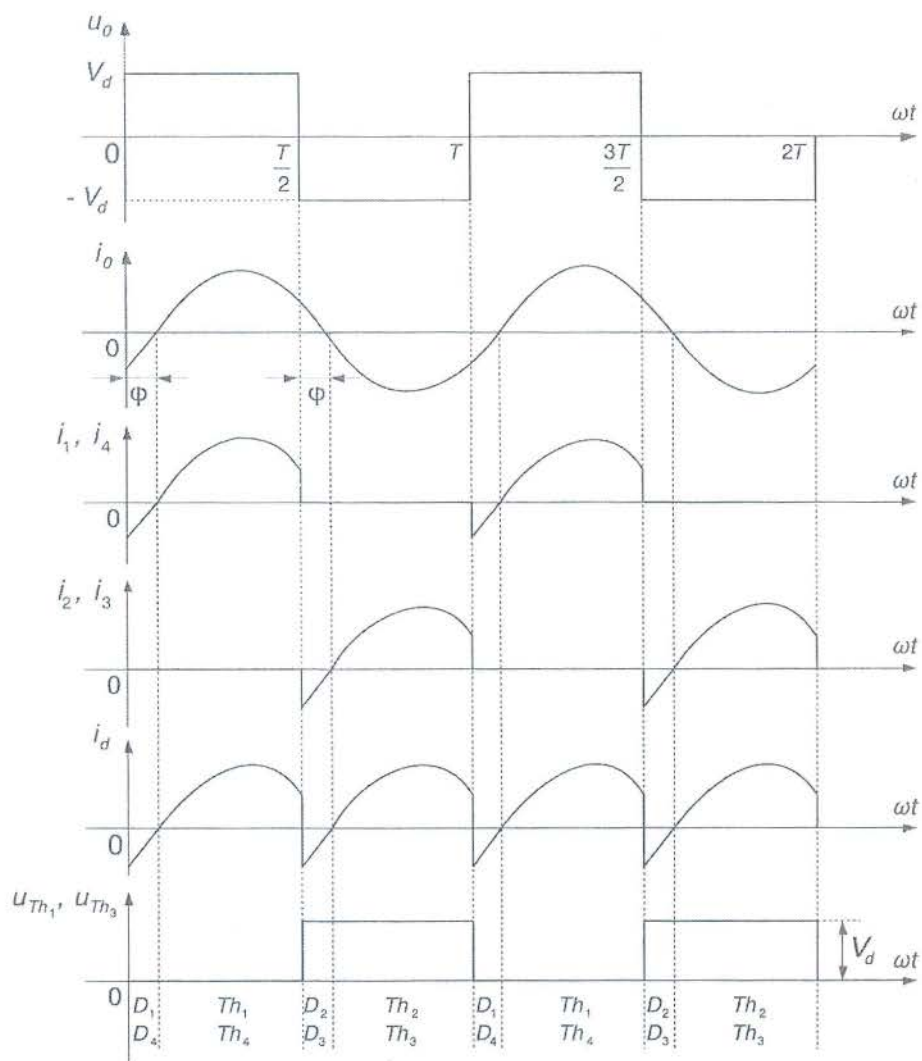
$$I_{R,rms} = \frac{V_{R,rms}}{R} = \frac{V_d}{R} = I_{\max} \quad (3.10)$$

και η ενεργός τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας αρμονικής της έντασης του ρεύματος, είναι:

$$I_{1,rms} = \frac{V_{1,rms}}{R} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{V_d}{R} \quad (3.11)$$

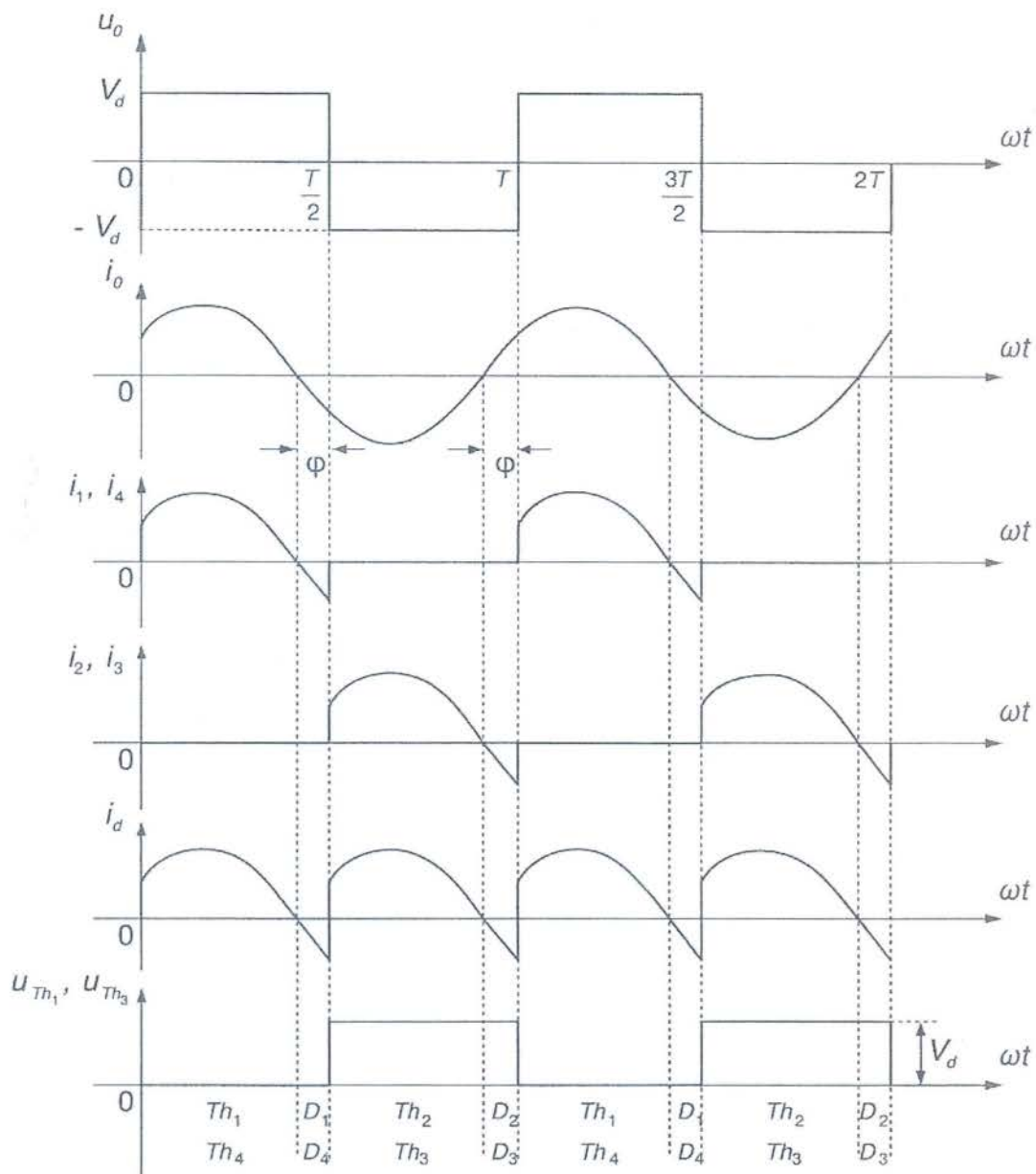
5.3γ Λειτουργία με επαγωγικό φορτίο

Όταν το φορτίο είναι επαγωγικής συμπεριφοράς, σχήμα 5.10, το ρεύμα i_o έπεται της τάσης u_o , με μια διαφορά φάσης φ .



Σχήμα 5.10. Κυματομορφές μονοφασικού αντιστροφέα γέφυρας με επαγωγικό φορτίο.

Επειδή η γωνία φ , εξαρτάται από το είδος και το μέγεθος του φορτίου, οι ηλεκτρονικοί διακόπτες $Th1 - Th4$ και $Th2 - Th3$ υποχρεώνονται να εκκινούν σε κάποιο ενδιάμεσο χρόνο, μέσα σε κάθε ημιπερίοδο και όχι στην αρχή της ημιπεριόδου. Για το λόγο αυτό οι παλμοί έναυσης, πρέπει να καλύπτουν χρονικά ολόκληρη την ημιπερίοδο, δηλαδή για διάρκεια $T/2$, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.11.



Σχήμα 5.11. Κυματομορφές μονοφασικού αντιστροφέα γέφυρας με χωρητικό φορτίο C.

Σε αυτή την περίπτωση, λόγω της σταθερής τάσης V_d σε μία ημιπερίοδο, αναγκαστικά το ρεύμα θα μεταβάλλεται γραμμικά και μεταξύ των τιμών I_{max} και $-I_{max}$. Έτσι μπορεί να γραφεί:

$$\begin{aligned}
 i_o(t) &= \frac{V_d}{L}t - I_{max} & 0 < t < \pi \\
 i_o(t) &= -\frac{V_d}{L}(t - \pi) + I_{max} & \pi < t < 2\pi
 \end{aligned}
 \quad (3.12)$$

όπου:

$$I_{\max} = \frac{V_d}{4L} T = \frac{\pi V_d}{2 \omega L} \quad (3.13)$$

$$\text{και} \quad \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

Η ενεργός τιμή της έντασης του ρεύματος στο φορτίο, είναι:

$$I_{o,rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_o^2(t) dt} = \sqrt{\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u_o^2(t) dt} = \frac{V_d}{4\sqrt{3}L} T = \frac{\pi V_d}{2\sqrt{3} \omega L} \quad (3.14)$$

και η ενεργός τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας της έντασης του ρεύματος, είναι:

$$I_{1,rms} = \frac{V_{1,rms}}{\omega L} = \frac{\sqrt{2} V_d}{\pi^2 L} T = \frac{2\sqrt{2} V_d}{\pi \omega L} \quad (3.15)$$

5.3δ Λειτουργία με χωρητικό φορτίο

Οι κυματομορφές στην περίπτωση λειτουργίας με χωρητικό φορτίο. Παρουσιάζονται στο σχήμα 3.4.

Το ρεύμα i_o , προηγείται της τάσης u_o με μια διαφορά φάσης φ .

Τη χρονική στιγμή $t = 0$, ο ηλεκτρονικός διακόπτης $Th1$ δέχεται παλμό αποκοπής και το ρεύμα ρέει από το φορτίο στη δίοδο $D2$.

Τη χρονική στιγμή $t = t_o$, το ρεύμα γίνεται αρνητικό. Επομένως, το θυρίστορ $Th1$ οδηγείται σε αποκοπή και η δίοδος αρχίζει να άγει μέχρι τη χρονική στιγμή $t = T/2$, όπου σταματάει να άγει. Σε αυτό το σημείο μπαίνει σε αγωγή το θυρίστορ $Th2$.

5.3ε Λειτουργία με ωμικό – επαγωγικό φορτίο

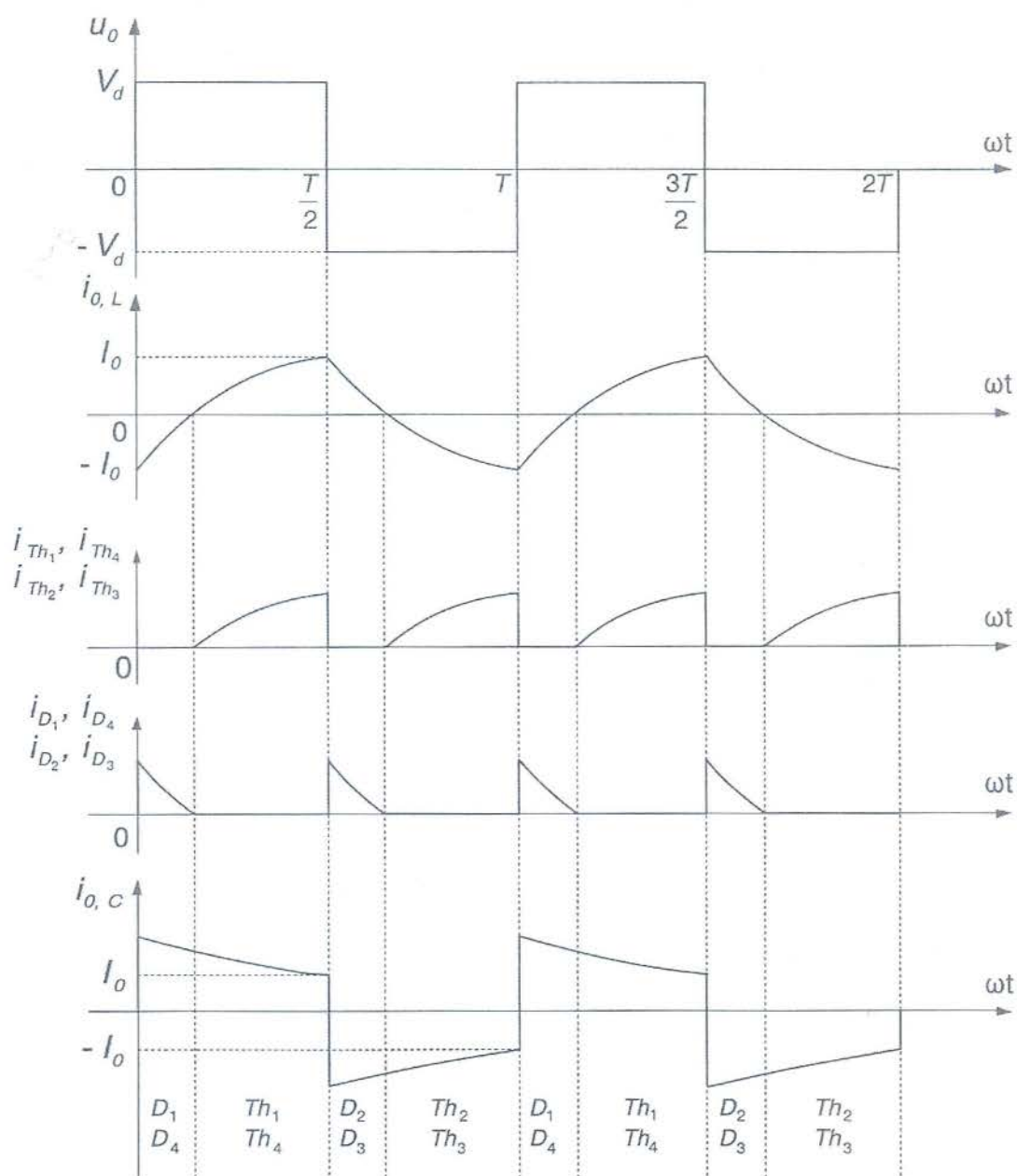
Αν το φορτίο του κυκλώματος του σχήματος 3.1. είναι ωμικό – επαγωγικό, κατά τη διάρκεια μετάβασης, τα ρεύματα των θυρίστορ που οδηγούνται σε αποκοπή δεν θα μηδένιζε στιγμιαία. Επίσης, δεν θα αυξ'λανεται απότομα το ρεύμα των θυρίστορ στα οποία προκαλείται έναυση, λόγω της επαγωγικής συμπεριφοράς του φορτίου και της εμφάνισης αντιηλεκτρεγερτικής δύναμης. Για να αποφευχθούν ανεπιθύτητα

βραχυκυκλώματα, λόγω του ότι κάποια χρονική στιγμή θα άγουν ταυτόχρονα όλα τα θυρίστορ, προβλέπονται δίοδοι σε αντιπαράλληλη συνδεσμολογία προς τα αντίστοιχα θυρίστορ.

Οι κυματομορφές του κυκλώματος για ωμικό – επαγωγικό φορτίο, παρουσιάζονται στο σχήμα 3.5 (β), (γ), (δ).

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η μεταβολή του ρεύματος έχει εκθετική μορφή με μία σταθερά χρόνου:

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (3.16)$$



Σχήμα 5.12 Κυματομορφές τάσης και ρεύματος εξόδου ενός μονοφασικού αντιστροφέα γέφυρας για: (α) ωμικό φορτίο, (β), (γ), (δ) ωμικό –επαγωγικό φορτίο (ε) ωμικό –χωρητικό φορτίο.

και με εύρος μεταξύ του I_{max} και $I_{min} = -I_{max}$. Η αναλυτική μορφή του ρεύματος σε αυτή την περίπτωση είναι:

$$\begin{aligned}
 i_o(t) &= \frac{V_d}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) - I_{\max} e^{-\frac{t}{\tau}} & 0 < t < \pi \\
 i_o(t) &= -\frac{V_d}{R} \left(1 - e^{-\frac{t-\pi}{\tau}} \right) + I_{\max} e^{-\frac{t-\pi}{\tau}} & \pi < t < 2\pi
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

Παρόμοια προκύπτει και το I_{\max} :

$$I_{\max} = \frac{V_d}{R} \frac{e^{\frac{\pi}{\tau}} - 1}{e^{\frac{\pi}{\tau}} + 1} \tag{3.18}$$

η ενεργός τιμή του ρεύματος στο φορτίο, είναι:

$$I_{RL,ms} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} i^2(t) dt} = \frac{V_d}{R} \sqrt{1 - \frac{4\tau}{T} \frac{R \cdot I_{\max}}{V_d}} = \frac{V_d}{R} \sqrt{1 - \frac{2\tau}{\pi} \frac{1 - e^{-\frac{\pi}{\tau}}}{1 + e^{-\frac{\pi}{\tau}}}} \tag{3.19}$$

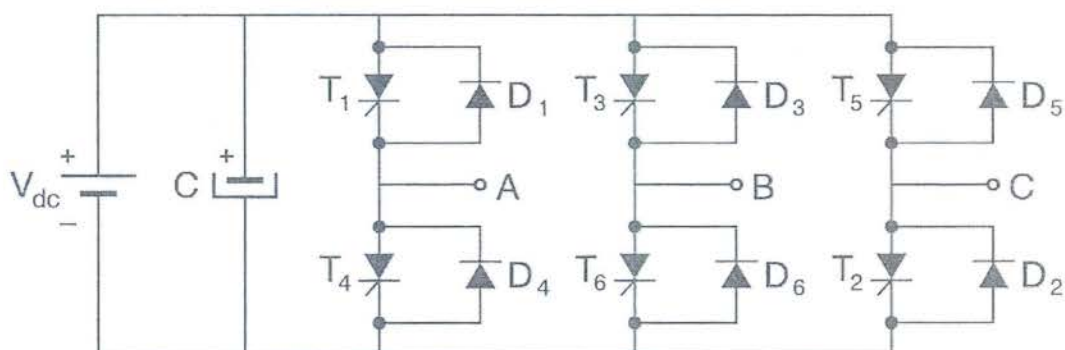
5.3στ Λειτουργία με ωμικό – χωρητικό φορτίο

Όταν το φορτίο είναι χωρητικής συμπεριφοράς, κυματομορφή (ε) του σχήματος 3.5, το ρεύμα i_o εμφανίζει τις γνωστές αιχμές στους χρόνους: $t = 0, T/2, T, 3T/2, \dots$ από τις περιοδικές φορτίσεις και εκφορτίσεις του πυκνωτή C της σύνθεσης αντίστασης ZL , του φορτίου.

5.4 Τριφασικός αντιστροφέας με πηγή συνεχούς τάσης

5.4α Εισαγωγή

Στο σχήμα 4.1., παρουσιάζεται η απλοποιημένη μορφή κυκλώματος ισχύος ενός τριφασικού αντιστροφέα με πηγή συνεχούς τάσης.



Σχήμα 5.13 Κύκλωμα ισχύος τριφασικού αντιστροφέα με πηγή συνεχούς τάσης.

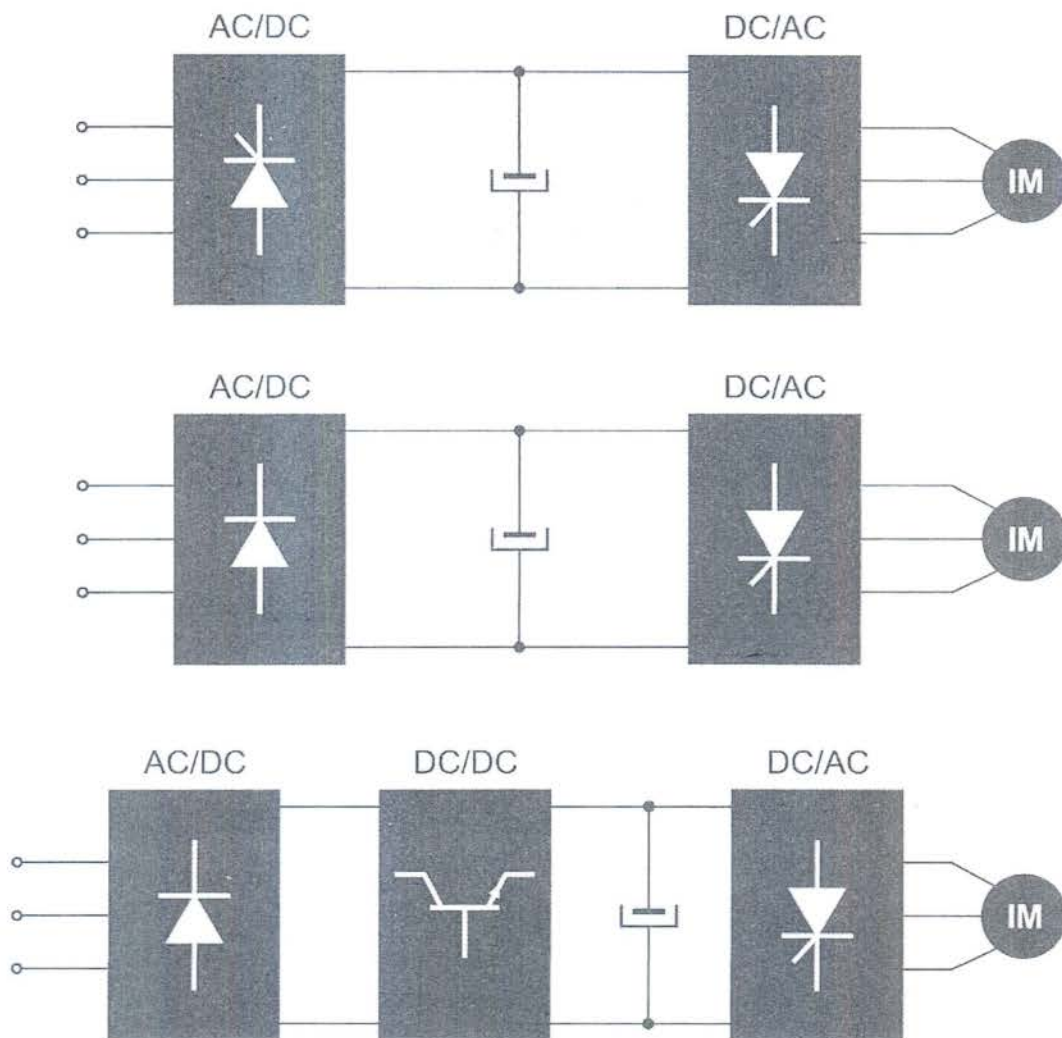
Η αρίθμηση των διακοπτικών στοιχείων, έγινε με βάση τη χρονική διαδοχή της λειτουργίας τους. Ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής στην είσοδο έχει ως σκοπό τη σταθεροποίηση της τάσης. Η μορφή της τάσης στην έξοδο του αντιστροφέα, εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από τη λογική της παλμοδότησης των διακοπτικών στοιχείων. Η παρουσία των διόδων είναι απαραίτητη για επαγωγικά φορτία, διότι εξασφαλίζει την κυκλοφορία της άεργης ισχύος καθώς και σε περιπτώσεις πέδησης, όπου έχουμε ροή ρεύματος αντίθετης φοράς από εκείνη των ελεγχόμενων διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα. Στο σχήμα 4.2, παρουσιάζονται σε απλοποιημένη μορφή, τρεις από τους πλέον χρησιμοποιούμενους σε κοινές βιομηχανικές εφαρμογές, τύποι συστημάτων οδήγησης με αντιστροφείς με πηγή συνεχούς τάσης.

Τα συστήματα οδήγησης (β) και (γ), λόγω της μη ελεγχόμενης ανορθωτικής διάταξης, παρουσιάζουν καλύτερο συντελεστή ισχύος στην είσοδο.

Για λειτουργία δυναμικής πέδησης, συνήθως τοποθετείται μια βαττική αντίσταση από την πλευρά του συνεχούς (παράλληλα στον ηλεκτρολυτικό πυκνωτή),

για την απορρόφηση της πλεονάζουσας κινητικής ενέργειας των στρεφομένων μαζών και την αποφυγή υπέρτασης στα άκρα του πυκνωτή.

Για λειτουργία αναγεννητικής πέδησης (δηλαδή διοχέτευση της κινητικής ενέργειας στο δίκτυο του Ε.Ρ.), είναι απαραίτητη η επιπρόσθετη τοποθέτηση ενός ακόμη μετατροπέα Ε.Ρ./Σ.Ρ., σε αντιπαράλληλη σύνδεση με τον ήδη υπάρχοντα.



Σχήμα 5.14 Απλοποιημένη μορφή συστημάτων οδήγησης ασύγχρονων κινητήρων με αντιστροφή με πηγή συνεχούς τάσης.

5.4β Αρχή λειτουργίας τριφασικού αντιστροφέα με πηγή συνεχούς τάσης

Ο αντιστροφέας τετραγωνικού κύματος, αποτελεί την πιο απλή μορφή αντιστροφέα με πηγή συνεχούς τάσης.

Κάθε θυρίστορ παλμοδοτείται σε διάστημα 60 ηλεκτρικών μοιρών (ή το 1/6 της

περιόδου λειτουργίας), μετά το προηγούμενό του.

Ο αριθμός των θυρίστορ που βρίσκονται ταυτόχρονα σε αγωγή, εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από τη χρονική διάρκεια των παλμών. Ο μόνος περιορισμός είναι ότι τα διαστήματα αγωγής στα θυρίστορ του ίδιου κλάδου δεν πρέπει να συμπίπτουν, διότι θα προκαλέσουν το βραχυκύκλωμα της τάσης εισόδου.

Ανάλογα με τη διάρκεια αγωγής των θυρίστορ, διακρίνονται δύο λειτουργικές καταστάσεις ελέγχου

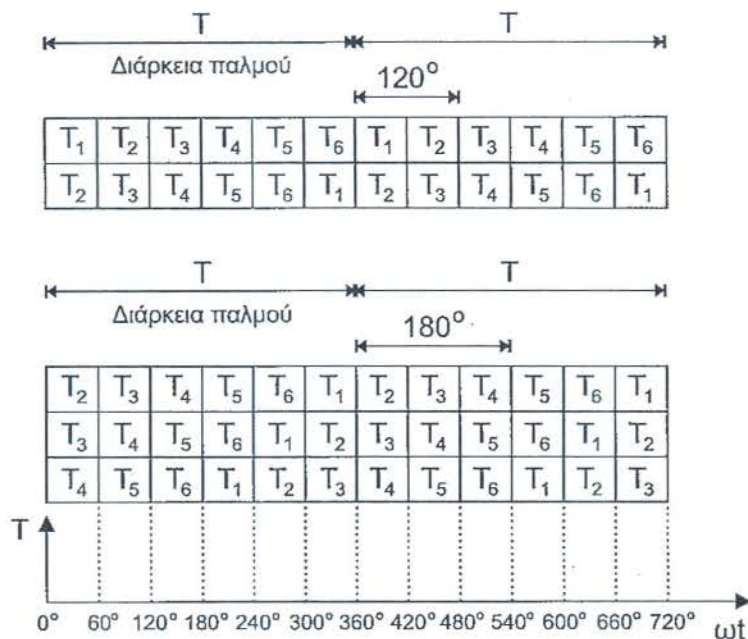
- ✓ Για *χρονική διάρκεια παλμών έναυσης* 120° (1/3 της περιόδου), έχουμε την ταυτόχρονη αγωγή δύο θυρίστορ
- ✓ Για *χρονική διάρκεια παλμών έναυσης* 180° (1/2 της περιόδου), έχουμε την ταυτόχρονη αγωγή τριών θυρίστορ

Στο σχήμα 5.15, παρουσιάζονται οι κυματομορφές των φασικών και πολικών τάσεων στην έξοδο του αντιστροφέα. Η διάρκεια των παλμών είναι 180° .

Όταν $V_d = V_n$, θα έχουμε:

$$V_{an}(\omega t) = \begin{cases} \frac{V_d}{2} & \text{για } 0 < \omega t < 180^\circ \text{ όταν αγει το } T_1 \\ -\frac{V_d}{2} & \text{για } 180^\circ < \omega t < 360^\circ \text{ όταν αγει το } T_4 \end{cases} \quad (4.1)$$

Από την ανάλυση κατά Fourier, προκύπτουν οι παρακάτω αναλυτικές εκφράσεις για τις φασικές τάσεις, με αναφορά το τεχνικό κόμβο "0".



Σχήμα 5.15 Χρονική διαδοχή παλμοδότησης διακοπτικών στοιχείων αντιστροφέα με πηγή συνεχούς τάσης τετραγωνικού κύματος (α) Διάρκεια παλμού 120°, (β) Διάρκεια παλμού 180°.

$$V_{a0}(t) = \frac{2V_d}{\pi} \left[\cos \omega t + \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \dots \right] \quad (4.2)$$

και επειδή:

$$V_{b0}(t) = V_{a0}(\omega t - 120^\circ)$$

$$V_{c0}(t) = V_{a0}(\omega t + 120^\circ)$$

$$V_{b0}(t) = \frac{2V_d}{\pi} \left[\cos(\omega t - 120^\circ) + \frac{1}{3} \cos 3(\omega t - 120^\circ) + \frac{1}{5} \cos 5(\omega t - 120^\circ) + \dots \right] \quad (4.3)$$

$$V_{c0}(t) = \frac{2V_d}{\pi} \left[\cos(\omega t + 120^\circ) + \frac{1}{3} \cos 3(\omega t + 120^\circ) + \frac{1}{5} \cos 5(\omega t + 120^\circ) + \dots \right] \quad (4.4)$$

Οι πολικές τάσεις, προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$V_{ab}(t) = V_{a0}(t) - V_{b0}(t) \quad (4.5)$$

$$V_{bc}(t) = V_{b0}(t) - V_{c0}(t) \quad (4.6)$$

$$V_{ca}(t) = V_{c0}(t) - V_{a0}(t) \quad (4.7)$$

Επομένως:

$$V_{ab}(t) = \frac{2\sqrt{3}V_d}{\pi} \left[\cos(\omega t + 30^\circ) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t + 30^\circ) - \frac{1}{7} \cos(7\omega t + 30^\circ) - \dots \right] \quad (4.8)$$

$$V_{bc}(t) = \frac{2\sqrt{3}V_d}{\pi} \left[\cos(\omega t - 90^\circ) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t - 90^\circ) - \frac{1}{7} \cos(7\omega t - 90^\circ) - \dots \right] \quad (4.9)$$

$$V_{ca}(t) = \frac{2\sqrt{3}V_d}{\pi} \left[\cos(\omega t + 150^\circ) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t + 150^\circ) - \frac{1}{7} \cos(7\omega t + 150^\circ) - \dots \right] \quad (4.10)$$

Στις πολικές τάσεις, υπάρχουν μόνο περιττές αρμονικές τάξης. Δηλαδή:

$$6n \pm 1, \quad \text{όπου } n = \text{ακέραιος} \quad (4.11)$$

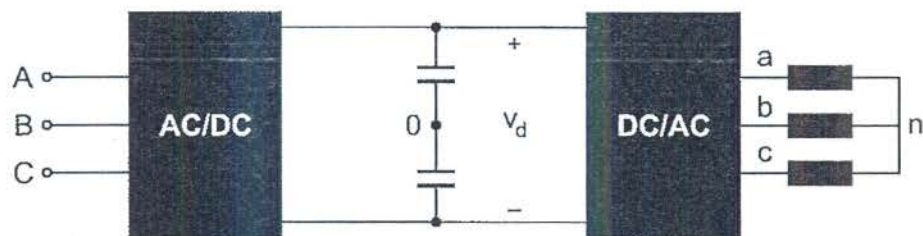
5.4γ Τριφασικός αντιστροφέας με πηγή συνεχούς τάσης σε συνδεσμολογία φορτίο σε αστέρα.

Για φορτίο συνδεδεμένο σε αστέρα (σχήμα 4.4.), ισχύει:

$$V_{a0}(t) = V_{an}(t) + V_{n0}(t) \quad (4.12)$$

$$V_{b0}(t) = V_{bn}(t) + V_{n0}(t) \quad (4.13)$$

$$V_{c0}(t) = V_{cn}(t) + V_{n0}(t) \quad (4.14)$$



Σχήμα 5.16 Κύκλωμα ισχύος τριφασικού μετατροπέα AC/DC/ AC με πηγή συνεχούς τάσης σε συνδεσμολογία φορτίου σε αστέρα.

Για τριφασικό συμμετρικό σύστημα όμως:

$$V_{an}(t) + V_{bn}(t) + V_{cn}(t) = 0 \quad (4.15)$$

Από τις σχέσεις (4.12) έως και (4.15), προκύπτει

$$V_{n0}(t) = \frac{1}{3} [V_{a0}(t) + V_{b0}(t) + V_{c0}(t)] \quad (4.16)$$

Τελικά, οι *φασικές τάσεις* δίνονται από τις σχέσεις:

$$V_{an}(t) = V_{a0}(t) - V_{n0}(t) = \frac{2}{3} V_{a0}(t) - \frac{1}{3} [V_{b0}(t) + V_{c0}(t)] \quad (4.17)$$

$$V_{bn}(t) = V_{b0}(t) - V_{n0}(t) = \frac{2}{3} V_{b0}(t) - \frac{1}{3} [V_{a0}(t) + V_{c0}(t)] \quad (4.18)$$

$$V_{cn}(t) = V_{c0}(t) - V_{n0}(t) = \frac{2}{3} V_{c0}(t) - \frac{1}{3} [V_{a0}(t) + V_{b0}(t)] \quad (4.19)$$

Παίρνοντας υπόψη μας τις σχέσεις (4.17), (4.18) και (4.19), μπορούν να υπολογιστούν και οι *πολικές τάσεις* του τριφασικού αντιστροφέα.

$$V_{ab}(t) = V_{an}(t) - V_{bn}(t) = V_{a0}(t) - V_{b0}(t) \quad (4.20)$$

$$V_{bc}(t) = V_{bn}(t) - V_{cn}(t) = V_{b0}(t) - V_{c0}(t) \quad (4.21)$$

$$V_{ca}(t) = V_{cn}(t) - V_{an}(t) = V_{c0}(t) - V_{a0}(t) \quad (4.22)$$

Από τις σχέσεις (4.20), (4.21) και (4.22), προκύπτει η δυνατότητα υπολογισμού των φασικών τάσεων από τις πολικές τάσεις του τριφασικού αντιστροφέα.

$$V_{an}(t) = \frac{1}{3} [V_{ab}(t) - V_{ca}(t)] \quad (4.23)$$

$$V_{bn}(t) = \frac{1}{3} [V_{bc}(t) - V_{ab}(t)] \quad (4.24)$$

$$V_{cn}(t) = \frac{1}{3} [V_{ca}(t) - V_{bc}(t)] \quad (4.25)$$

Για τη γραφική παρουσίαση των κυματομορφών του σχήματος 4.5, πήραμε υπόψη μας τους υπολογισμούς των φασικών τάσεων των σχέσεων (4.17), (4.18) και (4.19) και τους υπολογισμούς των πολικών τάσεων των σχέσεων (4.20), (4.21) και (4.22). Εξετάζοντας για κάθε χρονικό διάστημα τη λειτουργία των διακοπτικών στοιχείων, προκύπτει ότι, η τιμή του ρεύματος *id* θα είναι:

$$0^\circ < \omega t < 60^\circ \Rightarrow i_d = i_a + i_c = -i_b \quad (4.26)$$

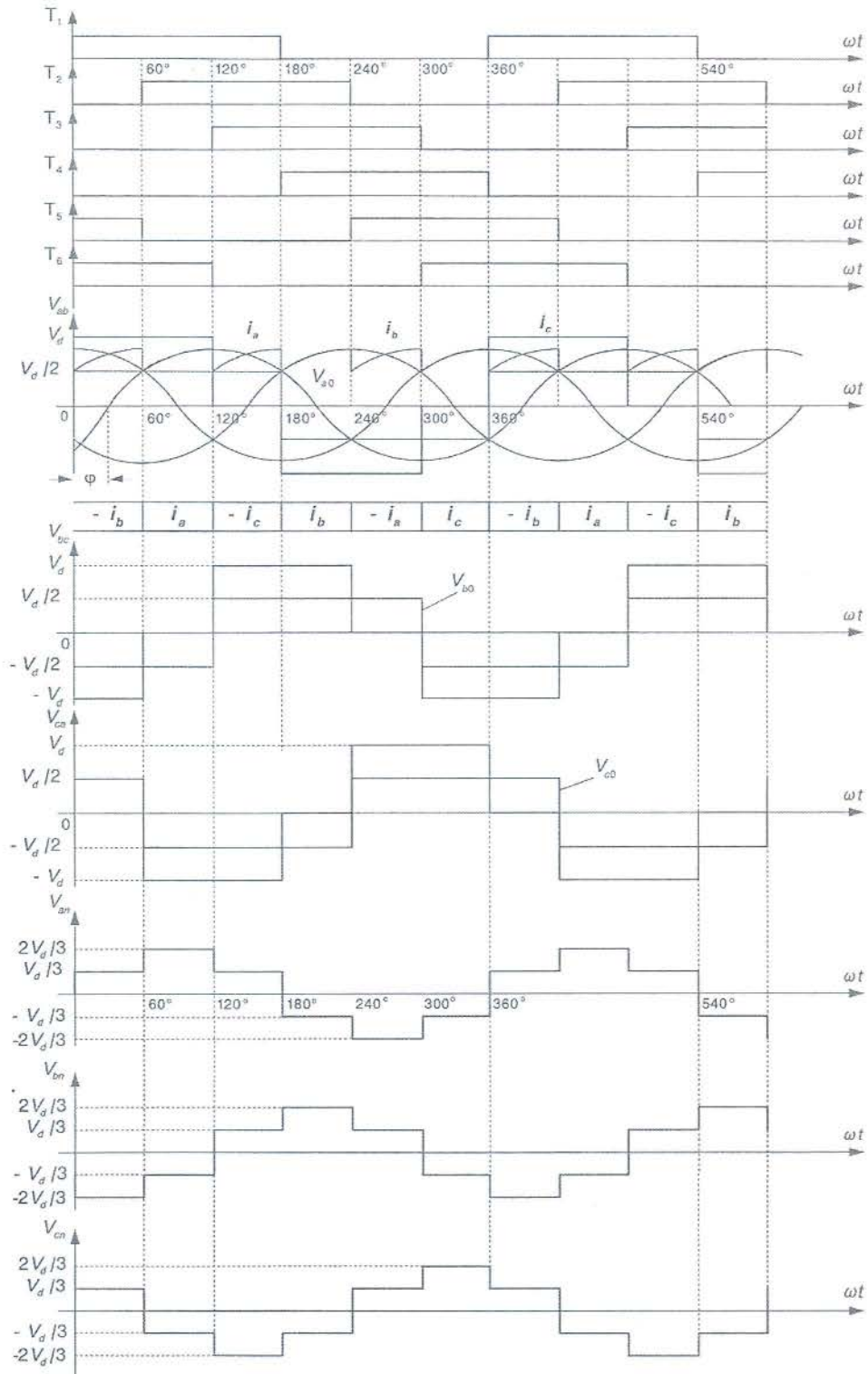
$$60^\circ < \omega t < 120^\circ \Rightarrow i_d = -i_b - i_c = i_a \quad (4.27)$$

$$120^\circ < \omega t < 180^\circ \Rightarrow i_d = i_a + i_b = -i_c \quad (4.28)$$

$$180^\circ < \omega t < 240^\circ \Rightarrow i_d = -i_a - i_c = i_b \quad (4.29)$$

$$240^\circ < \omega t < 300^\circ \Rightarrow i_d = i_b + i_c = -i_a \quad (4.30)$$

Από τις σχέσεις (4.26) ÷ (4.30), προκύπτει η κυματομορφή του ρεύματος *id* του σχήματος 5.17.



Σχήμα 5.17 Κυματομορφές φασικών και πολικών τάσεων αντιστροφέα με πηγή συνεχούς τάσης τετραγωνικού κύματος. Διάρκεια παλμών 180°.

Η ενεργός τιμή της φασικής τάσης, είναι:

$$V_{a1_{rms}} = V_{b1_{rms}} = V_{c1_{rms}} = \frac{2V_d}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2}}{3} V_d \quad (4.31)$$

και η ενεργός τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας της φασικής τάσης, είναι:

$$V_{a1_{rms}} = V_{b1_{rms}} = V_{c1_{rms}} = \frac{2V_d}{\sqrt{2}\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_d \quad (4.32)$$

Η ενεργός τιμή της πολικής τάσης, είναι:

$$V_{ab_{rms}} = V_{bc_{rms}} = V_{ca_{rms}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_{ab}^2(\omega t) d(\omega t)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} 2 \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} u_{ab}^2(\omega t) d(\omega t)} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_d \quad (4.33)$$

και η ενεργός τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας της πολικής τάσης, είναι:

$$V_{ab1_{rms}} = V_{bc1_{rms}} = V_{ca1_{rms}} = \frac{V_{ab_{max}}}{\sqrt{2}} = \frac{2\sqrt{3} V_d}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} V_d \quad (4.34)$$

Σύμφωνα με το σχήμα 4.5, το ρεύμα εισόδου i_{dc} , έχει συχνότητα έξι φορές μεγαλύτερη από τη συχνότητα του ρεύματος φορτίου.

Τα ρεύματα στο τριφασικό φορτίο σε συνδεσμολογία τριγώνου, γράφονται:

$$\begin{aligned} i_a &= I_a \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi) \\ i_b &= I_a \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) \\ i_c &= I_a \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi\right) \end{aligned} \quad (4.35)$$

Η μέση τιμή του ρεύματος εισόδου, είναι:

$$\begin{aligned}
 I_{a_{av}} = I_{b_{av}} = I_{c_{av}} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_{ab}(\omega t) d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} I_a \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi) d(\omega t) = \\
 &= I_a \sqrt{2} [-\cos(\omega t - \varphi)] \Big|_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} = \frac{3}{\pi} I_a \sqrt{2} \left[\cos\left(\frac{\pi}{3} - \varphi\right) - \cos\left(2\frac{\pi}{3} - \varphi\right) \right] = \\
 &= \frac{3}{\pi} I_a \sqrt{2} \left[2 \cos \frac{\pi}{3} \cos \varphi \right] = \frac{3}{\pi} I_a \sqrt{2} \cos \varphi
 \end{aligned} \tag{4.36}$$

και η ενεργός τιμή του ρεύματος εισόδου, είναι:

$$I_{dc} = I_a \sqrt{2} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \cos 2\varphi} \tag{4.37}$$

Αν και η λογική παλμοδότησης του αντιστροφέα τετραγωνικού κύματος είναι αρκετά απλή, δεν χρησιμοποιείται στα διάφορα βιομηχανικά συστήματα οδήγησης κινητήρων, λόγω του μεγάλου ποσοστού αρμονικών που εισάγονται. Οι διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούνται σήμερα για την εξάλειψη ή τη μείωση των αρμονικών, είναι οι ακόλουθες:

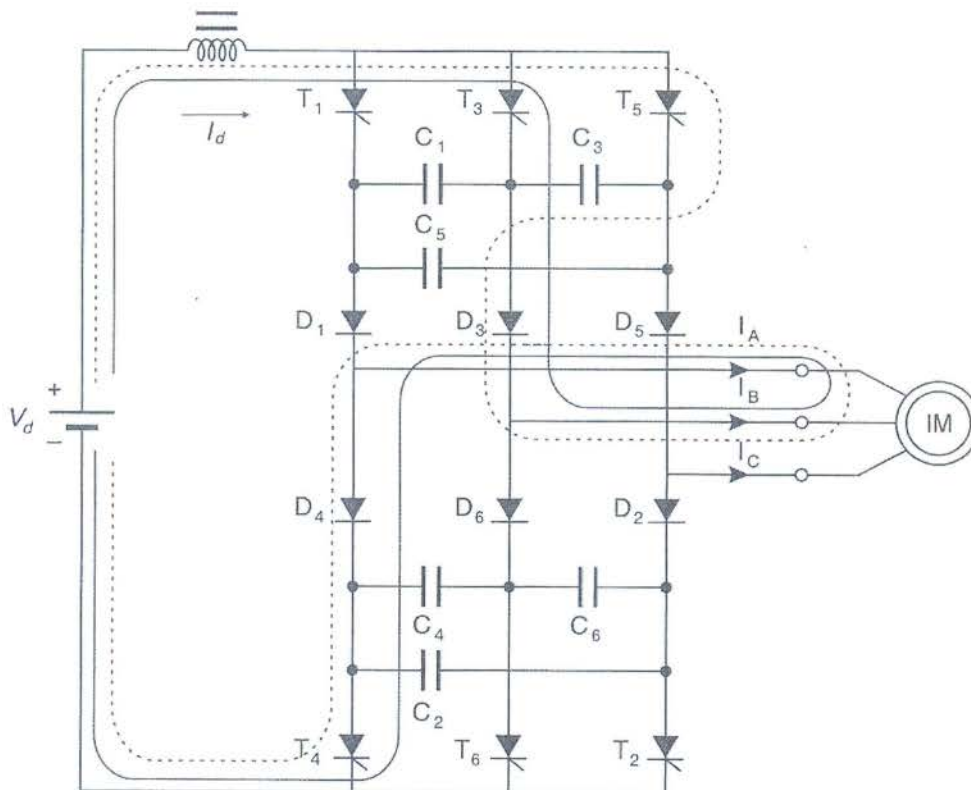
- ✓ Εξάλειψη ανώτερων αρμονικών με την τεχνική της Ημιτονοειδούς Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (*Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM*). Με την τεχνική αυτή επιτυγχάνεται επίσης και ο έλεγχος της τάσης εξόδου του αντιστροφέα.
- ✓ Εξάλειψη ανώτερων αρμονικών με την τεχνική των *Patel* και *Hoft*.
- ✓ Εξάλειψη ανώτερων αρμονικών με διάφορες τεχνικές, οι οποίες αναφέρονται σε συνδεσμολογίες μετασχηματιστών.

- ✓ Εξάλειψη ανώτερων αρμονικών με την τεχνική της Ημιτονοειδούς Διαμόρφωσης Εύρους Παλμών με Αρμονική Σύνθεση (*Harmonic Injection Sinusoidal Pulse Width Modulation, HISPWM*).

5.5 Αντιστροφέας με πηγή συνεχούς ρεύματος

5.5α Εισαγωγή

Στο σχήμα 5.18, παρουσιάζεται το κύκλωμα ισχύος ενός αντιστροφέα με πηγή συνεχούς ρεύματος.



Σχήμα 5.18 Κύκλωμα ισχύος αντιστροφέα με πηγή συνεχούς ρεύματος.

Η αυτεπαγωγή στην είσοδο του αντιστροφέα, πρέπει να έχει αρκετά μεγάλη τιμή ώστε το ρεύμα να διατηρηθεί όσο το δυνατό σταθερό και χωρίς κυμάτωση. Τα έξι θυρίστορ ($T1 \div T6$), αποτελούν τα κύρια διακοπτικά στοιχεία του αντιστροφέα.

Κάθε θυρίστορ άγει 120° . Οι δίοδοι και οι πυκνωτές, αποτελούν το κύκλωμα εξαναγκασμένης μεταγωγής (*forced commutation*) των θυρίστορ.

5.5β Λειτουργία του αντιστροφέα

Το ρεύμα I_d , κυκλοφορεί μέσω της διόδου της φάσης η οποία οδηγεί και η οποία άγει μόνο μετά το τέλος της φόρτισης του πυκνωτή. Το ρεύμα μιας φάσης, προσδιορίζεται από τα ρεύματα των διόδων της αντίστοιχης φάσης και τα οποία έπονται από τα ρεύματα των θυρίστορ της ίδιας φάσης, με μία φασική απόκλιση. Οπότε μπορεί να γραφεί:

$$\begin{aligned} i_A &= i_{D_1} - i_{D_4} \\ i_B &= i_{D_3} - i_{D_6} \\ i_C &= i_{D_5} - i_{D_2} \end{aligned} \quad (5.1)$$

Οι κυματομορφές δίδονται στο σχήμα 5.2.

Για την εξήγηση της διαδικασίας αγωγιμότητας, παίρνουμε για παράδειγμα τη χρονική στιγμή t_0 όπου άγουν τα θυρίστορ T_3 και T_4 . Το ρεύμα μέσω του φορτίου ακολουθεί τη διαδρομή: “+”, T_3 , D_3 , φάση B, φάση A, D_4 , T_4 , “-” και ο πυκνωτής C_3 αρχίζει να φορτίζεται με μία τάση η οποία έχει την πολικότητα του σχήματος 5.2.

Τη χρονική στιγμή t_1 , αρχίζει να άγει το θυρίστορ T_5 . Ο πυκνωτής C_3 εκφορτίζεται στο κύκλωμα T_5 , C_3 , T_3 , εφαρμόζοντας στο θυρίστορ T_3 μια ανάστροφη τάση, η οποία το οδηγεί στη σβέση του και στο θυρίστορ T_5 μια ορθή τάση η οποία το βοηθάει για να ξεκινήσει να άγει. Μέχρι τη σβέση του T_3 , το ρεύμα του φορτίου συνεχίζει να κυκλοφορεί στη συγκεκριμένη διαδρομή. Μετά τη σβέση του T_3 , το ρεύμα I_d , κυκλοφορεί μέσω του κυκλώματος που αποτελείται από το θυρίστορ T_5 σε σειρά με τον ισοδύναμο πυκνωτή $C_3 // (C_1 + C_5)$.

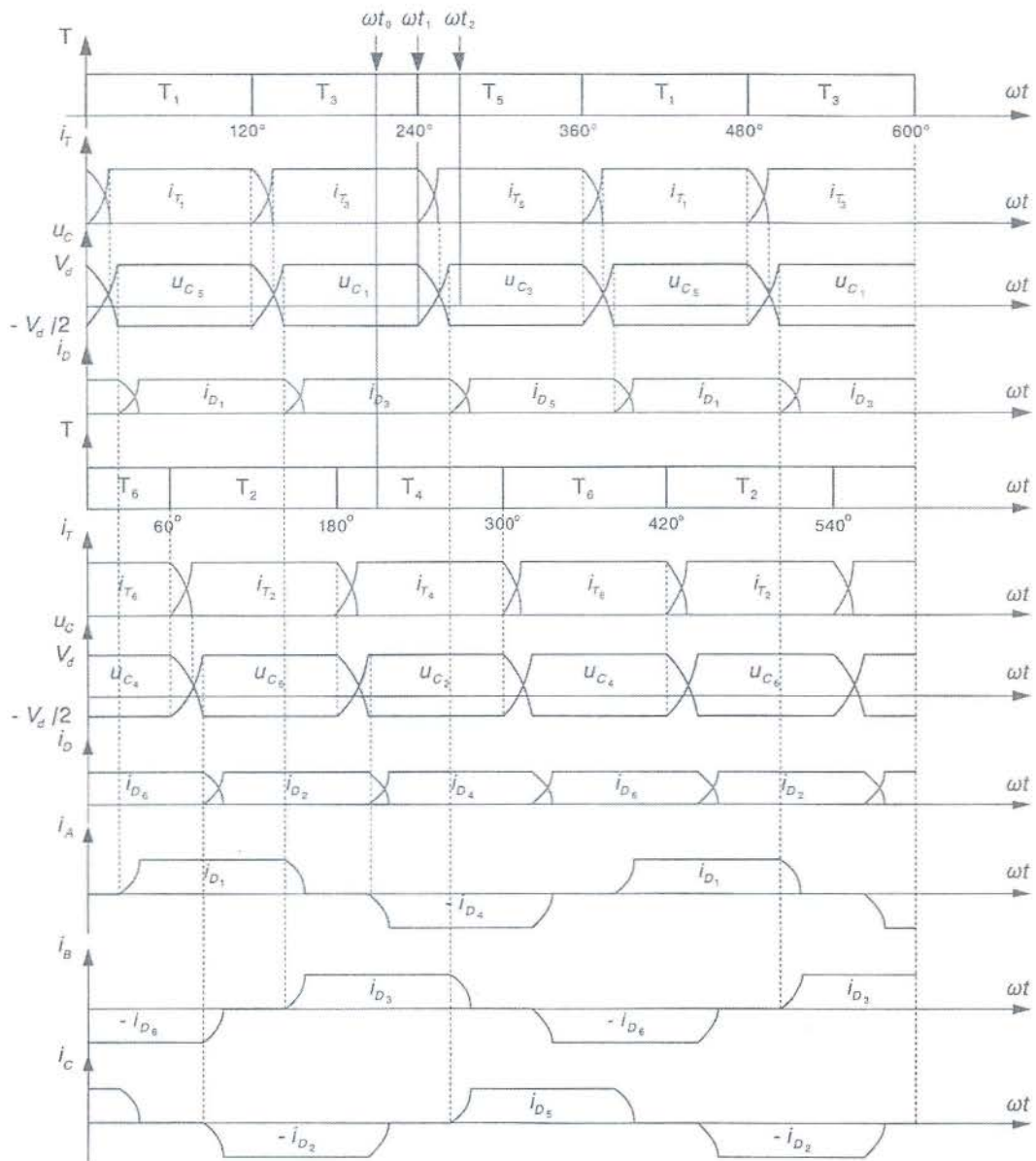
Μέσω του C_3 , περνά ένα ρεύμα ίσο με $3/3 I_d$ και μέσω των C_1 και C_5 , ένα ρεύμα ίσο με $1/3 I_d$. Όταν η τάση στα άκρα του πυκνωτή C_3 , αγγίζει μια τιμή ίση με τη στιγμιαία τιμή της τάσης μεταξύ των φάσεων B και C:

$$u_{C_3} = V_m \sin \varphi \quad (5.2)$$

όπου: V_m η μέγιστη φασική τάση

Τότε η διάδος $D5$ άγει και το ρεύμα στη φάση C αυξάνει από το 0 στο I_d , ενώ στη φάση B μειώνεται μέχρι το 0 .

Ο αντιστροφέας πηγής ρεύματος σε σύγκριση με τον αντιστροφέα πηγής τάσης, παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.



Σχήμα 5.19 Κυματομορφές αντιστροφέα με πηγή συνεχούς ρεύματος

Πλεονεκτήματα

1. Επειδή το ρεύμα εισόδου είναι πάντοτε σταθερό, σε περίπτωση βραχυκυκλώματος κινδυνεύουν να καταστραφούν τα θυρίστορ.
2. Ο αντιστροφέας ρεύματος, για επαγωγικά φορτία παρουσιάζει αρνητική τάση εξόδου και επειδή το ρεύμα εισόδου είναι πάντοτε θετικό δεν χρειάζονται δίοδοι ελεύθερης ροής.
3. Απλούστερο κύκλωμα μετάβασης.
4. Επειδή το ρεύμα εισόδου είναι σταθερό, ο αντιστροφέας δεν παρουσιάζει αιχμές ρεύματος. Κατά συνέπεια, τα ημιαγωγικά στοιχεία υφίστανται μικρότερη καταπόνηση ρεύματος και ο αντιστροφέας παρουσιάζει ελαττωμένη ηλεκτρομαγνητική παρενόχληση.

Μειονεκτήματα

1. Το βασικότερο μειονέκτημα του αντιστροφέα ρεύματος (από θέμα κόστους και όγκου) είναι το επαγωγικό φίλτρο εισόδου για την παραγωγή σταθερού ρεύματος.
2. Για τριφασικούς μετατροπείς, το φορτίο πρέπει να είναι ισορροπημένο. Αν το φορτίο δεν είναι ισορροπημένο, η τάση εισόδου του αντιστροφέα παρουσιάζει ανώτερες αρμονικές, πράγμα το οποίο θα συντελέσει στην αύξηση του μεγέθους της αυτεπαγωγής του φίλτρου εισόδου

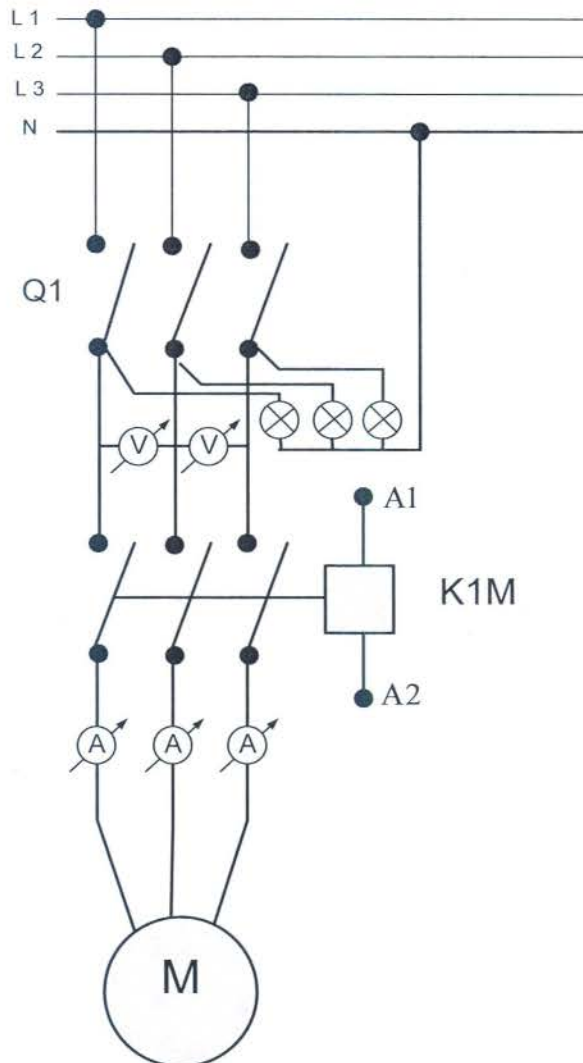
Κεφάλαιο 6:Κυκλώματα χειροκίνητου ελέγχου Αντιστροφής

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι πίνακες χειρισμού και ο ίδιος ο αντιστροφέας. Παρακάτω αναλύονται τόσο το κύκλωμα ισχύος όσο και το βοηθητικό.



Εικόνα 6.1

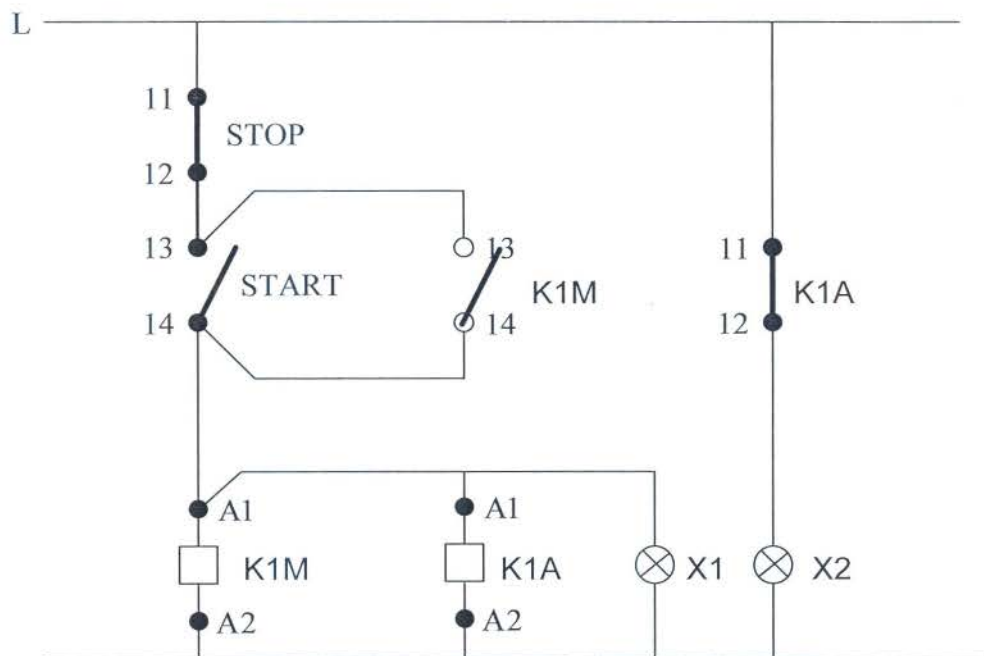
6α.Κύκλωμα Ισχύος



Σχήμα 6.1

Στο παραπάνω σχήμα διακρίνεται ένα τυπικό κύκλωμα ισχύος απλής εκκίνησης τριφασικού μοτέρ με τον ηλεκτρονόμο K1M κύριο ηλεκτρονόμο 3 αμπερόμετρα σε κάθε φάση, 2 βολτόμετρα μεταξύ φάσεων και Q1 γενικό διακόπτη.

6β. Βοηθητικό κύκλωμα

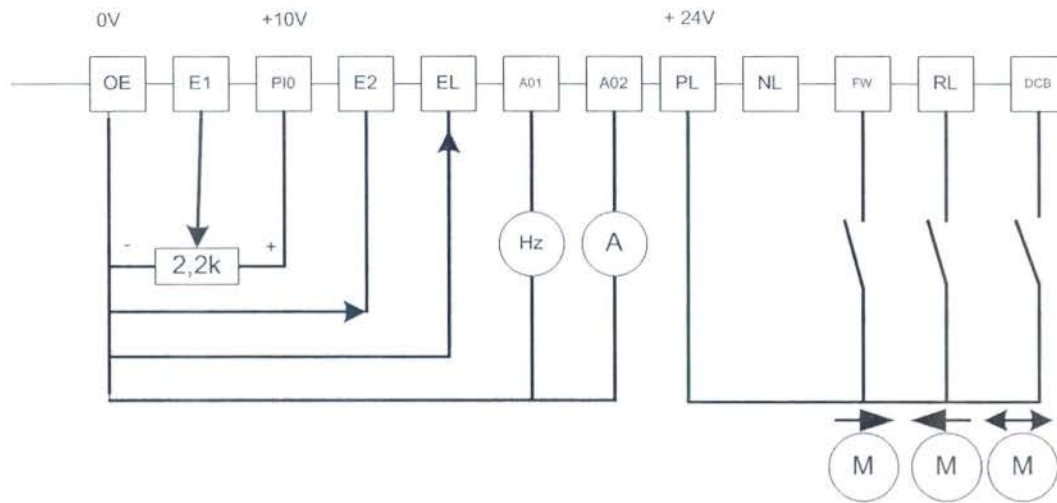


Σχήμα 6.2

Στο κύκλωμα αυτό μπορούμε να δούμε ένα απλό Διακόπτη εκκίνησης START - STOP.

Πιέζοντας το μπουτόν START ενεργοποιούνται οι ηλεκτρονόμοι K1M και K1A με αποτέλεσμα την αλλαγή κατάστασης των κύριων επαφών του ηλεκτρονόμου K1M, δηλαδή την λειτουργία του μοτέρ. (Ενδειξη X1). Με την ενεργοποίηση και του K1A έχουμε το άνοιγμα την κλειστής βοηθητικής επαφής του, με αποτέλεσμα την απενεργοποίηση της λυχνίας X2 (κόκκινο).

6γ. Εσωτερικό κύκλωμα αντιστροφής - Ρύθμιση παραμέτρων



Σχήμα 6.3

Στο σχήμα 6.3 μπορούμε να παρατηρήσουμε το βοηθητικό εσωτερικό κύκλωμα του μετατροπέα μας. Με αυτό, μπορούμε να ελέγξουμε την φορά του κινητήρα, (μέσω του διακόπτη 3 θέσεων, ON/OFF/ON), την ταχύτητα του κινητήρα (μέσω του ποτενσιομέτρου), και την λειτουργία ON/OFF του μετατροπέα) εικόνα 6.1.

Κεφάλαιο 7: Μετρήσεις

Φορτίο = 0 Nm

F(Hz)	n(Rpm)	Vεις(V)	Vγραμ(V)
50	1488	405	260
45	1340	405	238
40	1192	405	210
35	1050	405	190
30	892	406	170
25	646	406	140
20	595	405	111
15	450	406	82
10	296	405	55
05	150	405	30
00	-	405	-

Πίνακας 7.1

Φορτίο $B=20\text{ N}$, Ακτίνα $r=0.20$, Ροπή $T=4\text{ Nm}$

F(Hz)	n(Rpm)	Iin(A)	Vin(V)	P(W)	Vφας(V)	Iγραμ(A)	cosφ
10	295	1.8	400	1200	60	2.4	0.98
20	585	2.35	400	1600	110	2.6	0.98
30	885	2.85	400	1950	160	2.7	0.99
40	1185	3.25	400	2250	210	2.8	0.99
50	1480	4	400	2750	260	2.9	0.99

Πίνακας 7.2

Φορτίο $B=20\text{ N}$, Ακτίνα $r=0.25$, Ροπή $T=5\text{ Nm}$

F(Hz)	n(Rpm)	Iin(A)	Vin(V)	P(W)	Vφας(V)	Iγραμ(A)	cosφ
10	295	1,95	400	1350	60	2,6	0,98
20	585	2,6	400	1700	110	2,7	0,98
30	885	3,2	400	2200	160	2,9	0,99
40	1185	3,65	400	2500	210	3	0,99
50	1480	4,2	400	2900	260	3	0,99

Πίνακας 7.3

Φορτίο $B=20\text{ N}$, Ακτίνα $r=0.30$, Ροπή $T=6\text{ Nm}$

F(Hz)	n(Rpm)	I _{in} (A)	V _{in} (V)	P(W)	V _{φασ} (V)	I _{γραμ} (A)	cosφ
10	295	2	400	1400	60	2,8	0,98
20	585	2,65	400	1800	110	2,65	0,98
30	885	3,43	400	2500	160	3	0,9
40	1185	4,2	400	2800	210	3,2	0,99
50	1480	4,5	400	3100	260	3,2	0,99

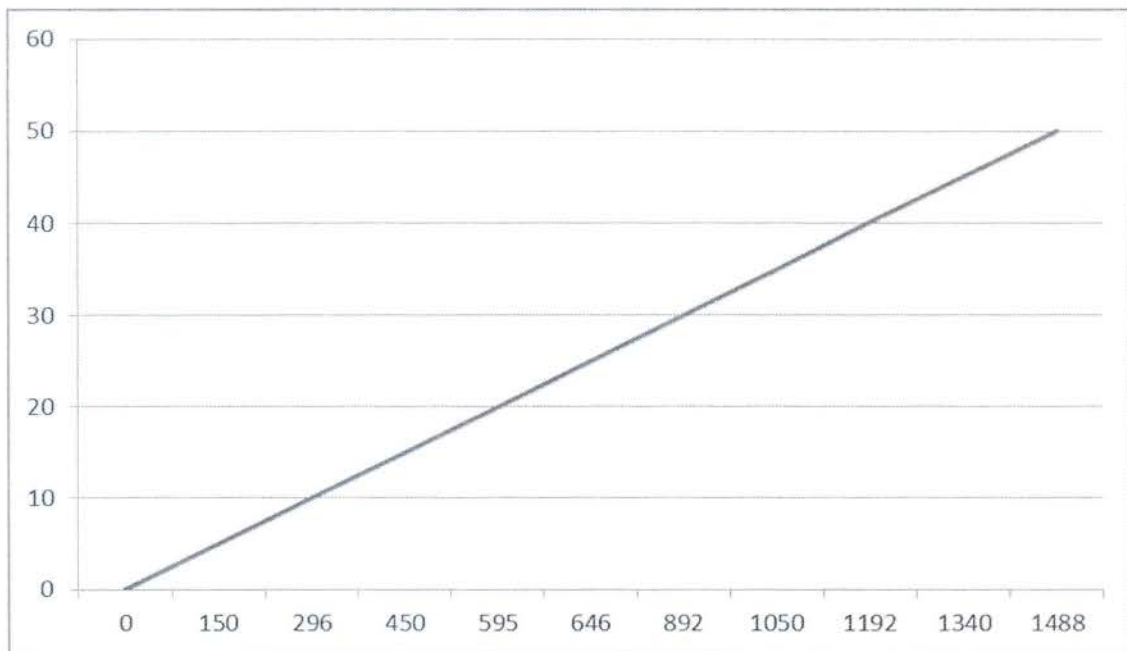
Πίνακας 7.4

Φορτίο $B=20\text{ N}$, Ακτίνα $r=0.35$, Ροπή $T=7\text{ Nm}$

F(Hz)	n(Rpm)	I _{in} (A)	V _{in} (V)	P(W)	V _{φασ} (V)	I _{γραμ} (A)	cosφ
10	295	2,2	400	1500	60	3,0	0,98
20	585	2,85	400	1950	110	3,1	0,98
30	885	3,5	400	2400	160	3,25	0,99
40	1185	4,5	400	3100	210	3,4	0,99
50	1480	5	400	3400	260	3,4	0,99

Πίνακας 7.5

$F = f(n)$,χωρίς Φορτίο



Σχήμα 7.6

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

1. Π. Μαλατέστας, Η. Βυλιώτης. Εργαστηριακές Ασκήσεις Ηλεκτρικών Ισχύος, Εκδόσεις Τζιόλα
2. Π. Μαλατέστας, Α. Μανιάς. Ηλεκτρική κίνηση, 2^η Έκδοση Εκδόσεις Τζιόλα
3. Π. Μαλατέστας. Εργαστηριακές Ασκήσεις Ηλεκτρικών Ηλεκτρικής κίνησης

Διεθνή

1. Stephen Charman. Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC

Διάφορες σημειώσεις μέσω INTERNET