

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

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ :1450

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΤΟΥΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ:
ΝΤΑΜΑΤΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΜΠΕΛΛΟΥ ΓΕΩΡΓΙΑ

ΠΑΤΡΑ

2015

© 2015 - All rights reserved

© 2015, Copyright υπό Νταμάτη Χρήστο

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Προτού ξεκινήσει η παρούσα πτυχιακή θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα κ. Γεωργία Μπέλλου για την παρότρυνση να ασχοληθώ με το παρόν θέμα, για την βοήθεια και το υλικό που μου παρείχε και κυρίως για την αφιέρωση του πολύτιμου χρόνου της ώστε να ολοκληρωθεί η παρούσα πτυχιακή.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Μία από τις πλέον εύχρηστες και «δημοφιλείς» μορφές ενέργειας είναι η ηλεκτρική. Το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας αυτής μετατρέπεται σε μηχανική (κίνηση) με την βοήθεια των ηλεκτρικών κινητήρων οι οποίοι με την εξέλιξη της τεχνολογίας έχουν μπει πλέον στην καθημερινότητα μας. Μας διευκολύνουν σε αρκετές εργασίες και εφαρμογές στον οικιακό τομέα (ψυγεία, αντλίες, φούρνοι, κλιματιστικά, ασανσέρ) και στον τομέα των μεταφορών. Στην βιομηχανία ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων ηλεκτρικών κινητήρων είναι πολλαπλάσιος .

Ως γνωστόν υπάρχουν διάφορα είδη κινητήρων με επικρατέστερους από άποψη πλήθους εφαρμογών τους επαγωγικούς ή ασύγχρονους κινητήρες. Τα βασικά τους μειονεκτήματα όπως η «δυσκολία» στη ρύθμιση στροφών, η κατανάλωση αέργου ισχύος και τα προβλήματα κατά την εκκίνηση έχουν κατά μεγάλο ποσοστό επιλυθεί μετά τη ραγδαία εξέλιξη στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος, καθώς μέσω μετατροπών έγινε δυνατός και πιο αποδοτικός ο έλεγχος της λειτουργίας τους. Έτσι η επικράτησή τους στη βιομηχανία είναι καταλυτική διότι επιπλέον είναι φτηνοί στην κατασκευή/αγορά, παρουσιάζουν «ευκολία» στη σύνδεση στο δίκτυο, μειωμένες απαιτήσεις για συντήρηση και επισκευή, καθώς και αισθητά μειωμένο βάρος. Ωστόσο η χρήση τέτοιων μετατροπών οδηγεί σε αρμονικές ρεύματος άρα σε «μόλυνση» του δικτύου και προκαλούνται ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στο περιβάλλον.

Σε πολλές εφαρμογές οι επαγωγικοί κινητήρες καλούνται να ικανοποιήσουν απαιτήσεις όσον αφορά: ομαλή εκκίνηση, αυξημένη περιοχή ελέγχου, ομαλότητα ελέγχου, οικονομική λειτουργία. Η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία ασχολείται με την μελέτη και την εφαρμογή διαφόρων τρόπων ρύθμισης από την εκκίνηση μέχρι και τον έλεγχο ταχύτητας επαγωγικών ή ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων με την βοήθεια μετατροπών, ώστε να επιτευχθούν οι παραπάνω απαιτήσεις.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σωστή επιλογή του συστήματος έλεγχου λειτουργίας (έναρξη/παύσης και έλεγχος ταχύτητας) ενός κινητήριου συστήματος πέρα από τον καλύτερο έλεγχο της παραγωγικής διαδικασίας, τη μικρότερη φθορά του μηχανολογικού εξοπλισμού το μικρότερο θόρυβο, κλπ, μπορεί να οδηγήσει και σε εξοικονόμηση ενέργειας, ιδιαίτερα σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν φυγοκεντρικό εξοπλισμό (αντλίες ανεμιστήρες, συμπιεστές) σε εφαρμογές επεξεργασίας /μεταφοράς υλικών (π.χ. τόρνοι, ταινίες). Εφαρμογές που χρησιμοποιούν κυρίως ασύγχρονο κινητήρα.

Αρχικά γίνεται αναφορά στη δομή και λειτουργία του ασύγχρονου κινητήρα παραθέτοντας κατασκευαστικά σχέδια, κυκλώματα και χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας.

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στα συστήματα που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των Ασύγχρονων Κινητήρων, ώστε να επιτυγχάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα. Γίνεται περιγραφή της δομής και της λειτουργίας τους.

Παρουσιάζονται αρχικά οι παράμετροι που επηρεάζουν την αποδοτικότητα των κινητήριων συστημάτων και στη συνέχεια γίνεται μία διερεύνηση της συμβολής των παραμέτρων αυτών στην εξοικονόμηση ενέργειας. Ειδικότερα αναπτύσσονται τα τεχνικά κριτήρια επιλογής του κινητήρα και της απόκρισης του συστήματος έλεγχου για την εύρυθμη και οικονομική λειτουργία του κινητήριου συστήματος. Τέλος δίνεται ένα παράδειγμα εξοικονόμησης σε συγκεκριμένη εφαρμογή.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1

Επαγωγικοί κινητήρες

1.1 Εισαγωγή.....	8
1.2 Κατασκευαστικά μέρη.....	8
1.3 Αρχή λειτουργίας	14
1.4. Ηλεκτρομαγνητική δομή και λειτουργία	16
1.4.1. Ισοδυναμο κυκλωμα.....	19
1.4.2 χαρακτηριστικη ροπης-ταχυτητας.....	21
1.5. Υπολογιστικά στοιχεία.....	24
1.5.1. Ισχύς – Απώλειες επαγωγικού.....	24
1.6. Κατάταξη των επαγωγικών κινητήρων.....	26

Κεφάλαιο 2

Έλεγχος επαγωγικού κινητήρα

2.1. Μέθοδοι εκκίνησης.....	30
2.1.1 Απευθείας εκκίνηση (Direct-On-Line (DOL) starting).....	30
2.1.2. Εκκίνηση Αστέρα/Τριγώνου (Y/Δ).....	32
2.1.3. Εκκίνηση με εξωτερικές αντιστάσεις.....	34
2.1.4. Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή.....	37
2.1.5. Εκκίνηση με ηλεκτρονικό ρυθμιστή τάσης (soft starters).....	38
2.1.6 Αντιστροφέας (inverter).....	41
2.2. Μέθοδοι ρύθμισης ταχύτητας	42
2.2.1 Μεταβολή Ολίσθησης.....	42
2.2.1.1 Έλεγχος τάσης τροφοδοσίας	43
Τριφασικός ρυθμιστής εναλλασσόμενης τάσης.....	43
2.2.1.2 Μεταβολή αντίστασης δρομέα.....	44
2.2.2. Μεταβολή Σύγχρονης Ταχύτητας	45
2.2.2.1 Μεταβολή συχνότητας τροφοδοσίας	45

Αντιστροφέας (inverter).....	47
Κυκλομετατροπέας (cycloconverter).....	51
2.2.2.2 Μεταβολή αριθμού πόλων	53
Κεφάλαιο 3	
Εξοικονόμηση ενέργειας	
3.1.Μεθοδολογία	53
3.2. Εξοικονόμηση στα κινητήρια συστήματα.....	55
3.3. Ενεργειακή κλάση κινητήρων.....	576
3.3.1. Προδιαγραφές Διεθνών Οργανισμών.....	576
3.3.2. Ενέργειες Διεθνών Οργανισμών.....	59
3.4 Χαρακτηριστικά κατασκευής /απόδοσης κινητήρα.....	60
3.4.1. Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά.....	60
3.4.2 Επιλογή μεγέθους.....	64
3.5. Ελεγχος – ρύθμιση.....	65
3.5.1. Ελεγχος με μετατροπείς ισχύος	65
3.5.2. Ελεγχος με μετατροπέα συχνότητας.....	67
3.6. Διόρθωση Συντελεστού Ισχύος (ΣΙ)	68
3.6.1 Ο ρόλος του Συντελεστού Ισχύος	68
3.6.2. Διόρθωση Συντελεστού Ισχύος στους επαγωγικούς κινητήρες.....	69
Κεφάλαιο 4	
4.1. Τεχνικές παράμετροι λειτουργίας και απόδοσης.....	71
4.1.1. Επιλογή κινητήρα	71
Βαθμός απόδοσης.....	71
Συντελεστής Ισχύος-PF (Power Factor).	72
Λόγος απωλειών προς ροπή εξόδου (KW/Nm).....	72
Πυκνότητα Ροπής (Nm/m ³ ή Nm/Kgr).....	73
4.1.2. Απόκριση λειτουργίας συστήματος ελέγχου.....	73
Λόγος Μέγιστης στιγμιαίας Ισχύος / Ροπή αδράνειας.....	73
Χρόνος εκκίνησης.....	74

Ακρίβεια ελέγχου ροπής, ταχύτητας και θέσης.....	74
Εύρος ελέγχου της ταχύτητας.....	74
Παλμικές ροπές	75
Επίπεδο θορύβου.....	76
Μέγιστη θερμοκρασία.....	76
4.2. Οικονομικές παράμετροι λειτουργίας και απόδοσης.....	76
4.3 Παράδειγμα εξοικονόμησης ενέργειας και χρημάτων σε μια εφαρμογή.....	77
5. Συμπεράσματα.....	79
6. Βιβλιογραφία.....	80

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΙ Ή ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τα διάφορα είδη ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, ο τριφασικός ασύγχρονος ή επαγωγικός κινητήρας (induction motor) λόγω της απλότητας και του χαμηλού κόστους κατασκευής του, της υψηλής αξιοπιστίας και απόδοσης, της μεγάλης διάρκειας ζωής, χωρίς ιδιαίτερες ανάγκες συντήρησης, και της μεγάλης συγκέντρωσης ισχύος λόγω χαμηλού βάρους και όγκου, είναι ο κινητήρας που χρησιμοποιείται ευρύτατα στις βιομηχανικές εφαρμογές.

Επαγωγικοί κινητήρες με μορφή αντίστοιχη της σημερινής, ήταν εμπορικά διαθέσιμοι από το 1896. Από τότε έως το 1970, οι βελτιώσεις στην ποιότητα των υλικών κατασκευής, στις τεχνικές χύτευσης και στη μόνωση των τυλιγμάτων, επέτρεψε τη δραστική μείωση του μεγέθους και του κόστους κατασκευής των παραπάνω κινητήρων.

Εξαιτίας του μικρού κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας η μείωση του μεγέθους των επαγωγικών κινητήρων δεν συνοδεύτηκε από ουσιαστική βελτίωση του βαθμού απόδοσης, έως την πετρελαϊκή κρίση του 1973. Η οικονομική αυτή κρίση αποτέλεσε την αρχή της ανάπτυξης Ενεργειακά Αποδοτικών Κινητήρων (Energy Efficient Motors –EEM) ή Κινητήρων Υψηλής Απόδοσης (High Energy Efficiency Motors-HEMs) σήμερα. Υπολογίζεται ότι με ένα επιπρόσθετο κόστος 20-30% για την αγορά Ενεργειακά Αποδοτικών Κινητήρων, επιτυγχάνεται αύξηση της απόδοσης κατά 2-6% , οδηγώντας σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας.

Μία πρόσφατη συμφωνία που έγινε ευρέως αποδεκτή στην Ευρώπη καθιερώνει τρία επίπεδα αποδοτικότητας: EEF I , EEF II και EEF III. Κατάλληλη επιλογή κινητήρα μπορεί να γίνει σήμερα με την χρήση βάσεων δεδομένων όπως είναι η EURODEEM ή η MOTOR MASTER PLUS, διαθέσιμων και στο διαδίκτυο.

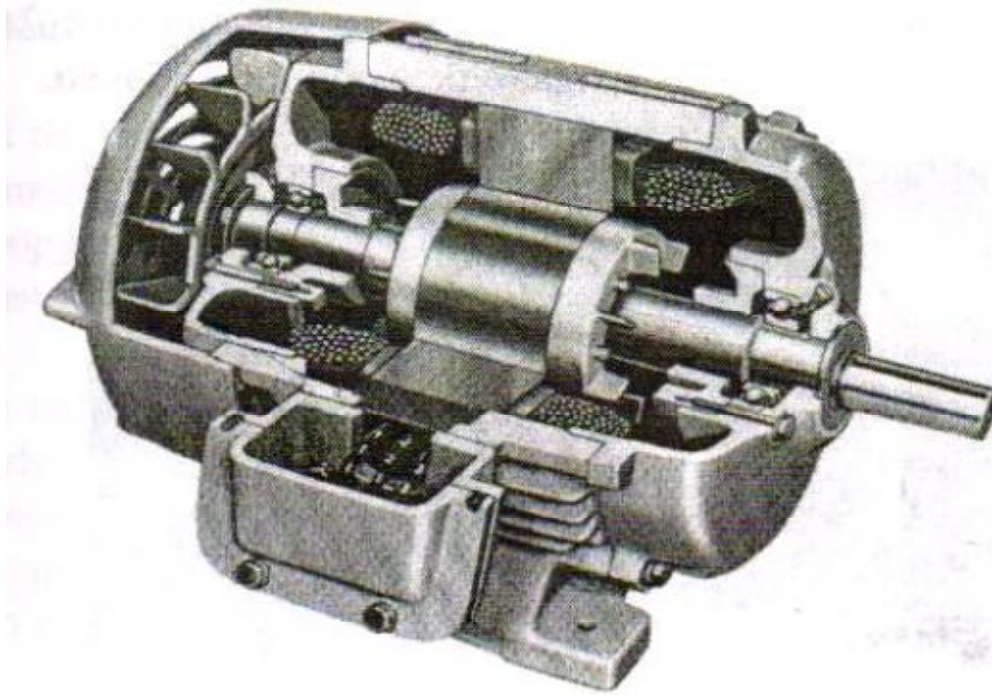
1.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Οι ασύγχρονοι κινητήρες ονομάζονται και επαγωγικοί κινητήρες, ονομασία που προέρχεται από την αρχή λειτουργίας τους.

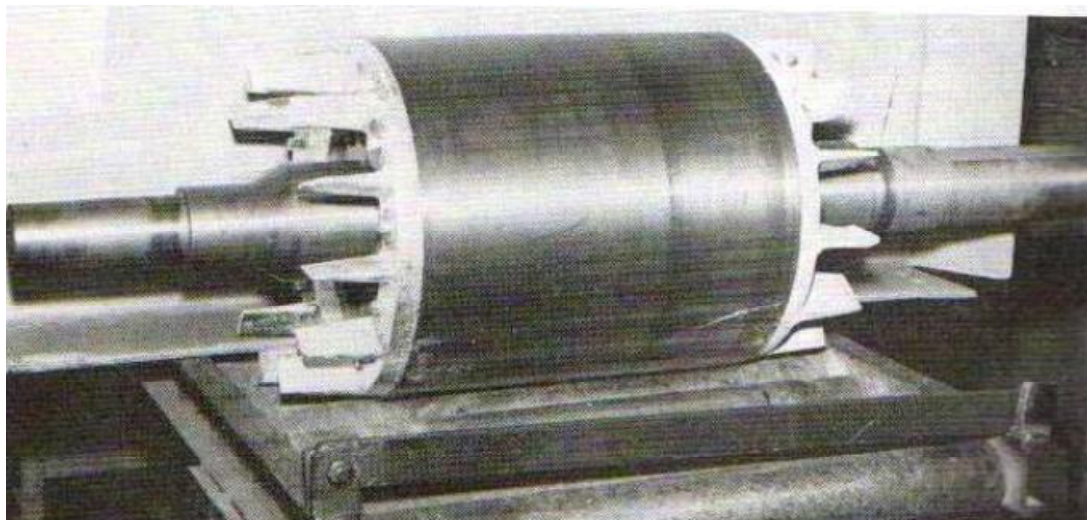
Ο ασύγχρονος κινητήρας αποτελείται από το ακίνητο μέρος του στάτη και από το κινητό μέρος του δρομέα. Ανάλογα με την κατασκευαστική δομή του δρομέα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- βραχυκυκλωμένου δρομέα ή κλωβού (squirrel cage motor-σχ.1.1, 1.2) και
- δακτυλιοφόρου δρομέα (wound rotor - σχ.1.3).

Από τα δύο αυτά είδη, οι κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα είναι οι πλέον διαδεδομένοι.

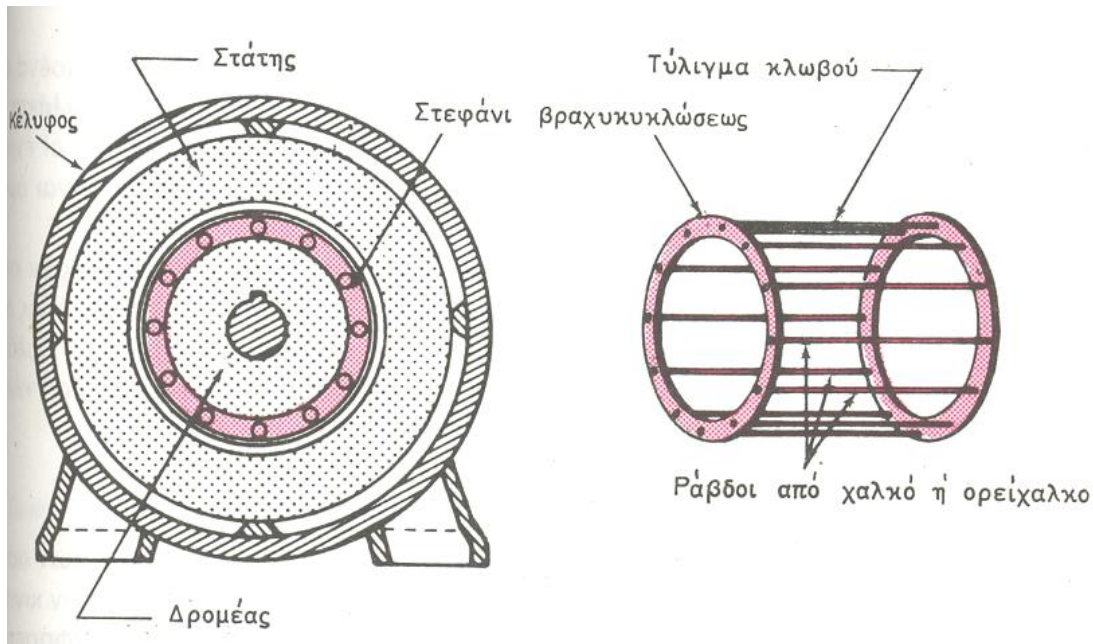


Σχ.1.1α. Κινητήρας με βραχυκυκλωμένο δρομέα



Σχ.1.1β. Ο βραχυκυκλωμένος δρομέας

Όπως φαίνεται και στο σχ. 1.2β, ο δρομέας των επαγωγικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα, αποτελείται από ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους, με οδοντώσεις, οι οποίες σχηματίζουν αυλάκια (ανοικτού ή κλειστού τύπου) κατά μήκος του δρομέα. Στα αυλάκια αυτά τοποθετούνται ράβδοι από χαλκό ή ορείχαλκο, τα άκρα των οποίων συνδέονται μεταξύ τους με δακτυλίους βραχυκύκλωσης (shorting rings). Έτσι, σχηματίζεται το «τύλιγμα κλωβού» του δρομέα όπως φαίνεται αναλυτικά στο σχ. 1.3. που ακολουθεί. Η γεωμετρική μορφή των αυλακώσεων καθορίζει την συμπεριφορά του κινητήρα, δηλαδή την μορφή της χαρακτηριστικής ταχύτητας-ροπής.

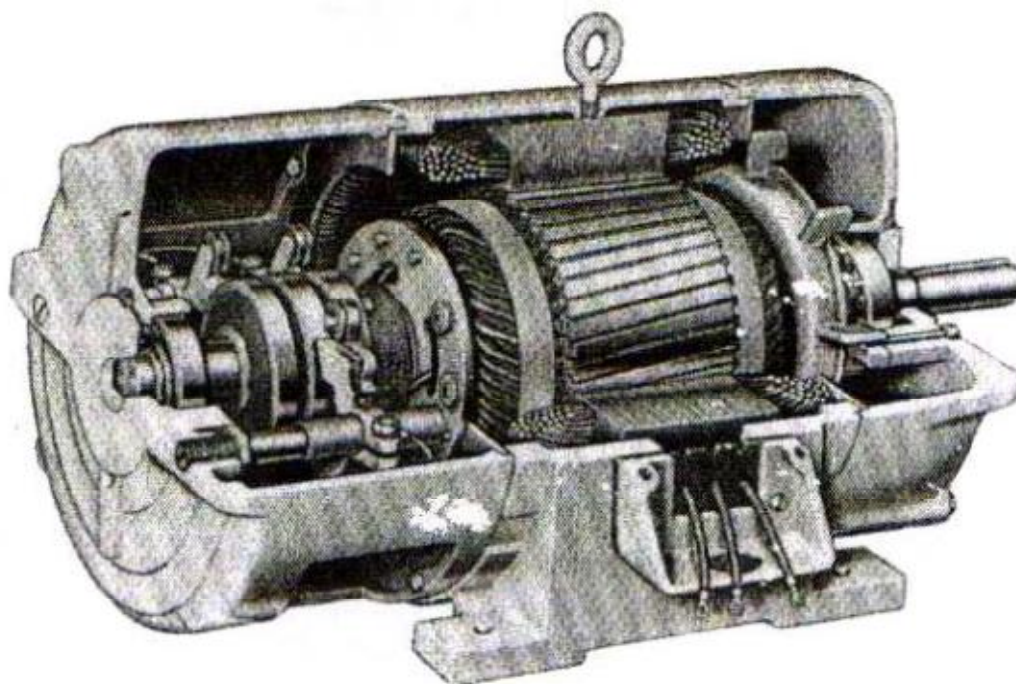


Σχ. 1.2. Σχηματική τομή και κλωβός επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα

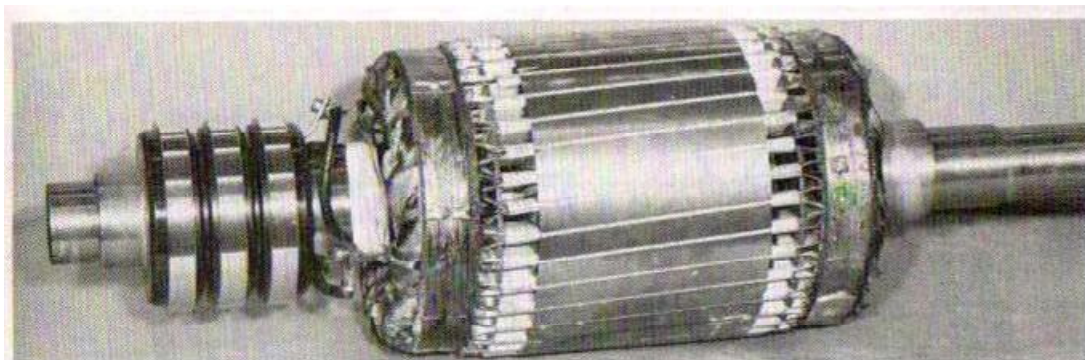
Στους επαγωγικούς κινητήρες μικρής ισχύος, το 'τύλιγμα' κλωβού κατασκευάζεται με χύτευση αλουμινίου στα αυλάκια του δρομέα. Στην περίπτωση αυτή, οι δακτύλιοι βραχυκύκλωσης και τα πτερύγια εξαερισμού χυτεύονται μαζί με τους αγωγούς του κλωβού, οι οποίοι δεν είναι μονωμένοι ως προς το σίδηρο του δρομέα. Τα επαγόμενα ρεύματα κυκλοφορούν κυρίως στον κλωβό, καθώς η αγωγιμότητα του αλουμινίου είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του σιδήρου. Είναι φανερό ότι, ο δρομέας του επαγωγικού κινητήρα με βραχυκυκλωμένο δρομέα, δεν συνδέεται ηλεκτρικά με καμιά πηγή ή άλλο τύλιγμα. Στο γεγονός αυτό οφείλεται η απλή κατασκευή και η ευρεία χρήση του επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα.

Σε αντίθεση με τον βραχυκυκλωμένο δρομέα ο δακτυλιοφόρος δρομέας αποτελείται από πολλά μαγνητικά ελάσματα με ημίκλειστες οδοντώσεις και αυλάκια μέσα στα οποία τοποθετείται το τριφασικό τύλιγμα του δρομέα με αριθμό πόλων ίδιο με εκείνον του τυλιγματος του στάτη και συνδεσμολογία των τριών τυλιγμάτων συνήθως σε αστέρα.

Τα ελεύθερα άκρα των τριών τυλιγμάτων του δρομέα καταλήγουν σε τρεις δακτυλίους σταθερά στερεωμένους στον άξονα του και μονωμένους μεταξύ τους αλλά και με τον ίδιο τον άξονα όπως φαίνεται στο αριστερό μέρος του σχήματος 1.3.β όπου μπορούμε να δούμε ξεκάθαρα τους μονωμένους δακτυλίους.



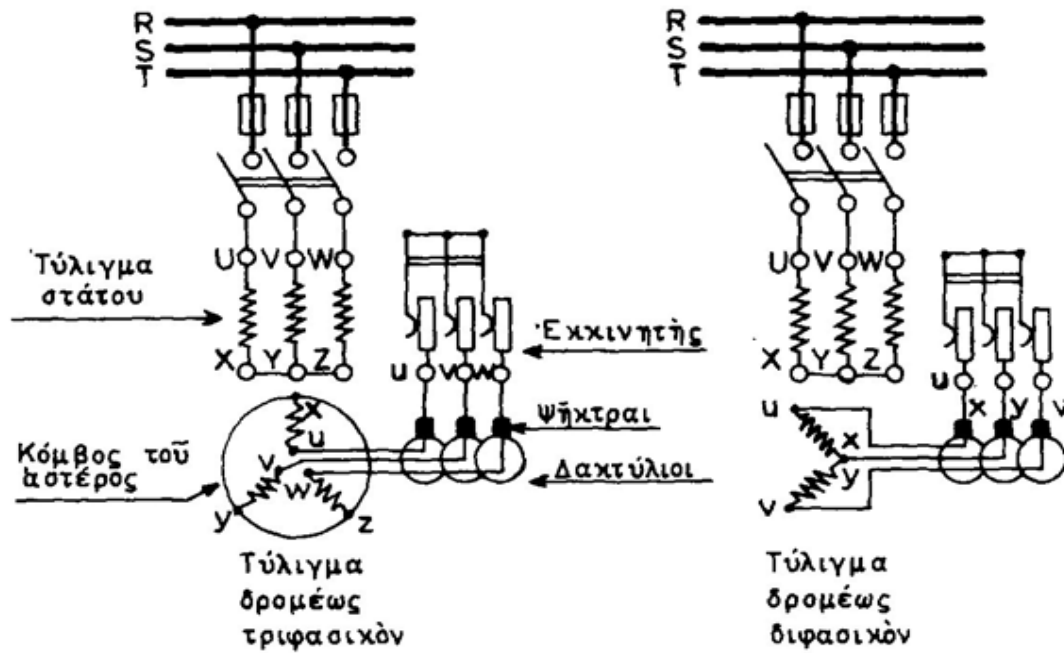
Σχ.1.3α. Κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα



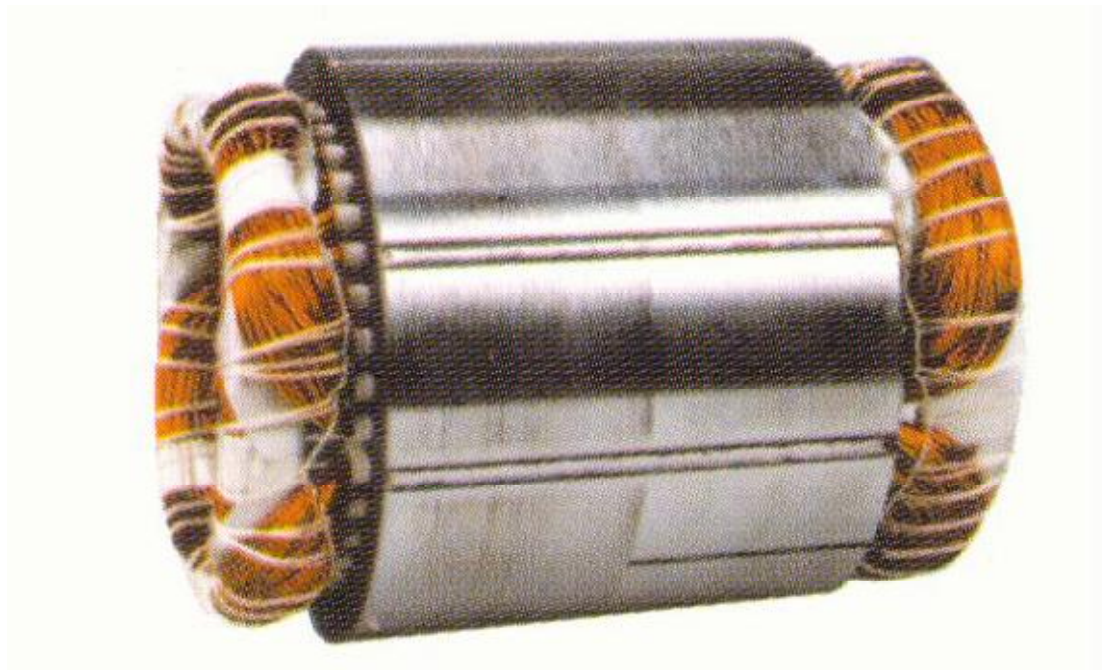
Σχ.1.3β. Ο δακτυλιοφόρος δρομέας

Στους δακτυλίους του δρομέα εφάπτονται οι ψήκτρες των οποίων οι θήκες είναι σταθερά στερεωμένες στον στάτη της μηχανής. Έτσι μέσω των ψηκτρών και των δακτυλίων κάθε φάση του τυλίγματος του δρομέα συνδέεται σε σειρά με μία εξωτερική τριφασική αντίσταση-εκκινήτη, όπως φαίνεται στο 1.4 σχήμα, η οποία δίνει τη δυνατότητα ρύθμισης της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα.

Αντίθετα από το δρομέα, ο στάτης των ασύγχρονων καθώς και όλων των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος έχει την ίδια κατασκευαστική δομή. Χονδρικά είναι μια κυλινδρική δομή από πυριτιούχα ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους για να ελαχιστοποιήσουμε τις απώλειες σιδήρου που προκαλούνται από τα δινορεύματα. Στην επιφάνεια υπάρχουν αυλακώσεις (ανοικτές, ημίκλειστες) μέσα στις οποίες τοποθετούνται τα τυλίγματα των φάσεων του στάτη (Σχήμα 1.5) με τα έξι άκρα τους να καταλήγουν στο ακροκιβώτιο της μηχανής



Σχ. 1.4. Συνδεσμολογία ασύγχρονου κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα με τριφασική εξωτερική αντίσταση



Σχήμα 1.5 Τα τυλίγματα πάνω στο στάτη.

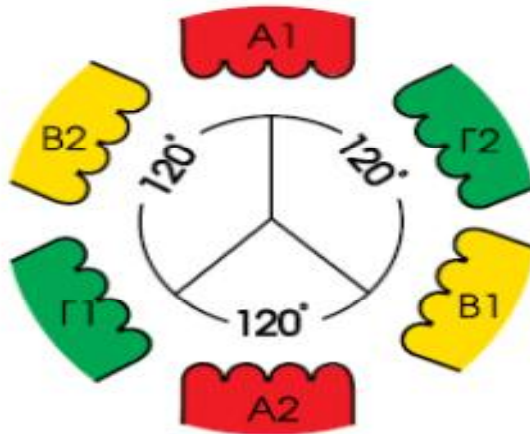
Στον τριφασικό επαγωγικό κινητήρα με ένα ζεύγος πόλων ($p=1$), τα τυλίγματα των τριών φάσεων (a, b, c) του στάτη είναι τοποθετημένα με γωνία (χωρική) 120° το ένα από το άλλο (Σχ. 1.5), έτσι ώστε όταν τροφοδοτηθούν από μια τριφασική παροχή με γωνία (χρονική) 120° μεταξύ των τάσεων, θα δημιουργηθεί ένα σύστημα τριών ρευμάτων επίσης όμοια χρονικά μετατοπισμένων μεταξύ τους. Συνέπεια των ρευμάτων αυτών είναι η παραγωγή ενός συνιστάμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη της μορφής $B_s = B_m[\varphi(x,t)]$ το οποίο έχει σταθερό πλάτος B και φάση $\varphi(x,t)$ δηλαδή συνάρτηση της θέσης x του σημείου τη χρονική στιγμή t .

Το μαγνητικό αυτό πεδίο μεταδίδεται στο χώρο και στο χρόνο με σταθερή ταχύτητα $n_s = f/p = f/1$ (rps) όπου f (Hz) η συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας και p ο αριθμός ζευγών πόλων της περιέλιξης.

Αν χωρικά η κατανομή των τριών τυλιγμάτων του στάτη καλύπτει μία υποδιαίρεση της περιφέρειας του στάτη πχ. το $1/2$, ή το $1/3$ κλπ, δημιουργούνται αντίστοιχα $p=2$ ή $p=3$ κλπ ζεύγη πόλων. Η ταχύτητα περιστροφής του πεδίου, γνωστή και σαν σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής, εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα f του ρεύματος τροφοδοσίας και από το πλήθος p των ζευγών πόλων της περιέλιξης του στάτη και είναι:

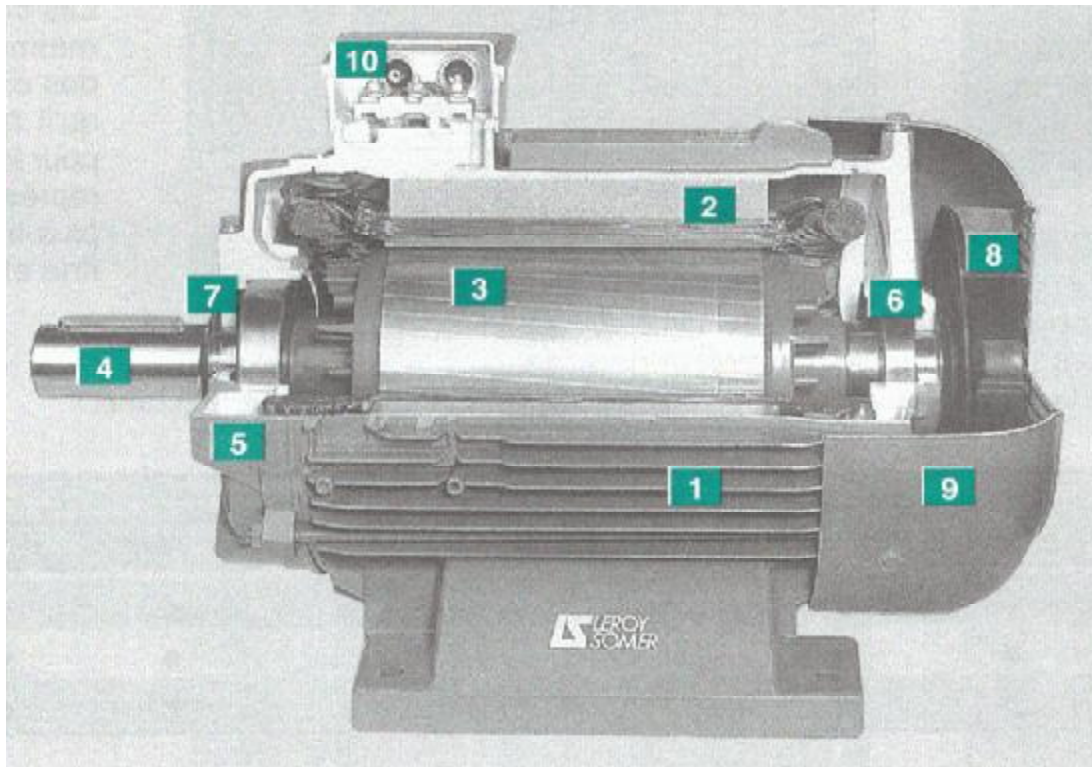
$$n_s = f/p \text{ (rps) ή}$$

$$n_s = 60 \cdot f/p \text{ (rpm)}$$



Σχ. 1.6 Σχηματική παράσταση τριφασικού τυλιγματος στάτη με $p=1$

Εκτός από τον δρομέα και τον στάτη που καλούνται και **ενεργά μέρη**, ένας κινητήρας διαθέτει και άλλα τα καλούμενα **μη ενεργά μέρη**, όπως είναι ο άξονας, το περίβλημα, τα ρουλεμάν, τα πλέγματα, η φτερωτή ψύξης και το κιβώτιο σύνδεσης (ακροκιβώτιο), τα οποία φαίνονται και στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχ. 1.7 Τομή Ασύγχρονου Κινητήρα βραχυκυκλωμένου Δρομέα. Διακρίνονται τα μέρη:

- 1 Διαμόρφωση «πτερυγίων» ψύξης του στάτη,
- 2 Ελάσματα του στάτη και τύλιγμα,
- 3 Δρομέας βραχυκυκλωμένος με διαμορφωμένα πτερύγια ψύξης
- 4 Άξονας,
- 5,9 Κέλυφος,
- 6,7 Ρουλεμάν,
- 8 Ανεμιστήρας,
- 10 Κιβώτιο ηλεκτρικών συνδέσεων (ακροκιβώτιο)

1.3 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

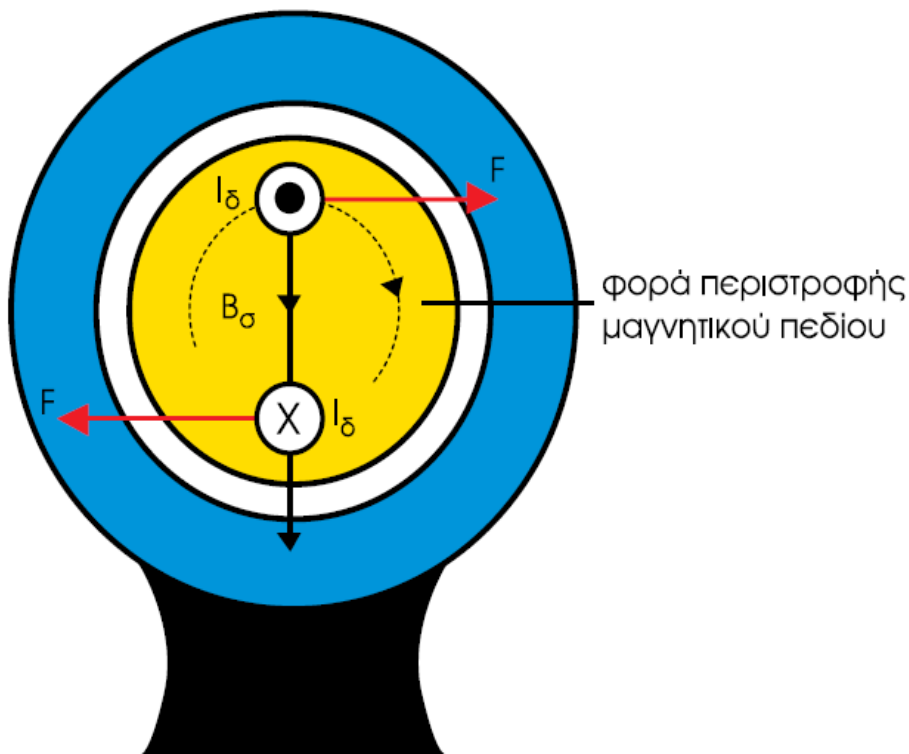
Η λειτουργία των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων βασίζεται στο φαινόμενο της ανάπτυξης ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΗΕΔ) εξ' επαγωγής στους αγωγούς του δρομέα, κάτι ανάλογο με τον μετασχηματιστή. Ο δρομέας δηλαδή δεν απαιτείται να τροφοδοτηθεί από κάποια εξωτερική πηγή ενέργειας. Από το φαινόμενο αυτό της επαγωγής προκύπτει και το όνομα επαγωγικοί κινητήρες. Οι μηχανές με τροφοδότηση μόνο στο στάτη ονομάζονται απλής διέγερσης (singly excited). Αντίστοιχα, οι μηχανές που τροφοδοτούνται από εξωτερικές πηγές τόσο στο στάτη όσο και στο δρομέα, όπως για παράδειγμα οι σύγχρονες και οι μηχανές συνεχούς ρεύματος, ονομάζονται διπλής διέγερσης (doubly excited).

Όταν το τριφασικό τύλιγμα του στάτη τροφοδοτηθεί από αντίστοιχη τριφασική παροχή του δικτύου θα δημιουργηθεί στο διάκενο του κινητήρα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο B_s το οποίο περιστρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα n_s . Μέσα στο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο βρίσκονται οι αγωγοί του δρομέα, στα άκρα των οποίων αναπτύσσεται η εξ επαγωγής εναλλασσόμενη τάση. Η συχνότητα της επαγόμενης τάσης εξαρτάται από το ρυθμό

μεταβολής ή την ταχύτητα μεταβολής του πεδίου του στάτη το οποίο κινείται ως προς το δρομέα με την ταχύτητα $(n_s - n_r) \cdot n_s$. Η επαγόμενη τάση στο δρομέα λόγω της ηλεκτρικής συνέχειας των τυλιγμάτων (μέσω των δακτυλίων βραχυκύκλωσης ή μέσω των εξωτερικών αντιστάσεων), δημιουργεί ισχυρά εναλλασσόμενα ρεύματα με μεταβαλλόμενη επίσης συχνότητα $(n_s - n_r) \cdot f_s$ όπου f_s η συχνότητα της τάσης του στάτη.

Επί των αγωγών του δρομέα που βρίσκονται στο πεδίο και διαρρέονται από ρεύμα ασκείται ζεύγος δυνάμεων (Laplace) που τείνει να περιστρέψει τον δρομέα κατά την φορά περιστροφής του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου όπως φαίνεται στο σχήμα 1.8 που ακολουθεί.

Υπό την επίδραση της ροπής των παραπάνω δυνάμεων ο ασύγχρονος κινητήρας εκκινεί και επιταχύνεται, μέχρις ότου φθάσει σε μια ταχύτητα n_r που είναι πάντα μικρότερη από την σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής n_s του μαγνητικού πεδίου. Ο ρυθμός μεταβολής του πεδίου του στάτη όπως αυτό φαίνεται από το δρομέα $(n_s - n_r)$, μειώνεται χωρίς όμως να μηδενίζεται διότι τότε σημαίνει ότι δεν θα επαγεται τάση στο δρομέα οπότε δεν θα υπάρχουν ρεύματα και συνεπώς ζεύγος δυνάμεων (Σχ. 1.8 $F = (L \times B_s) I_\delta$)



Σχ. 1.8 . Σχηματική παράσταση των δυνάμεων που ασκούνται στους αγωγούς του δρομέα.

Όπου:

F : Μαγνητική δύναμη Laplace (N)

B_s : Μαγνητική επαγωγή στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου (T)

I_δ : Ρεύμα δρομέα από επαγωγή (A)

L : Μήκος αγωγού δρομέα (m)

Η σχετική ταχύτητα μεταξύ του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη n_s και της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα n_r , ονομάζεται ολίσθηση (slip) και είναι $s = n_s - n_r$ (rpm)

Η ολίσθηση εκφράζει για ένα παρατηρητή που βρίσκεται στο διάκενο και στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, πόσο καθυστερεί, «ολισθαίνει προς τα πίσω» ο δρομέας. Από την

παραπάνω εξίσωση προκύπτει επίσης η σχέση της ταχύτητας του κινητήρα, σαν συνάρτηση της σύγχρονης ταχύτητας και της ολίσθησης:

$$n_r = (1 - s) \cdot n_s$$

Η ονομασία ασύγχρονος κινητήρας, προέρχεται από τη διαφορά της ταχύτητας του δρομέα σε σχέση με τη σύγχρονη ταχύτητα, η οποία είναι ανάλογη με τη ροπή του φορτίου. Η ολίσθηση συνήθως εκφράζεται σαν ποσοστό της σύγχρονης ταχύτητας

$$S\% = (n_s - n_r) \cdot 100 / n_s (\%)$$

Όταν ο κινητήρας είναι ακίνητος, η ολίσθηση είναι ίση με τη μονάδα ($s = 1$). Αν ο δρομέας στρέφονταν με τη σύγχρονη ταχύτητα, η ολίσθηση θα ήταν μηδέν ($s = 0$). Πρακτικά στους κινητήρες η ολίσθηση μεταβάλλεται μεταξύ μερικών δεκάτων 0,5% έως και 10%. Η συχνότητα των τάσεων και των ρευμάτων που αναπτύσσονται στον δρομέα f_r , εξαρτάται επίσης από την ολίσθηση s και είναι :

$$f_r = s \cdot f_s, \text{ όπου } f_s, \text{ η συχνότητα των ηλεκτρικών μεγεθών του στάτη.}$$

1.4. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Ο στάτης του επαγωγικού κινητήρα έχει ένα συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα, το οποίο ανά φάση παρουσιάζει ωμική αντίσταση R_s , αυτεπαγωγή L_{st} και ισοδύναμο αριθμό σπειρών w_s όπως φαίνεται και στο Σχ. 1.11 που ακολουθεί. Όταν τα τυλίγματα τροφοδοτηθούν από μια συμμετρική τριφασική πηγή με τάση $u(t)$ συχνότητας $\omega_s = 2\pi f_s$, δημιουργείται η συνολική ροή του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη Φ_s η οποία διασχίζει ακτινικά το διάκενο διέρχεται από το δρομέα με τον οποίο διασυνδέεται μαγνητικά. Ένα μέρος βέβαια των μαγνητικών γραμμών δεν διέρχεται από το δρομέα (ροή σκέδασης). Έτσι η ολική παραγόμενη ροή Φ_s του στάτη είναι:

$$\Phi_s = \Phi_{sr} + \Phi_{ls}$$

όπου

Φ_{sr} η αμοιβαία ροή (mutual flux) που δια-συνδέει στάτη-δρομέα

Φ_{ls} η ροή σκέδασης (leakage flux) των σπειρών του στάτη.

Το μέγεθος της ροής σκέδασης εξαρτάται από τη σύζευξη μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα. Η σύζευξη των τυλιγμάτων στις ηλεκτρικές μηχανές είναι πολύ μικρότερη από εκείνη στους μετασχηματιστές, εξαιτίας του διακένου αέρα.

Στον κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα το τύλιγμα του δρομέα έχει τη μορφή πλήρους τριφασικού τυλίγματος με τον ίδιο αριθμό πόλων μ' εκείνον του στάτη. Στον κινητήρα με βραχυκυκλωμένο κλωβό το κύκλωμα του δρομέα αποτελείται από ράβδους, τα άκρα των οποίων διασυνδέονται με δακτυλίους βραχυκύκλωσης. Το κύκλωμα δρομέα που δημιουργείται μπορεί να θεωρηθεί αντίστοιχο με ένα πλήρες συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα, με αριθμό πόλων ίσο μ' εκείνον του στάτη.

Καθώς το στρεφόμενο με ταχύτητα n_s μαγνητικό πεδίο του στάτη (συνιστώσα Φ_{sr}) διέρχεται από τους αγωγούς των τυλιγμάτων του δρομέα, επάγει σε αυτούς συμμετρικές τριφασικές τάσεις E_r . Το πλάτος και η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα του δρομέα ως προς το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη και είναι $f_r = (n_s - n_r) \cdot f_s$. Το τύλιγμα του δρομέα έχει ωμική αντίσταση R_r , αυτεπαγωγή L_{rot} και ισοδύναμο αριθμό σπειρών w_r ανά φάση. Εξαιτίας της επαγωγικής φύσης του βραχυκυκλωμένου τυλίγματος του δρομέα, το ρεύμα στο δρομέα I_r καθυστερεί ως προς την επαγόμενη τάση E_r κατά μία γωνία θ_r που είναι η γωνία του συντελεστή ισχύος του τυλίγματος και η οποία μεταβάλλεται με την ολίσθηση δηλ. με τη φόρτιση του κινητήρα. Για παράδειγμα όταν ο κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο στον άξονά του, η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων είναι μικρή, η αντίδραση του δρομέα είναι πολύ μικρή σε σχέση με την ωμική του αντίσταση και η διαφορά φάσης θ_r μεταξύ I_r και E_r είναι πολύ μικρή.

Το τριφασικό ρεύμα που ρέει στο δρομέα, σαν συνέπεια των επαγόμενων τάσεων, προκαλεί την ανάπτυξη του στρεφόμενου πεδίου του δρομέα B_{rs} . Το ρεύμα του δρομέα I_r και το πεδίο που αυτό αναπτύσσει B_{rs} , μεταβάλλονται ανάλογα με την E_r .

Η ροή του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του δρομέα Φ_{rs} η οποία διασχίζει ακτινικά το διάκενο διέρχεται από το στάτη με τον οποίο διασυνδέεται μαγνητικά και επάγει την Α-ΗΕΔ E_1 , ενώ ένα μέρος των μαγνητικών γραμμών δεν συμμετέχει (ροή σκέδασης). Ετσι η ολική παραγόμενη ροή Φ_r του δρομέα είναι:

$$\Phi_r = \Phi_{rs} + \Phi_{lr}$$

όπου

Φ_{rs} η αμοιβαία ροή (mutual flux) που δια-συνδέει δρομέα-στάτη

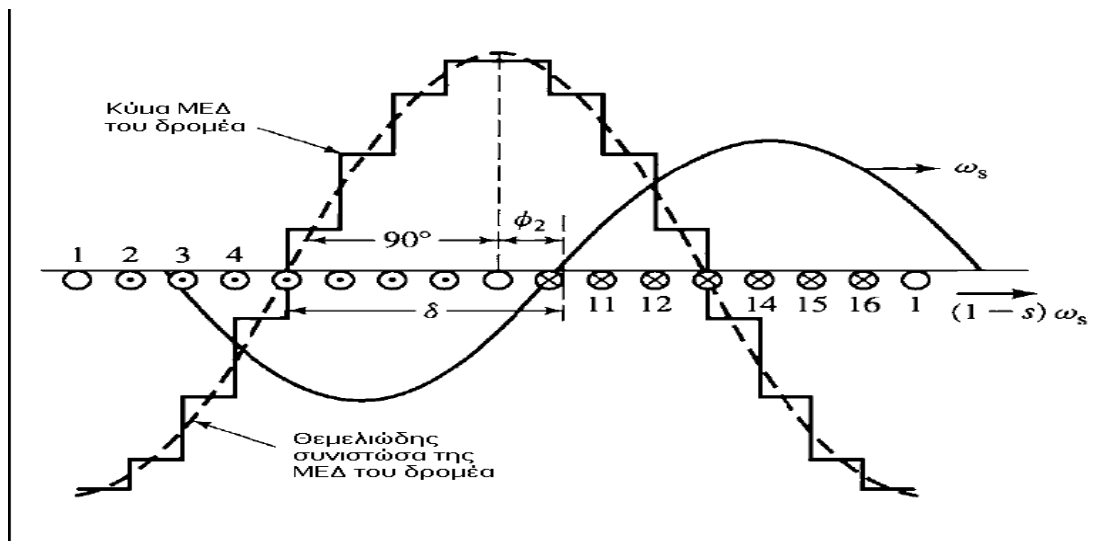
Φ_{lr} η ροή σκέδασης (leakage flux) των σπειρών του δρομέα

Η ολική ροή στο διάκενο $\Phi_m = \Phi_{sr} + \Phi_{rs}$ είναι ίση με το διανυσματικό άθροισμα των δύο αμοιβαία κοινών ροών μεταξύ στάτη δρομέα.

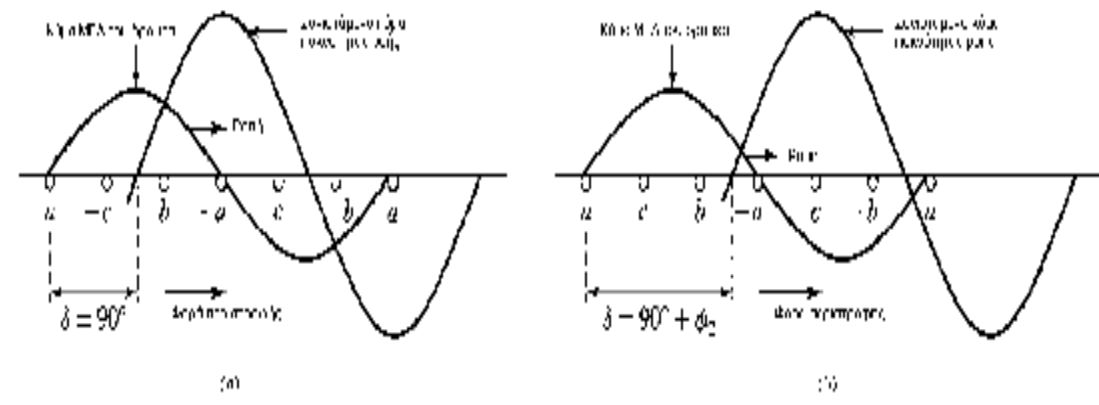
Το μαγνητικό πεδίο του στάτη B_s περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα n_s ως προς το στάτη και με ταχύτητα sn_s ως προς το δρομέα. Το ολικό μαγνητικό πεδίο στο διάκενο του κινητήρα B_m , είναι ίσο με το διανυσματικό άθροισμα των μαγνητικών πεδίων του στάτη B_{sr} και του δρομέα B_{rs} όπως φαίνεται και στο Σχ. 1.11 που ακολουθεί.

$$B_m = B_{sr} + B_{rs}$$

και περιστρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα n_s . Το μαγνητικό πεδίο του δρομέα B_{rs} σχηματίζει μία σταθερή γωνία με το συνιστάμενο πεδίο B_m που υπερβαίνει τη γωνία των 90 μοιρών κατά τη γωνία του συντελεστού ισχύος θ_r ή ϕ_2 του τυλίγματος του δρομέα όπως φαίνεται και στα σχ. 1.9., 1.10 και 1.11 που ακολουθούν.

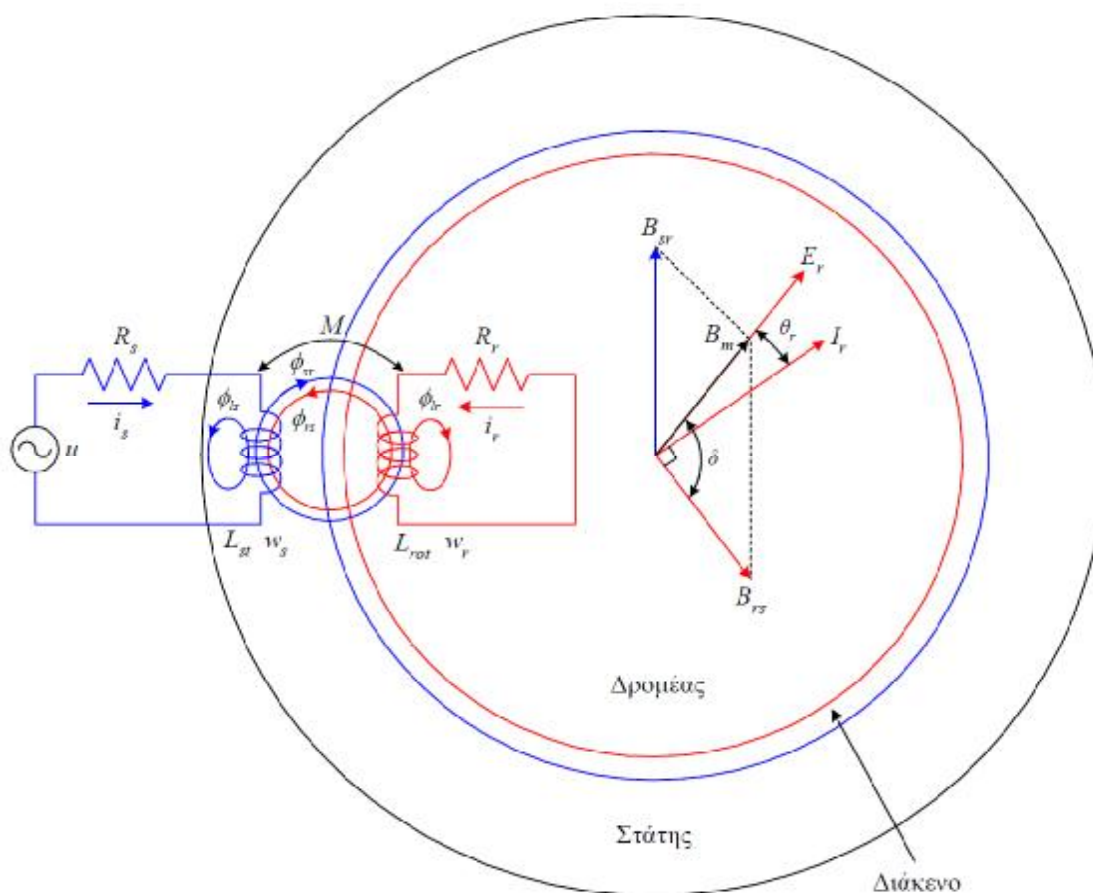


Σχ. 1.9. Ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου σε δρομέα κλωβού



Σχ. 1.10. Συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο και πεδίο δρομέα με (α) $\cos\phi_2=1$ και (β) $\cos\phi_2\neq 1$

Στο Σχήμα 1.11 εικονίζεται η μορφή του ηλεκτρομαγνητικού κυκλώματος για μία φάση των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα και το αντίστοιχο συνολικό μαγνητικό πεδίο δηλαδή το διανυσματικό άθροισμα των μαγνητικών πεδίων. Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη B_{sr} παράγεται από το ρεύμα I_s . Το ολικό μαγνητικό πεδίο B_m είναι ανάλογο με το ρεύμα μαγνήτισης I_m στο οποίο αντιστοιχίζεται η ισοδύναμη αντίσταση μαγνήτισης X_m ($X_m=\omega_s M w_s/w_r$) και εξαρτάται από την εσωτερική τάση E_1 , όταν ο κινητήρας είναι ακόρεστος. Επειδή η πτώση τάσης στη σύνθετη αντίσταση του στάτη R_s+jX_s είναι πολύ μικρή, η τάση E_1 είναι σταθερή και περίπου ίση με την τάση τροφοδοσίας V .



Σχ. 1.11 Ηλεκτρομαγνητική δομή και λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα

1.4.1. Ισοδύναμο κύκλωμα

Η λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα στηρίζεται στην ανάπτυξη τάσεων εξ επαγωγής στο τριφασικό τύλιγμα του δρομέα. Επομένως, η αρχή λειτουργίας του επαγωγικού κινητήρα είναι ίδια με αυτή του μετασχηματιστή. Οι διαφορές που υπάρχουν ανάμεσα στα δύο ισοδύναμα οφείλονται μόνο στο γεγονός ότι το δευτερεύον τύλιγμα (ο δρομέας) περιστρέφεται και παράγει μηχανική ροπή.

Για το λόγο αυτό ο επαγωγικός κινητήρας ονομάζεται και στρεφόμενος μετασχηματιστής.

Από την ηλεκτρομαγνητική ανάλυση ανά φάση που φαίνεται και στο σχ. 1.11 προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$u = R_s \cdot i_s + L_{st} \frac{di_s}{dt} - M \frac{di_r}{dt}$$

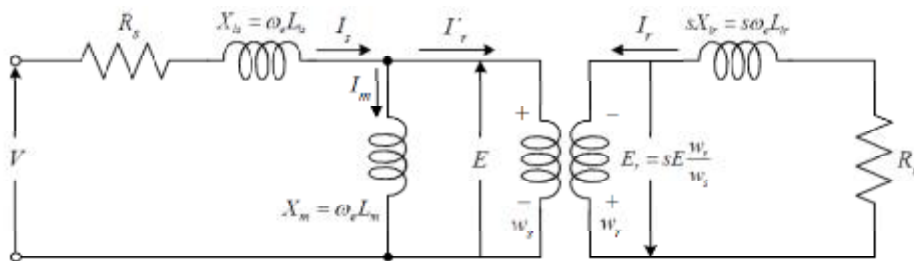
$$0 = R_r \cdot i_r + L_{rot} \frac{di_r}{dt} - M \frac{di_s}{dt}$$

όπου M είναι ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα. Αν θεωρήσουμε ημιτονοειδή μεγέθη και μόνιμη κατάσταση ισορροπίας, οι παραπάνω εξισώσεις γίνονται:

$$V = R_s \cdot I_s + j\omega_s \cdot L_{st} \cdot I_s - j\omega_s \cdot M \cdot I_r \quad (1.1)$$

$$0 = R_r \cdot I_r + j s \omega_s \cdot L_{rot} \cdot I_r - j s \omega_s \cdot M \cdot I_s \quad (1.2)$$

Στο παρακάτω σχήμα εικονίζεται το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα τροποποιημένο ως προς το δρομέα, σε σχέση με αυτό του μετασχηματιστή.



Σχ. 1.12 Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης του επαγωγικού κινητήρα, ανάλογο με το μοντέλο του μετασχηματιστή ($\omega_e = \omega_s$)

Στον κινητήρα, σε αντίθεση με τον μετασχηματιστή, η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων και των ρευμάτων στο δρομέα f_r δεν είναι σταθερή ούτε ίση με τη συχνότητα f_s του πρωτεύοντος (στάτη), αλλά εξαρτάται από την ολίσθηση, και ορίζεται από τη σχέση:

$$f_r = s \cdot f_s = (n_s - n_r) \cdot f_s$$

Όταν βέβαια ο κινητήρας είναι ακίνητος, η συχνότητα του δρομέα είναι ίση με τη συχνότητα του στάτη. Καθώς η ταχύτητα τείνει προς τη σύγχρονη, η συχνότητα των τάσεων και των ρευμάτων στο δρομέα τείνει στο μηδέν.

Εκτός από τη συχνότητα των επαγόμενων τάσεων και το πλάτος των τάσεων μεταβάλλεται ανάλογα με την ολίσθηση. Έτσι, η επαγόμενη τάση είναι μέγιστη κατά την εκκίνηση του κινητήρα, όπου $n_r = 0$ ή $s = 1$ και ελάχιστη όταν η ταχύτητα τείνει προς τη σύγχρονη ταχύτητα του στρεφόμενου πεδίου ($s \rightarrow 0$). Έτσι οι εξισώσεις (1.1), (1.2), μπορούν με κατάλληλους χειρισμούς να έχουν την παρακάτω μορφή:

$$V = (R_s + jX_s) \cdot I_s + jX_m(I_s \cdot I_r) \quad (1.3)$$

$$0 = (R_r/s + jX_r/s) \cdot I_r + jX_m(I_r \cdot I_s) \quad (1.4)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις ορίζουμε ανάλογα με το M/Σ τα παρακάτω μεγέθη, τα οποία εμφανίζονται και στο ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα:

-Η αντίδραση σκέδασης του στάτη X_{ls} , η οποία εκφράζει τη ροή σκέδασης Φ_{ls}

$$X_{ls} = \omega_s(L_{st} - M^*w_s/w_r)$$

-Η αντίδραση σκέδασης του δρομέα X_{lr} , η οποία εκφράζει τη ροή σκέδασης Φ_{lr}

$$X_{lr} = \omega_s(L_{rot} - M^*w_r/w_s)$$

-Η αντίδραση μαγνήτισης X_m , η οποία παριστά τη σύζευξη μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη και του δρομέα

$$X_m = \omega_s^*M^*w_s/w_r$$

Κατ' αναλογία τα μεγέθη του δρομέα αναφέρονται/ανοίγονται στο στάτη, μέσω του λόγου σπειρών των δύο τυλιγμάτων w_s/w_r και δίνονται από τις σχέσεις:

$$R'_r = R_r(w_s/w_r)^2$$

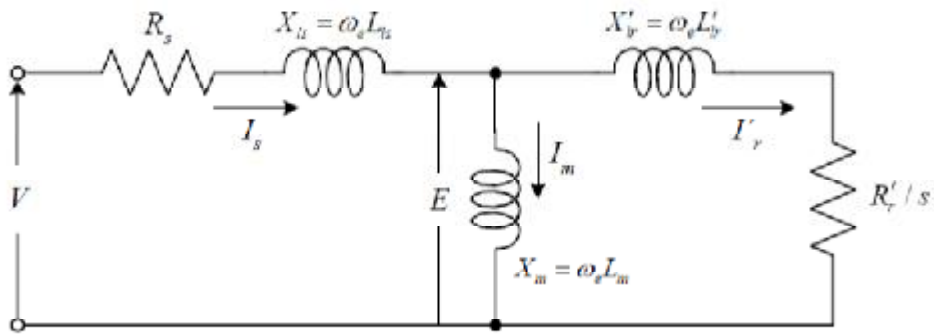
$$X'_{lr} = X_{lr}(w_s/w_r)^2$$

$$I'_r = I_r(w_r/w_s)$$

$$X_{ls} + X_m = \omega_s^*L_{st}$$

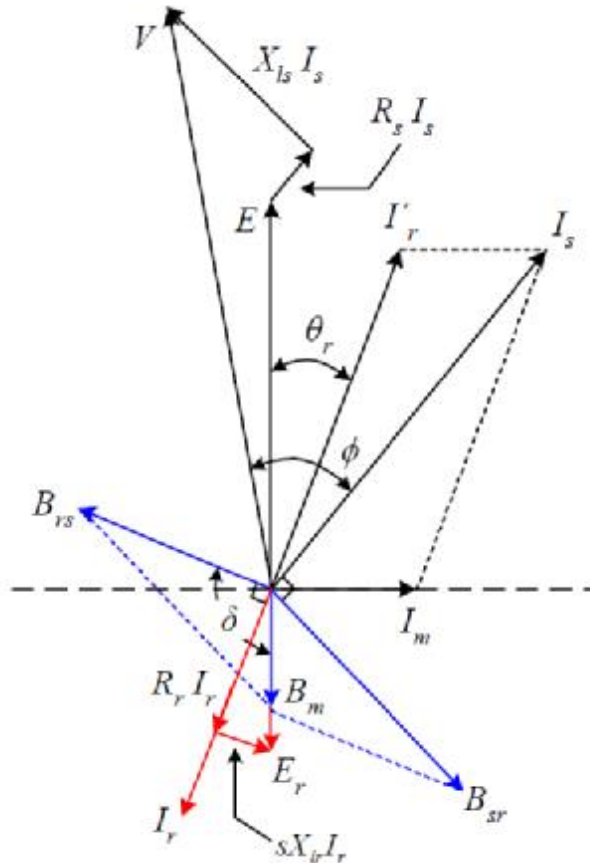
$$X'_{lr} + X_m = \omega_s^*L'_{rot}$$

Το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα, από τις εξισώσεις (1.3)–(1.4), εικονίζεται στο σχήμα 1.13. Στο κύκλωμα αυτό η τάση του δρομέα (E) είναι σταθερή και η συχνότητα των μεγεθών του είναι ω_s (ίση μ' εκείνη του στάτη). Οι επιπτώσεις από τη μεταβολή της ταχύτητας έχουν ενσωματωθεί στην ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του δρομέα $X'_{lr} + R'_r/s$, η οποία εξαρτάται από την ολίσθηση.



Σχ. 1.13. Τυπικό μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το διάγραμμα στρεφόμενων ανυσμάτων (phasors), των τάσεων και των ρευμάτων του κινητήρα. Τα δύο πρώτα τεταρτημόρια αναφέρονται στα μεγέθη του κινητήρα, ανοιγμένα στο στάτη. Εικονίζονται ακόμη, τα μεγέθη στην πλευρά του δρομέα και τα μαγνητικά πεδία.



Σχ. 1.14 Διανυσματικό διάγραμμα των τάσεων, των ρευμάτων και των μαγνητικών πεδίων του επαγωγικού κινητήρα

1.4.2 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας

Η αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα, τα οποία στρέφονται με την ίδια ταχύτητα n_s , προκαλεί την ανάπτυξη μιας σταθερής ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Η ροπή είναι ανάλογη με το εξωτερικό γινόμενο των πεδίων και η φορά της είναι η ίδια με τη φορά περιστροφής των πεδίων του στάτη και του δρομέα.

$$T = C_1(B_{sr} \times B_{rs}) = C_T \cdot B_m \cdot B_{rs} \cdot \sin \delta = C_T \cdot B_m \cdot B_{rs} \cdot \cos \theta_r$$

Όπου:

$$\delta = \theta_r + 90^\circ$$

θ_r : γωνία – διαφορά φάσης τυλίγματος δρομέα

C_1, C_T : κατασκευαστικές σταθερές

Η ροπή που αναπτύσσει ένας επαγωγικός κινητήρας μεταβάλλεται με την ταχύτητα με τον τρόπο που εικονίζεται στο σχήμα 1.15α. Στο σχήμα 1.15β φαίνεται αντίστοιχα η μεταβολή του ρεύματος του δρομέα με την ταχύτητα.

Ροπή χωρίς φορτίο

Όταν ο κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο (Σχ. 1.9α), οπότε η ταχύτητα του n_{r0} του κινητήρα είναι περίπου ίση με τη σύγχρονη και η ολίσθηση s είναι πολύ μικρή. Επειδή η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων είναι μικρή, η αντίδραση του δρομέα sX_{lr} είναι πολύ μικρή σε σχέση με την ωμική του αντίσταση και η διαφορά φάσης θ_r μεταξύ I_r και E_r είναι πολύ μικρή. Μολονότι το ρεύμα του δρομέα είναι πολύ μικρό στη λειτουργία χωρίς φορτίο, το ρεύμα τροφοδοσίας του στάτη είναι αρκετά μεγάλο, καθώς παρέχει το ρεύμα μαγνήτισης. Το μέτρο της αναπτυσσόμενης ροπής δίνεται από τη σχέση:

$$T_e = C_T \cdot B_m \cdot B_{rs} \cdot \sin\delta = C_T \cdot B_m \cdot B_{rs} \cdot \cos\theta_r$$

Επειδή το μαγνητικό πεδίο B_{rs} είναι μικρό, η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας είναι τόσο όση είναι απαραίτητη για να **υπερνικήσει τις απώλειές του**.

Ροπή Εκκίνησης

Η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας στη μηδενική ταχύτητα ονομάζεται ροπή εκκίνησης (T_{start}). Η ροπή εκκίνησης είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή, συνήθως της τάξης του 150% της ονομαστικής.

Ροπή με φορτίο

Σε μικρές τιμές της ροπής φορτίου και της ολίσθησης αντίστοιχα, η μεταβολή του ρεύματος στο δρομέα και της ροπής είναι γραμμική με την ολίσθηση. Αυτό οφείλεται στην αμελητέα αντίδραση του δρομέα X'_{lr} , συγκριτικά με την R'_r/s .

Όταν η ροπή του φορτίου αυξηθεί στην ονομαστική τιμή, η ταχύτητα του κινητήρα μειώνεται και η ολίσθηση αυξάνει με αποτέλεσμα η τάση E_r που επάγεται στο δρομέα να αυξάνεται. Η αυξημένη τάση προκαλεί την αύξηση του ρεύματος I_r και του μαγνητικού πεδίου B_{rs} στο δρομέα. Ταυτόχρονα, η αύξηση της συχνότητας στο δρομέα έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη διαφορά φάσης μεταξύ των E_r και I_r διότι η αντίδραση του δρομέα sX_{lr} είναι τώρα παραπλήσια της ωμικής του αντίστασης R_r .

Η αύξηση του πεδίου B_{rs} τείνει να αυξήσει την αναπτυσσόμενη ροπή. Αντίθετα, η αύξηση της γωνίας δ , η οποία είναι μεγαλύτερη από 90 μοίρες, τείνει να μειώσει τη ροπή. Καθώς η επίδραση του πεδίου είναι μεγαλύτερη από την επίδραση της γωνίας, η ροπή αυξάνεται.

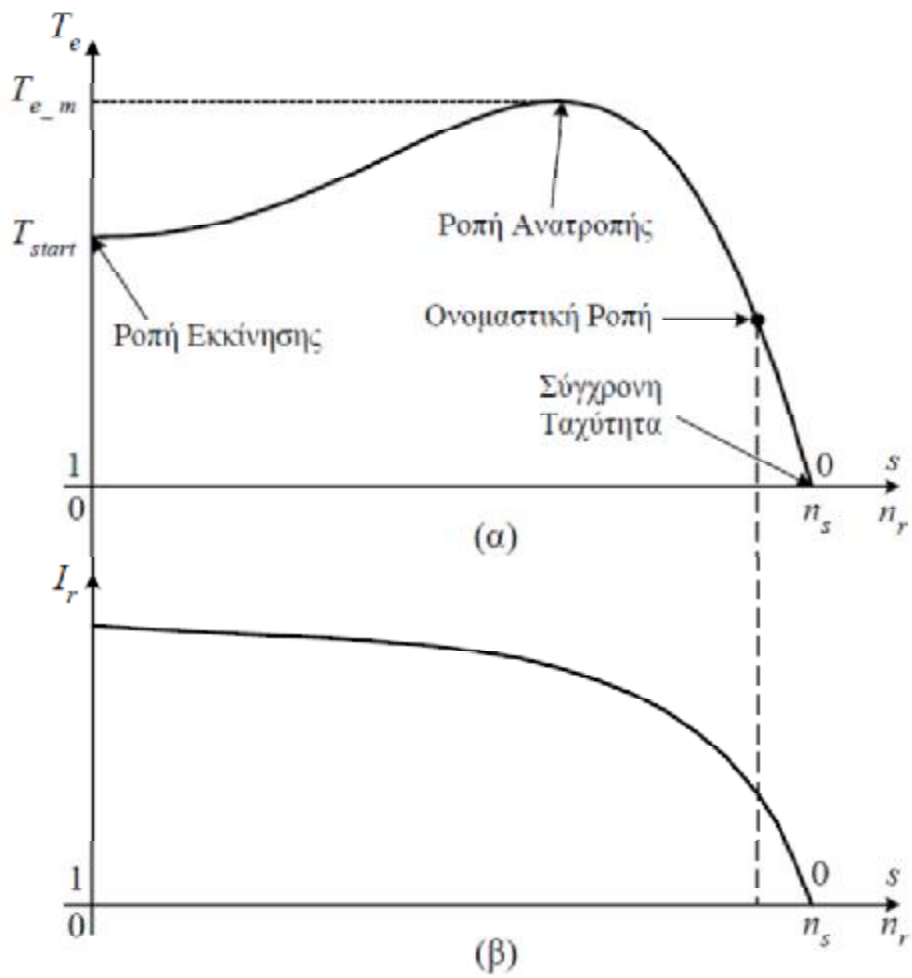
Για ροπές φορτίου μεγαλύτερες από την ονομαστική, η συχνότητα των ρευμάτων στο δρομέα είναι αρκετά μεγάλη και η αντίδραση του δρομέα sX_{lr} είναι συγκρίσιμη με την R'_r/s . Έτσι, ο συντελεστής ισχύος του δρομέα $\cos\theta_r = \sin\delta$ μειώνεται. Η μεταβολή του ρεύματος του δρομέα και της ροπής περιορίζεται, σε ροπές μεγαλύτερες από την ονομαστική

Γίνεται φανερό πως όταν η ολίσθηση είναι μικρή, το ωμικό μέρος λαμβάνει μεγάλες τιμές ($R_r/s \gg X_{r\sigma}$) και το ρεύμα μεταβάλλεται γραμμικά με την ολίσθηση. Αντίθετα, για μεγάλες τιμές της ολίσθησης είναι $R_r/s \ll X_{r\sigma}$ και το ρεύμα προσεγγίζει μια σταθερή τιμή.

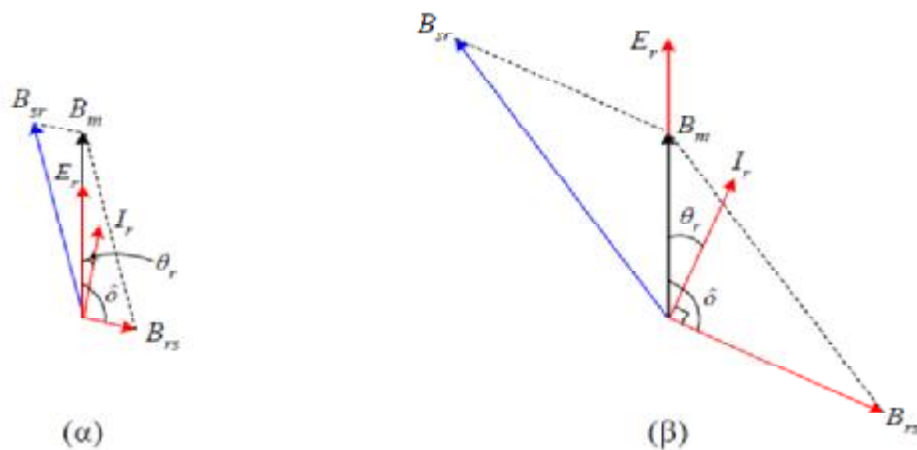
Ροπή Ανατροπής

Η επίδραση όμως του μαγνητικού πεδίου του δρομέα B_{rs} υπερισχύει της γωνίας δ , μέχρι μια τιμή του φορτίου, η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή (Σχ. 1.14α). Η μέγιστη ροπή $T_{e,m}$ ονομάζεται *ροπή ανατροπής (pull out torque, breakdown torque)*. Η ροπή ανατροπής είναι 2 έως 3 φορές μεγαλύτερη της ονομαστικής. Όταν η ροπή του φορτίου γίνει μεγαλύτερη από τη ροπή ανατροπής, η επίδραση του $\sin\delta$ είναι εντονότερη από εκείνη του μαγνητικού πεδίου και η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας μειώνεται. Το αποτέλεσμα στην περίπτωση αυτή είναι ο κινητήρας να σταματήσει (παθητικό φορτίο). Για ροπές υψηλότερες από τη ροπή ανατροπής, ο συντελεστής ισχύος του δρομέα γίνεται πολύ μικρός και η ροπή μειώνεται αντί να αυξάνει. Ακόμη, το ρεύμα του δρομέα είναι περίπου σταθερό.

Η ροπή ανατροπής είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης τροφοδοσίας και αντιστρόφως ανάλογη των αντιδράσεων του στάτη και του δρομέα. Έτσι, οι αντιδράσεις σκέδασης πρέπει να είναι μικρές, όταν είναι επιθυμητή μια μεγάλη ροπή ανατροπής. Επίσης όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση του δρομέα, σε τόσο μικρότερη ταχύτητα θα εμφανίζεται η μέγιστη ροπή.



Σχ1.15 (α) Τυπική χαρακτηριστική ροπής–ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων και (β) μεταβολή του ρεύματος του δρομέα με την ταχύτητα



Σχ. 1.16 (α) Μεταβολή των μαγνητικών πεδίων όταν ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο και (β) με υψηλό φορτίο

1.5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

1.5.1. Ισχύς – Απώλειες επαγωγικού

Σε έναν επαγωγικό κινητήρα κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας εισόδου σε μηχανική, ένα ποσοστό της ισχύος εισόδου καταναλώνεται από τον κινητήρα, με αποτέλεσμα την ανύψωση της θερμοκρασίας του. Αυτό το ποσοστό αντιπροσωπεύει τις απώλειες της μηχανής, οι οποίες πρέπει να είναι οι ελάχιστες δυνατές. Οι συνολικές απώλειες, απαρτίζονται από τις παρακάτω επιμέρους συνιστώσες:

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

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

$$P_{cus} = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2$$

Αντίστοιχα στο δρομέα ορίζονται από τη σχέση:

$$P_{cur} = 3 \cdot R'_r \cdot I'_r^2$$

Οι απώλειες χαλκού εξαρτώνται από το μέγεθος των αντιστάσεων των τυλιγμάτων και το μέγεθος των ρευμάτων στο στάτη I_s και το δρομέα I'_r , τα οποία είναι συνάρτηση της ροπής του φορτίου. Οι απώλειες χαλκού στο στάτη και στο δρομέα συμβάλλουν κατά 33–40% και 15–22% αντίστοιχα, στις συνολικές απώλειες των συμβατικών επαγωγικών κινητήρων υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας.

- Απώλειες σιδήρου ή μαγνητικές απώλειες (core, iron losses)

Οι απώλειες σιδήρου προκύπτουν από το άθροισμα των απωλειών υστέρησης και δινορευμάτων στο στάτη και το δρομέα.

Εξαρτώνται από το μέγεθος της ολικής μαγνητικής ροής στο διάκενο Φ_m και τη συχνότητα μεταβολής της, ενώ είναι ανεπηρέαστες από τη ροπή του φορτίου. Οι απώλειες σιδήρου στο στάτη ορίζονται από τη σχέση:

$$P_{Fes} = k_e \cdot \omega_s^2 \cdot \Phi_m^2 + k_h \cdot \omega_s \cdot \Phi_m^n \quad (1.1)$$

Αντίστοιχα στο δρομέα ορίζονται από τη σχέση:

$$P_{Fer} = k_e \cdot (s\omega_s)^2 \cdot \Phi_m^2 + k_h \cdot s \cdot \omega_s \cdot \Phi_m^n \quad (1.2)$$

Όπου:

- k_e είναι ο συντελεστής απωλειών δινορευμάτων

- k_h ο συντελεστής απωλειών υστέρησης.

Ο εκθέτης n λαμβάνει τιμές από 1.5 έως 2.5 και συνήθως λαμβάνεται $n = 2$.

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

$$P_{Fes+r} = E^2 / R_m \quad (1.3)$$

Όπου από τις εξισώσεις 1.1, 1.2, 1.3 και θέτοντας όπου $E = \omega_s \cdot \Phi_m$ προκύπτει:

$$R_m = 1 / [k_e \cdot (1+s^2) + k_h \cdot (1+s) / \omega_s]$$

- Μηχανικές απώλειες (mechanical losses)

Οι μηχανικές απώλειες P_{fw} , περιλαμβάνουν τις:

- απώλειες τριβών (friction), λόγω της περιστροφής του άξονα
- απώλειες αερισμού (windage) από τη λειτουργία του ανεμιστήρα.

Οι απώλειες τριβών–αερισμού, μεταβάλλονται προσεγγιστικά ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας

$$P_{fw} = C_{fw} \cdot n_r^2$$

Όπου:

C_{fw} είναι ο συντελεστής μηχανικών απωλειών.

Οι μηχανικές απώλειες αποτελούν το 8– 10% των ολικών απωλειών στο ονομαστικό φορτίο. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του κινητήρα τόσο μεγαλύτερες είναι οι μηχανικές απώλειες

- Κατανεμημένες απώλειες (stray losses)

Πρόκειται για πρόσθετες απώλειες της μηχανής, οι οποίες οφείλονται στην αύξηση της ροής σκέδασης με το φορτίο και στις υψηλής συχνότητας διακυμάνσεις της ροής αυτής και οι οποίες

Ο προσδιορισμός των κατανεμημένων απωλειών P_{stray} είναι εξαιρετικά δύσκολος. Έτσι, συνήθως λαμβάνονται ίσες με το 1% της ισχύος εξόδου της μηχανής στη λειτουργία με το ονομαστικό φορτίο. Οι κατανεμημένες απώλειες αποτελούν το 8–20% των ολικών απωλειών, ανάλογα με την ιπποδύναμη του κινητήρα.

Το άθροισμα των κατανεμημένων απωλειών, των απωλειών τριβών και των απωλειών αερισμού που ονομάζονται και απώλειες περιστροφής, θεωρείται ανεξάρτητο από την ταχύτητα περιστροφής διότι οι επι μέρους απώλειες μεταβάλλονται σε αντίθετη κατεύθυνση. Οι κατανεμημένες απώλειες σαν μαγνητικές απώλειες μειώνονται όσο η ταχύτητα του κινητήρα αυξάνει

Σε έναν τριφασικό επαγωγικό κινητήρα η ηλεκτρική ισχύς εισόδου ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{in} = 3V_s I_s \cos\phi$$

Όπου V_s , I_s φασική τάση και φασικό ρεύμα,
 ϕ η διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης και του ρεύματος.

Η ισχύς που απομένει αν από την ισχύ εισόδου αφαιρεθούν οι απώλειες χαλκού και οι μαγνητικές απώλειες στο στάτη, είναι η ισχύς που μέσω του διακένου μεταφέρεται στο δρομέα και ονομάζεται *ισχύς διακένου* (air gap power). Από το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα, η ισχύς διακένου μπορεί να καταναλωθεί μόνο στην αντίσταση R_r . Επομένως, η ισχύς διακένου ορίζεται από τη σχέση:

$$P_{ag} = 3 \cdot I_r^2 \cdot (R_r/s) = 3 \cdot E \cdot I_r \cdot \cos\theta_r$$

Ένα τμήμα της ισχύος διακένου χάνεται ως απώλειες χαλκού στο δρομέα και ένα τμήμα ως απώλειες σιδήρου στο δρομέα. Η ισχύς που απομένει μετατρέπεται σε μηχανική και προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση, αν αγνοήσουμε τις μικρές απώλειες σιδήρου στο δρομέα:

$$P_m = P_{ag} - P_{cu_r} = 3 \cdot I_r^2 \cdot (R_r/s) - 3 \cdot I_r^2 \cdot R_r = P_{ag} \cdot (1-s)$$

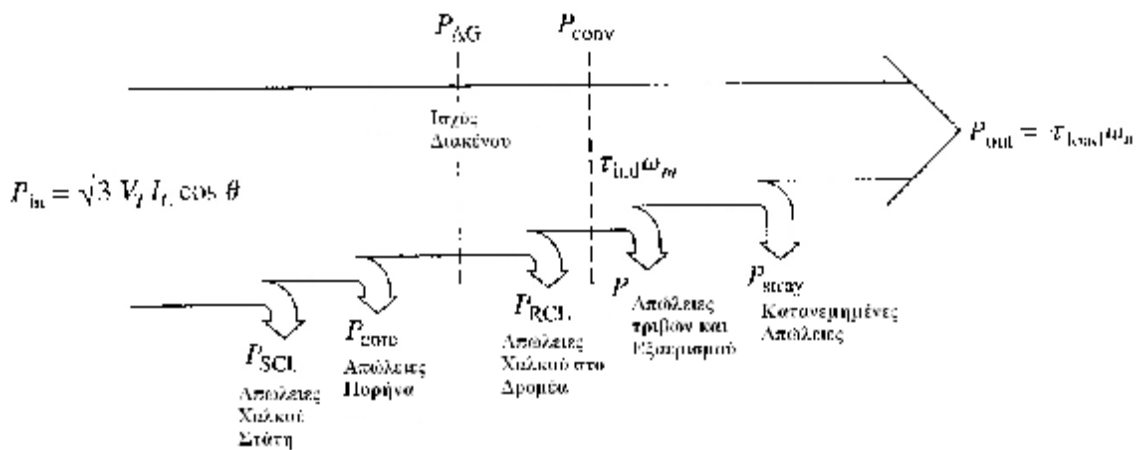
Συνήθως, οι απώλειες σιδήρου του δρομέα ενσωματώνονται στις μαγνητικές απώλειες του στάτη. Οι απώλειες χαλκού του δρομέα, από την παραπάνω εξίσωση, υπολογίζονται από το γινόμενο της ισχύος διακένου με την ολίσθηση:

$$P_{cur} = s \cdot P_{ag}$$

Όταν ο κινητήρας δεν στρέφεται ($s = 1$), όλη η ισχύς διακένου μετατρέπεται σε θερμότητα στην αντίσταση του δρομέα. Αυτό συμβαίνει γιατί η ισχύς εξόδου είναι μηδενική. Η ωφέλιμη ισχύς εξόδου του επαγωγικού κινητήρα είναι μικρότερη από την αναπτυσσόμενη ισχύ κατά τις μηχανικές και τις κατανεμημένες απώλειες όπως μπορούμε να δούμε στην παρακάτω εξίσωση:

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

Στο παρακάτω διάγραμμα μπορούμε να δούμε το διάγραμμα ροής ισχύος ενός τριφασικού κινητήρα όπου $P_{scl} = P_{cus}$ $P_{rc1} = P_{cur}$

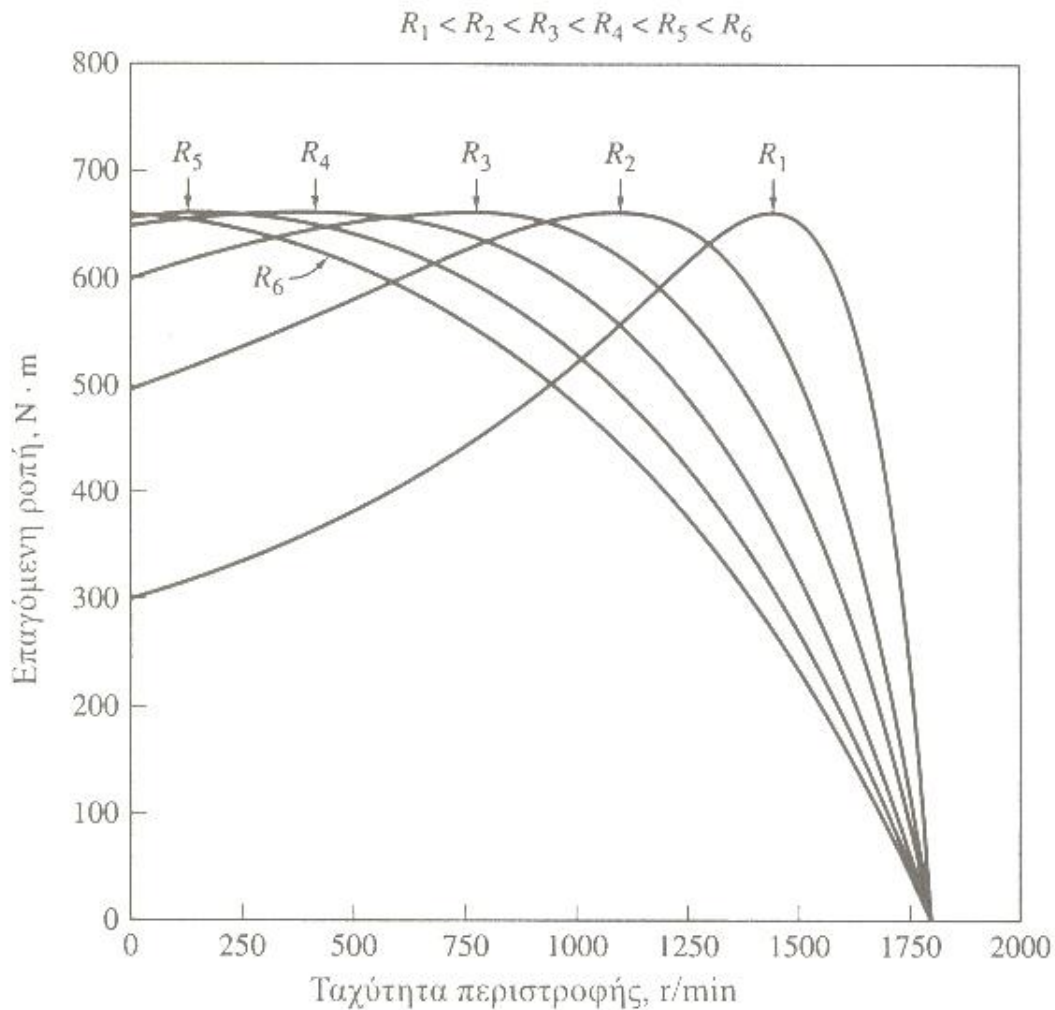


Σχ. 1.17. Διάγραμμα ροής ισχύος τριφασικού επαγωγικού κινητήρα

1.6. Κατάταξη των επαγωγικών κινητήρων

Η μορφή της χαρακτηριστικής ροπής–ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων εξαρτάται από την ωμική αντίσταση του δρομέα και την ολική αντίδραση σκέδασης. Ένας επαγωγικός κινητήρας με μεγάλη αντίσταση στο δρομέα, εμφανίζει τη μέγιστη ροπή σε μικρή ταχύτητα και έχει υψηλή ροπή εκκίνησης. Όμως, οι απώλειες ισχύος στην ονομαστική λειτουργία είναι υψηλές, εξαιτίας της μεγάλης ολίσθησης.

Αντίθετα, ένας κινητήρας με μικρή αντίσταση στο δρομέα παρουσιάζει μικρή ροπή εκκίνησης, μεγάλο ρεύμα εκκίνησης, αλλά και υψηλό βαθμό απόδοσης στην ονομαστική λειτουργία. Ταυτόχρονα, η μεταβολή της ταχύτητας με το φορτίο είναι περιορισμένη. Ο συνδυασμός της επιθυμητής υψηλής αντίστασης κατά την εκκίνηση και της μικρής αντίστασης στην κανονική λειτουργία, επιτυγχάνεται ιδανικά στους κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα. Κατά την εκκίνηση των κινητήρων δακτυλιοφόρου δρομέα, προστίθενται εξωτερικές αντιστάσεις σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα, το οποίο έχει μικρή αντίσταση. Οι αντιστάσεις αυτές αφαιρούνται στην κανονική λειτουργία του κινητήρα. Με τον τρόπο αυτό οι χαρακτηριστικές ροπής–ταχύτητας του κινητήρα μεταβάλλονται όπως στο Σχήμα 1.20.



Σχ. 1.20 Τροποποίηση των χαρακτηριστικών ροπής–ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα, με τη μεταβολή της αντίστασης στο τύλιγμα του δρομέα.

Η επιθυμητή μεταβολή της αντίστασης του δρομέα ανάλογα με την τιμή της ολίσθησης, μπορεί να επιτευχθεί και στους κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού, με την κατάλληλη σχεδίαση των αυλακώσεων του δρομέα.

Όταν οι αυλακώσεις είναι κοντά στην επιφάνεια του δρομέα, οι ράβδοι του τυλίγματος κλωβού είναι σε ισχυρή σύζευξη με το τύλιγμα του στάτη. Επομένως, μόνο ένα μικρό τμήμα της ροής δεν συνδέει το τύλιγμα του στάτη. Έτσι, η **αντίδραση σκέδασης** του δρομέα/κλωβού είναι μικρή. Αντίθετα, όταν οι ράβδοι είναι τοποθετημένες βαθιά μέσα στο δρομέα, η ροή και η αντίδραση σκέδασης του δρομέα είναι υψηλές.

Η **ωμική αντίσταση** του τυλίγματος δρομέα/κλωβού εξαρτάται από το μέγεθος των αυλακώσεων, η οποία επιβάλλεται από τη διατομή των ράβδων. Όσο μεγαλύτερη είναι η διατομή των ράβδων, τόσο μικρότερη είναι η ωμική αντίσταση του κλωβού.

Ανάλογα με τη διαμόρφωση των αυλακώσεων του δρομέα, οι οποίες ονομάζονται **κλάσεις σχεδίασης**, οι επαγωγικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού διακρίνονται σε **τέσσερις κατηγορίες** (A, B, C, D), όπως ορίζονται στα αντίστοιχα πρότυπα NEMA.

Στον πίνακα και στο σχέδιο 1.21 που ακολουθούν, φαίνονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά και οι χρήσεις της κάθε κατηγορίας.

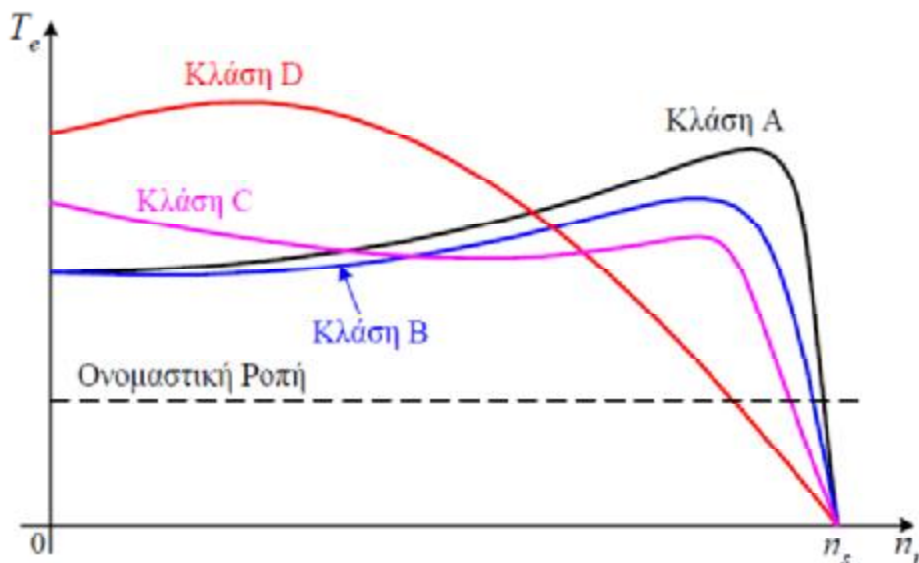
Πίνακας 1.2. Χαρακτηριστικά κλάσεων σχεδίασης επαγωγικών κινητήρων

ΚΛΑΣΗ Α	
Τύπος	Γενικής χρήσεως
Ροπή εκκίνησης	100% της ονομαστικής για μεγάλους κινητήρες, 200% για μικρότερους
Ρεύμα εκκίνησης	Περίπου 800% του ονομαστικού
Ροπή ανατροπής	200-300% της ονομαστικής
Ολίσθηση ανατροπής	<0,2
Ονομαστική ολίσθηση	<0,05
Εφαρμογές	Φτερωτές, αντλίες, μηχανικά εργαλεία
Παρατηρήσεις	Το μεγάλο ρεύμα εκκίνησης προκαλεί σοβαρά προβλήματα στο δίκτυο, άρα χρειάζονται ειδικές τεχνικές ομαλής εκκίνησης. Περισσότερο αποδοτικός από τους κλάσης Β.
ΚΛΑΣΗ Β	
Τύπος	Γενικής χρήσεως
Ροπή εκκίνησης	100% της ονομαστικής για μεγάλους κινητήρες, 200% για μικρότερους
Ρεύμα εκκίνησης	500-600% του ονομαστικού
Ροπή ανατροπής	≥200% της ονομαστικής
Ολίσθηση ανατροπής	<0,2
Ονομαστική ολίσθηση	<0,03
Εφαρμογές	Παρόμοιες με την κλάση Α, με περισσότερες εφαρμογές σε συστήματα HVAC
Παρατηρήσεις	Αντικαταστάτης των κινητήρων κλάσης Α, λόγω του μικρότερου ρεύματος εκκίνησης. Πιο συνηθισμένοι στο εμπόριο.
ΚΛΑΣΗ C	
Τύπος	Υψηλή ροπή εκκίνησης
Ροπή εκκίνησης	Περίπου 250% της ονομαστικής
Ροπή ανατροπής	Ελαφρώς μικρότερη από την αντίστοιχη κλάσης Α
Ονομαστική ολίσθηση	<0,05
Εφαρμογές	Συμπιεστές, αντλίες, ταινιόδρομοι
Παρατηρήσεις	Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που χρειάζεται μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης από τους κινητήρες κλάσης Β. Είναι λιγότερο αποδοτικοί από τους αντίστοιχους κλάσης Β.

Πίνακας 1.2. Χαρακτηριστικά κλάσεων σχεδίασης επαγωγικών κινητήρων (συνέχεια)

ΚΛΑΣΗ D	
Τύπος	Πολύ υψηλή ροπή εκκίνησης
Ροπή εκκίνησης	>275% της ονομαστικής
Ολίσθηση ανατροπής	Υψηλή Ολίσθηση ανατροπής, μπορεί να φτάσει και το 1
Ονομαστική ολίσθηση	>0,07
Εφαρμογές	Εφαρμογές που χρειάζονται μεγάλη ροπή εκκίνησης π.χ. τύπος διατρήσεων, γερανογέφυρες, ανυψωτικά
Παρατηρήσεις	Εφαρμογές που απαιτούν πολύ μεγάλη ροπή εκκίνησης, όπου η ολίσθηση μπορεί να παίρνει τιμές από 0 - 0,5. Είναι λιγότερο αποδοτικοί από όλες τις άλλες κατηγορίες.

Οι τυπικές χαρακτηριστικές καμπύλες για κάθε κλάση κινητήρα φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ. 1.21. Τυπικές χαρακτηριστικές ροπής–ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα, ανάλογα με την κλάση σχεδίασης.

Το παγκόσμιο πρότυπο με Ευρωπαϊκή προέλευση IEC (International Electric Companion) ορίζει αντίστοιχα τα πρότυπα: IEC class N που αντιστοιχεί στο NEMA B και IEC class H που αντιστοιχεί στο NEMA C.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΈΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

2.1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ

Κατά την εκκίνηση των επαγωγικών κινητήρων παρουσιάζονται προβλήματα τα οποία σχετίζονται με τον ίδιο τον κινητήρα και το φορτίο αλλά και το δίκτυο τροφοδοσίας. Η ροπή εκκίνησης και το ρεύμα εκκίνησης είναι τα δύο μεγέθη που μας απασχολούν. Κατά την εκκίνηση ο κινητήρας πρέπει να αναπτύξει την κατάλληλη ροπή, συχνά μεγαλύτερη από την ονομαστική, έτσι ώστε να μην απαιτείται μεγάλος χρόνος εκκίνησης, αλλά ούτε να υπάρξει περίπτωση θραύσης του άξονα.

Κατά την εκκίνηση οι κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα απορροφούν μεγάλη ένταση ρεύματος από τα δίκτυα που τους τροφοδοτούν (από 4/σιο έως και 8/σιο) με αποτέλεσμα να προκαλούνται στιγμιαίες πτώσεις τάσεως που μπορεί να είναι επικίνδυνες για τους άλλους καταναλωτές αλλά και για το ίδιο το δίκτυο ηλεκτροδότησης.

Η ΔΕΗ απαιτεί το ρεύμα εκκίνησης να μην υπερβαίνει συγκεκριμένες ανάλογα με την εγκατάσταση. Για τους 3/φασικούς κινητήρες δεν επιτρέπεται η απευθείας σύνδεση στο δίκτυο Χαμηλής τάσης κινητήρων ισχύος μεγαλύτερης από 1,1 KW, και 1,5 KW για τους 1/φασικούς.

Προς αποφυγή των παραπάνω προβλημάτων χρησιμοποιούμε διάφορους τρόπους εκκίνησης των επαγωγικών κινητήρων. Μερικοί από τους πιο διαδεδομένους τρόπους εκκίνησης των επαγωγικών κινητήρων είναι:

1. απευθείας εκκίνηση
2. εκκίνηση με μείωση της τάσης τροφοδοσίας
3. εκκίνηση με οδήγηση μεταβλητής συχνότητας

Οι μεθοδοι που χρησιμοποιούμε για να επιτύχουμε τους παραπάνω τρόπους εκκίνησης θα αναλυθούν στη συνέχεια. Στα κεφάλαια αυτά περιλαμβάνονται όλοι οι μέθοδοι περισσότερο, λιγώτερο ή και καθόλου εφαρμοζόμενοι.

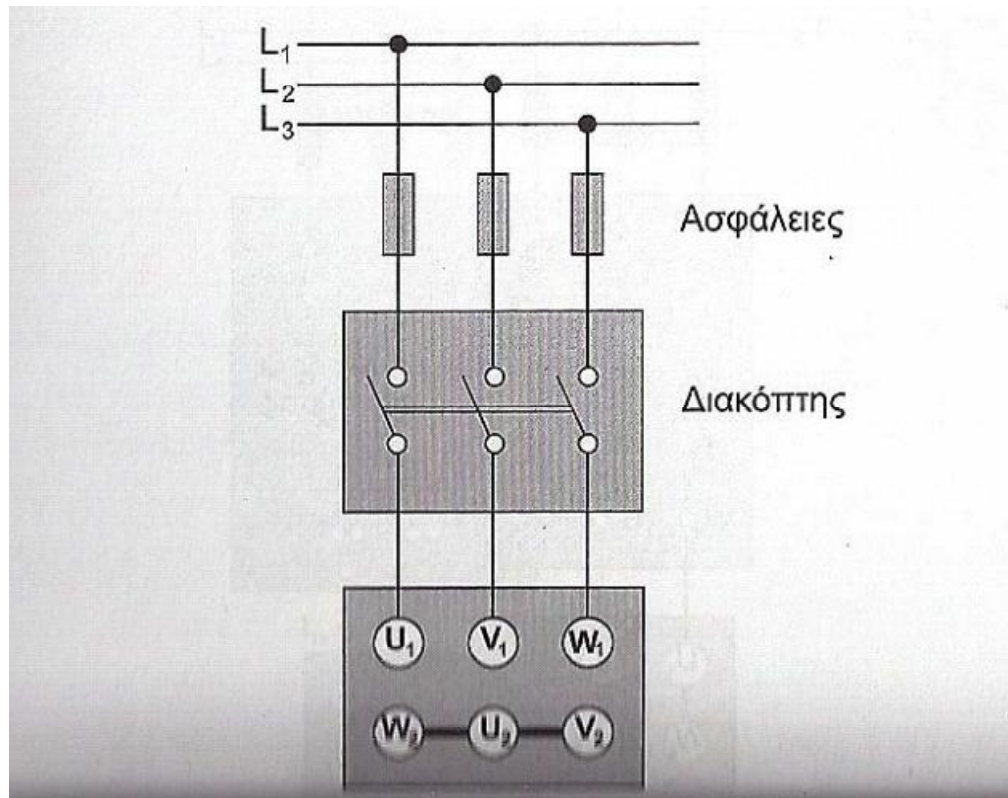
2.1.1 Απευθείας εκκίνηση (Direct-On-Line (DOL) starting)

Η απευθείας εκκίνηση είναι ο απλούστερος τρόπος εκκίνησης τριφασικού επαγωγικού κινητήρα, με τη χρήση δηλαδή ενός μόνο απλού τριπολικού διακόπτη όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε κάποιες περιπτώσεις βιομηχανικών εφαρμογών και κυρίως για κινητήρες μικρής ισχύος της τάξης του 1,5-2KW.

Λειτουργικά χαρακτηριστικά

- Μεγάλο ρεύμα εκκίνησης $I_{εκκ} \approx 6 \cdot I_{ον}$ με αποτέλεσμα να δημιουργεί πτώση τάσης.
- Υψηλή ροπή εκκίνησης $T_{εκκ} \approx 1,5 \cdot T_{ον}$ με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα εκκίνησης με φορτίο.
- Απλή μέθοδος και εξοπλισμός.
- Αδυναμία ρύθμισης της διαδικασίας

Τα μεγάλα ρεύματα εκκίνησης προκαλούν στιγμιαία μεγάλες πτώσεις τάσης (βυθίσεις τάσης) που είναι «ενοχλητικές», ιδίως όταν επαναλαμβάνονται συχνά, στους άλλους καταναλωτές και μπορεί να προκαλέσουν γενικότερα προβλήματα στα δίκτυα.



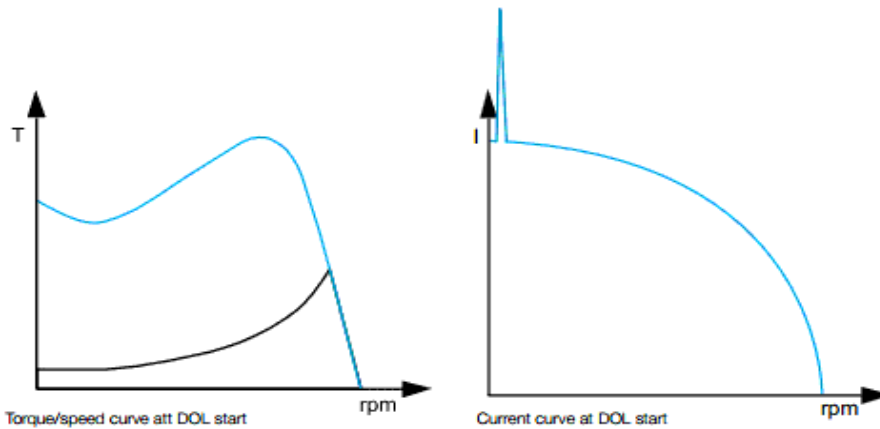
Σχ. 2.1 Συνδεσμολογία απευθείας εκκίνησης επαγωγικού κινητήρα

Υπάρχουν περιπτώσεις όμως που η ΔΕΗ επιτρέπει την απευθείας εκκίνηση για κινητήρες μεγαλύτερης ισχύος τόσο στη χαμηλή όσο και στη μέση τάση, αρκεί τα ρεύματα εκκίνησης να μην ξεπερνούν τις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές που έχει καθορίσει για τις απ'ευθείας εκκινήσεις κινητήρων και φαίνονται στον πίνακα 2.1. που ακολουθεί.

Πίνακας 2.1. Επιτρεπόμενα ρεύματα εκκίνησης από ΔΕΗ

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

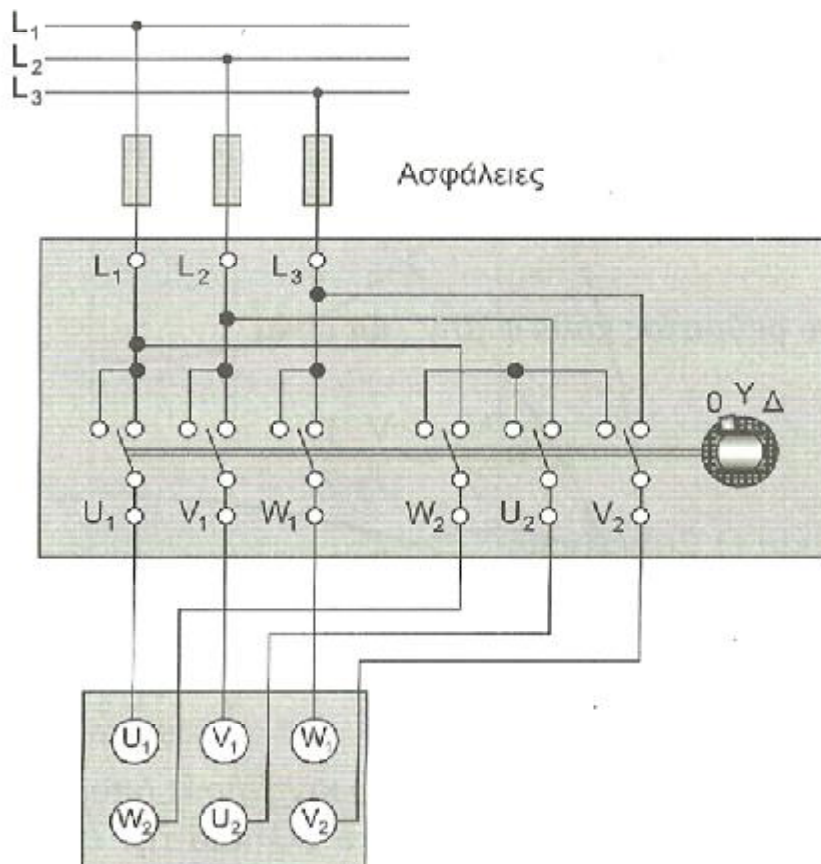
Στο παρακάτω σχήμα μπορούμε να δούμε τις χαρακτηριστικές ροπής/στροφών και ρεύματος/στροφών κατά την απευθείας εκκίνηση.



Σχ. 2.2. Χαρακτηριστική ροπής/στροφών και ρεύματος/στροφών κατά την απευθείας εκκίνηση.

2.1.2. Εκκίνηση Αστέρα/Τριγώνου (Υ/Δ)

Κατά την μέθοδο αυτή μέσω κατάλληλου διακόπτη (αυτόματου ή χειροκίνητου) που ονομάζεται διακόπτης αστέρα-τριγώνου, τα τυλίγματα του στάτη που είναι κατασκευασμένα να εργάζονται στην κανονική λειτουργία σε συνδεσμολογία τριγώνου (θέση Δ), κατά την εκκίνηση συνδέονται σε αστέρα (θέση Υ) όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. Όταν η ταχύτητα αποκτήσει μία ορισμένη τιμή, ο διακόπτης στρέφεται στη θέση τριγώνου.



Σχ. 2.3. Διασύνδεση τυλιγμάτων και συνδεσμολογία διακόπτη εκκίνησης Υ/Δ

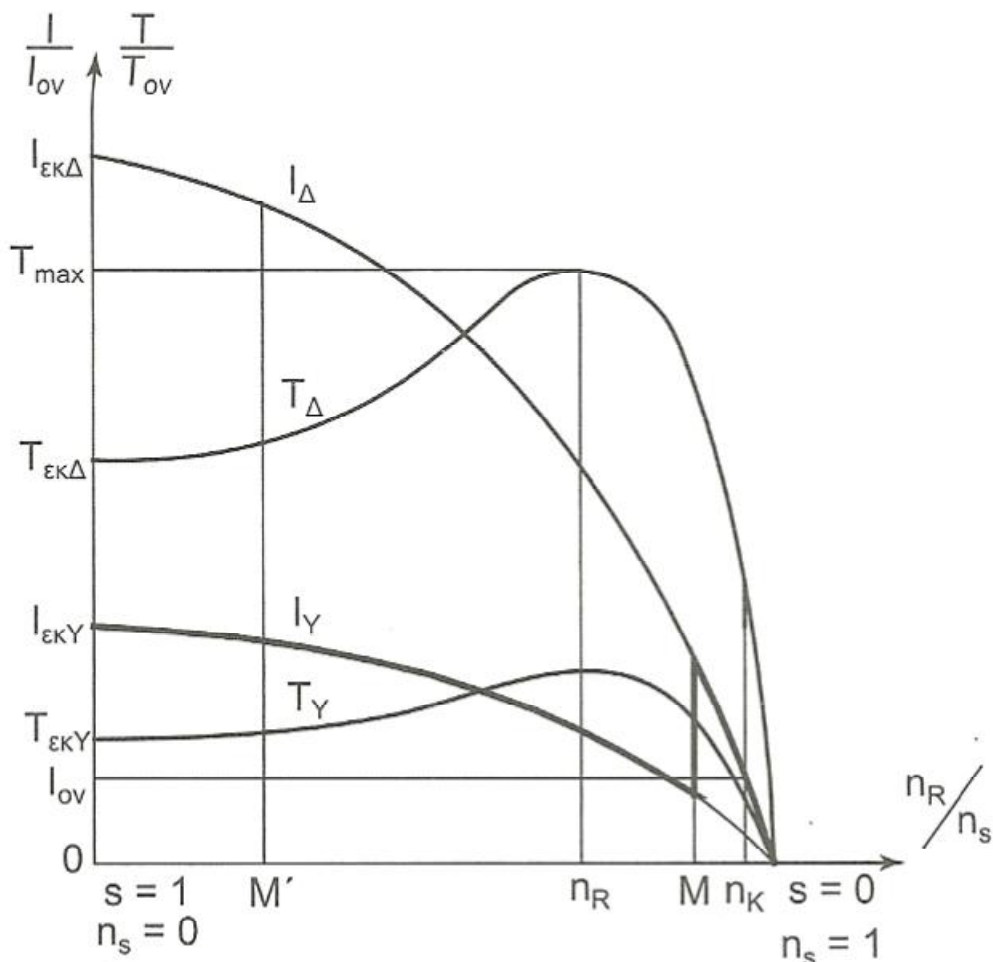
Λειτουργικά χαρακτηριστικά

- Ρεύμα εκκίνησης $I_{εκκ} \approx 2 \cdot I_{ov}$
- Ροπή εκκίνησης $T_{εκκ} \approx 0,5 \cdot T_{ov}$ με αποτέλεσμα η ροπή εκκίνησης να μειωθεί και να πρέπει να γίνει εκκίνηση χωρίς φορτίο ή με μικρή ροπή φορτίου.
- Σύνθετη μέθοδος και εξοπλισμός
- Παρατηρούνται αιχμές ρεύματος και ροπής κατά την μεταλλαγή από αστέρα σε τρίγωνο.

Στο παρακάτω σχήμα 2.4 παρατηρούμε ότι τη χρονική στιγμή της ζεύξης από αστέρα σε τρίγωνο η ένταση του ρεύματος αυξάνεται απότομα, αλλά δεν υπερβαίνει την αρχική τιμή του $I_{εκ}$. Σε περίπτωση που η ζεύξη από αστέρα σε τρίγωνο γίνει πιο πρόωρα (σημείο M') το ρεύμα εκκίνησης είναι πολύ μεγάλο οπότε η παρεμβολή του διακόπτη Y/Δ δεν έχει ουσιαστικά καμία επίδραση.

Πρακτικά ο χρόνος εκκίνησης υπολογίζεται ανάλογα με την ισχύ P (KW) του κινητήρα, από την παρακάτω σχέση:

$$t_{εκ} = 4 + (2 \cdot \sqrt{P}) \text{ όπου } P \text{ σε KW και } t_{εκ} \text{ σε sec}$$



Σχ. 2.4. Χαρακτηριστική ροπής/στροφών και ρεύματος/στροφών κατά την εκκίνηση επαγωγικού κινητήρα με διακόπτη Y/Δ

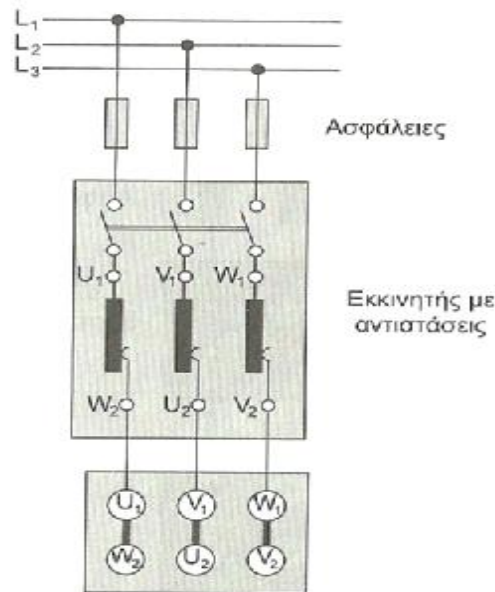
Κατά τη χρήση του διακόπτη Y/Δ πρέπει να προσεχθεί η χρονική στιγμή της ζεύξης του διακόπτη από αστέρα σε τρίγωνο ώστε να αποφευχθούν οι υπερεντάσεις και οι υπερτάσεις πρόωρης ζεύξης του κινητήρα στο δίκτυο.

2.1.3. Εκκίνηση με εξωτερικές αντιστάσεις

Εκκίνηση με αντιστάσεις στο στάτη (R_{σεκ})

Η εκκίνηση με αντιστάσεις στο στάτη ανήκει στις μεθόδους εκκίνησης με μείωση της τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα.

Με τον τρόπο αυτό ο κινητήρας ξεκινάει με μειωμένη τάση και συνεπώς και με μειωμένη ένταση. Προοδευτικά όσο αυξάνεται η ταχύτητα του κινητήρα αφαιρούνται σταδιακά οι αντιστάσεις έως ότου ο κινητήρας αποκτήσει τις κανονικές στροφές οπότε ο εκκινητής τίθεται εκτός λειτουργίας. Έτσι στην κανονική λειτουργία του κινητήρα όλες οι αντιστάσεις του εκκινητή είναι εκτός κυκλώματος.



Σχ. 2.5. Συνδεσμολογία εκκίνησης επαγωγικού κινητήρα με αντιστάσεις στο στάτη

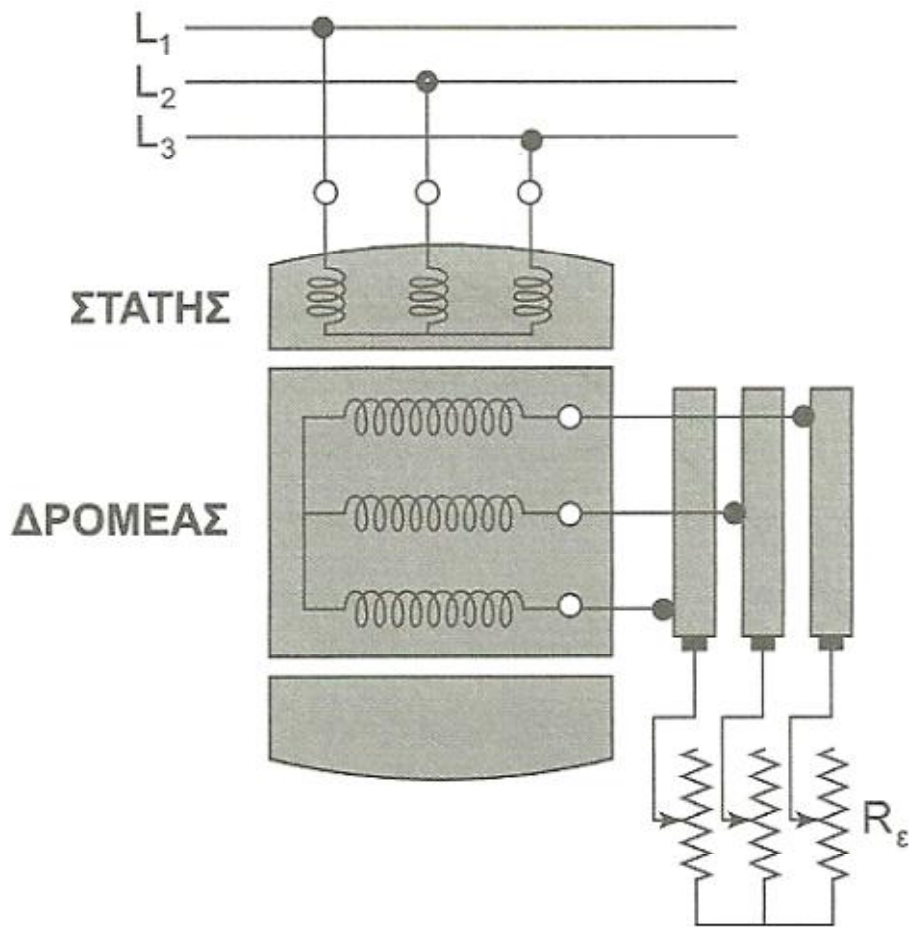
Λειτουργικά χαρακτηριστικά

- Ρεύμα εκκίνησης εξαρτώμενο από την R_{σεκ} η οποία υπολογίζεται για I_{εκκ} ≈ 4,5·I_{ον}
- Μικρή ροπή εκκίνησης T_{εκκ} ≈ 0,75·T_{ον}
- Σύνθετη μέθοδος και εξοπλισμός

Όπως γίνεται αντιληπτό η μέθοδος αυτή εκκίνησης είναι κατάλληλη μόνο για κινητήρες μικρής ισχύος και για εφαρμογές που δεν είναι ουσιαστικό το μειωμένο μέτρο της ροπής εκκίνησης T_{εκκ}.

Εκκίνηση με μεταβολή της αντίστασης του δρομέα (R_{ρεκ})

Η μέθοδος της εκκίνησης με μεταβολή των αντιστάσεων του δρομέα εφαρμόζεται μόνο σε ασύγχρονους κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούμε τις εξωτερικές μεταβλητές ωμικές αντιστάσεις (R_{ε-εκκινητής}) του τυλίγματος του δακτυλιοφόρου δρομέα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



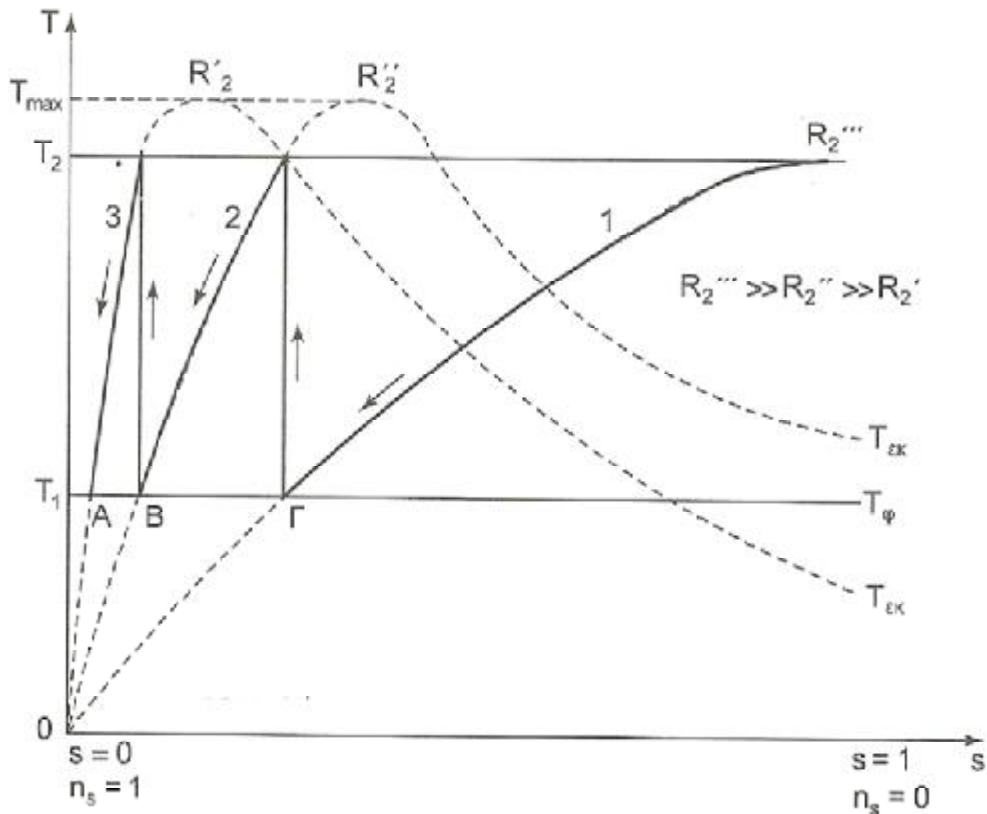
Σχ. 2.6. Συνδεσμολογία εκκίνησης επαγωγικού κινητήρα με αντιστάσεις στο δρομέα

Η μεταβολή της ροπής ενός κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα εξαρτάται από την ολική αντίσταση του τυλίγματος κάθε φάσης του δρομέα R_2 και την συνδεδεμένη σε σειρά εξωτερική αντίσταση του εκκινητή R_ϵ .

Λειτουργικά χαρακτηριστικά

- Ρεύμα εκκίνησης εξαρτώμενο από την R_ϵ
- Ροπή εκκίνησης εξαρτώμενη από την R_ϵ (ανάλογη εξάρτηση)
- Σύνθετη μέθοδος και εξοπλισμός

Από το παρακάτω σχήμα μπορούμε να βγάλουμε κάποια χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά την επίδραση της συνολικής αντίστασης του δρομέα ($R_2 + R_\epsilon$) πάνω στη ροπή εκκίνησης και γενικότερα στη χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας.



Σχ.

2.7. Χαρακτηριστική ροπής/στροφών κατά την εκκίνηση με αντιστάσεις στο δρομέα

Εφόσον η ροπή εκκίνησης T_2 που είναι και η μέγιστη ροπή, είναι μεγαλύτερη της ροπής του φορτίου T_φ , ο δρομέας θα αρχίσει να περιστρέφεται και η αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή θα ακολουθεί την καμπύλη 1 μέχρι το σημείο Γ, όπου θα εξισωθεί με τη ροπή του φορτίου. Στο διάστημα αυτό η ολίσθηση ελαττώνεται και η ταχύτητα αυξάνεται. Εάν στο σημείο αυτό, η πρόσθετη αντίσταση R_e ελαττωθεί, ο κινητήρας μεταβαίνει στην καμπύλη 2. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή γίνεται πάλι μεγαλύτερη από την T_φ και ο κινητήρας αρχίζει να επιταχύνει μέχρι το νέο σημείο ισοροπίας Β όπου η ολίσθηση είναι μικρότερη.

Στη συνέχεια μπορεί να αφαιρεθεί και το τελευταίο τμήμα της πρόσθετης αντίστασης οπότε ο κινητήρας μεταβαίνει στη φυσική του καμπύλη 3, η οποία αντιστοιχεί στην αντίσταση του δρομέα. Παρατηρούμε ότι κατά την διάρκεια της εκκίνησης η ροπή του κινητήρα κυμαίνεται μεταξύ των δύο ορίων T_1 και T_2 , τα οποία ρυθμίζονται με κατάλληλη επιλογή των αντιστάσεων εκκίνησης.

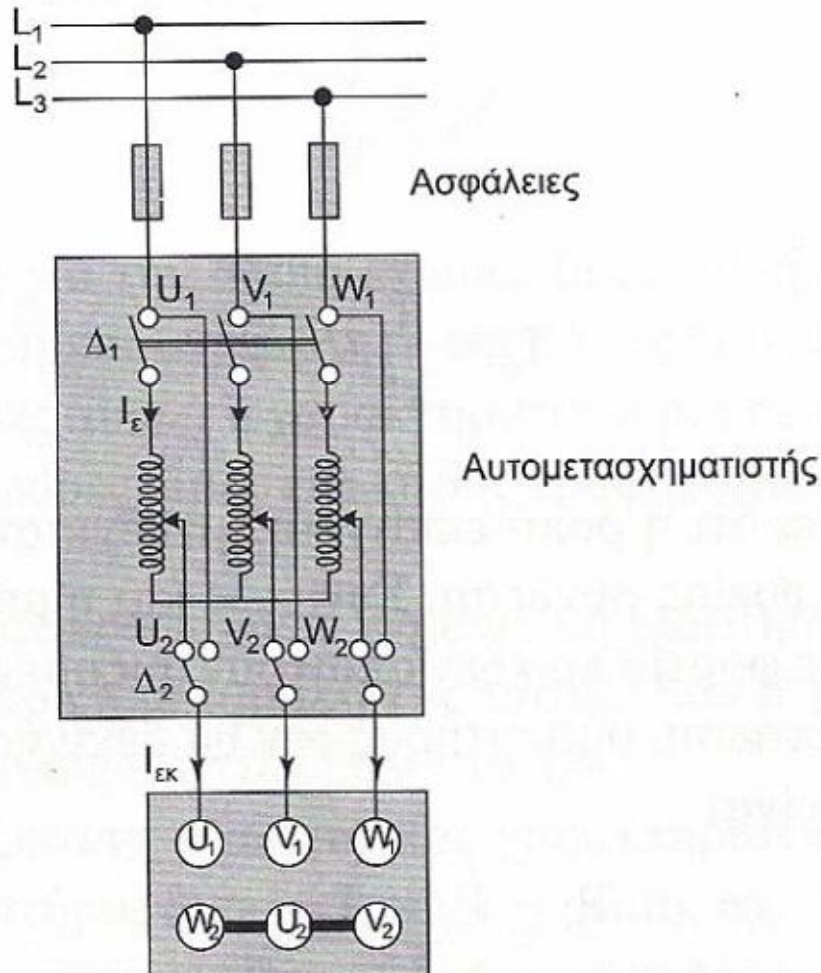
Στην πράξη οι βαθμίδες των πρόσθετων αντιστάσεων που αφαιρούνται καθορίζονται έτσι ώστε τα σημεία Α, Β και Γ να βρίσκονται κάπως υψηλότερα από την καμπύλη του φορτίου και μάλιστα σε σημείο όπου το ρεύμα του κινητήρα να πέφτει σε μία ορισμένη τιμή ώστε να οδηγεί σε ελάττωση του χρόνου (tek).

Να σημειωθεί ότι όσο το άνω όριο T_2 είναι μεγαλύτερο και πλησιάζει τη μέγιστη ροπή τόσο η ένταση εκκίνησης θα είναι μεγαλύτερη. Σε περίπτωση που χρειάζεται να έχουμε πολύ μεγάλη ροπή εκκίνησης η ολική αντίσταση του εκκινητή επιλέγεται έτσι ώστε $T_2 = T_{max}$.

Η ένταση εκκίνησης $I_{εκ}$ είναι δυνατό να ελαττωθεί στην επιθυμητή τιμή με κατάλληλη ρύθμιση της αντίστασης του εκκινητή. Στην περίπτωση αυτή όμως ελαττώνεται και η ροπή εκκίνησης T_2 .

2.1.4. Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή

Για την εκκίνηση μεγάλων ασύγχρονων κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα χρησιμοποιείται συνήθως τριφασικός αυτομετασχηματιστής που συνδέεται σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα:



Σχ. 2.8 Συνδεσμολογία εκκίνησης με αυτομετασχηματιστή

Όταν χρησιμοποιηθεί αυτομετασχηματιστής (με λόγο μετασχηματισμού k) για την εκκίνηση, το ρεύμα εκκίνησης του δικτύου I_ϵ ελαττώνεται κατά k^2 φορές, σε σύγκριση με το ρεύμα στην περίπτωση εκκίνησης με απευθείας σύνδεση ($I_{\epsilon\alpha}$), και το ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα (I_{EK}) ελαττώνεται k φορές.

Επίσης η ροπή εκκίνησης μειώνεται κατά k^2 ως προς την ροπή εκκίνησης με απευθείας σύνδεση ($T_{\sigma\kappa}$). Συνεπώς και η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε φορτία που δεν απαιτούν αυξημένη ροπή κατά την εκκίνηση. Σε αντίθετη περίπτωση ο κινητήρας δεν θα ξεκινήσει.

Λειτουργικά χαρακτηριστικά

- Ρεύμα εκκίνησης ($I_\epsilon = I_{EK}/k = (1/k^2) I_{\epsilon\alpha}$ $I_{EK} \approx 3,5 \cdot I_{\sigma\kappa}$)
- Μικρή ροπή εκκίνησης ($T_{EK} = (1/k^2) T_{\sigma\kappa}$, $T_{EK} \approx 0,8 \cdot T_{\sigma\kappa}$)
- Σύνθετη μέθοδος και εξοπλισμός

Με τη μέθοδο αυτή μας δίνεται η δυνατότητα να έχουμε ελαφρώς μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης απ' ό τι στην εκκίνηση με αντιστάσεις στο στάτη. Με τον αυτομετασχηματιστή η πλήρης τάση παρέχεται κλιμακωτά αφού ο κινητήρας έχει φτάσει την ονομαστική του ταχύτητα. Κατόπιν αποσυνδέουμε τον αυτομετασχηματιστή μέσω του διακόπτη διπλής ενέργειας Δ1 και συνδέουμε με τον κινητήρα απευθείας με το δίκτυο για την κανονική του λειτουργία.

Επειδή όπως αναφέρθηκε η ροπή εκκίνησης μειώνεται κατά k^2 , (όπου k ο λόγος μετασχηματισμού) ως προς την ροπή εκκίνησης με απευθείας σύνδεση, και η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε φορτία που δεν απαιτούν αυξημένη ροπή κατά την εκκίνηση. Σε αντίθετη περίπτωση ο κινητήρας δεν θα ξεκινήσει. Η εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή πλεονεκτεί ως προς την ροπή εκκίνησης σε σχέση την εκκίνηση με αντιστάσεις στον στάτη ως προς τη ροπή εκκίνησης την απόδοση και την ομαλότητα των μεταβολών.

Τελικά μπορούμε να πούμε ότι καμία παραπάνω από τις μεθόδους εκκίνησης δεν δίνει σημαντική ροπή κατά την εκκίνηση πλην εκείνης κατά την οποία αυξάνουμε την ολική αντίσταση στο δρομέα (η οποία όμως ισχύει μόνο για δακτυλιοφόρους κινητήρες). Η ελάττωση του βαθμού απόδοσης (η) τότε είναι αναπόφευκτη. Γι' αυτό τον λόγο οι κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα εκκινούν συνήθως εν κενώ.

2.1.5. Εκκίνηση με ηλεκτρονικό ρυθμιστή τάσης (soft starter)

Ο ηλεκτρονικός ρυθμιστής τάσης ή ομαλός εκκινητής (soft starter) αποτελεί μια από τις πιο σύγχρονες και αξιόπιστες ηλεκτρονικές συσκευές ελέγχου κινητήρων. Είναι κατάλληλος για την ελεγχόμενη ομαλή εκκίνηση αλλά και το σταμάτημα για το φρενάρισμα και την εξοικονόμηση ενέργειας κατά την λειτουργία των τριφασικών επαγωγικών κινητήρων.



Σχ. 2.9 Ηλεκτρονικός ρυθμιστής τάσης

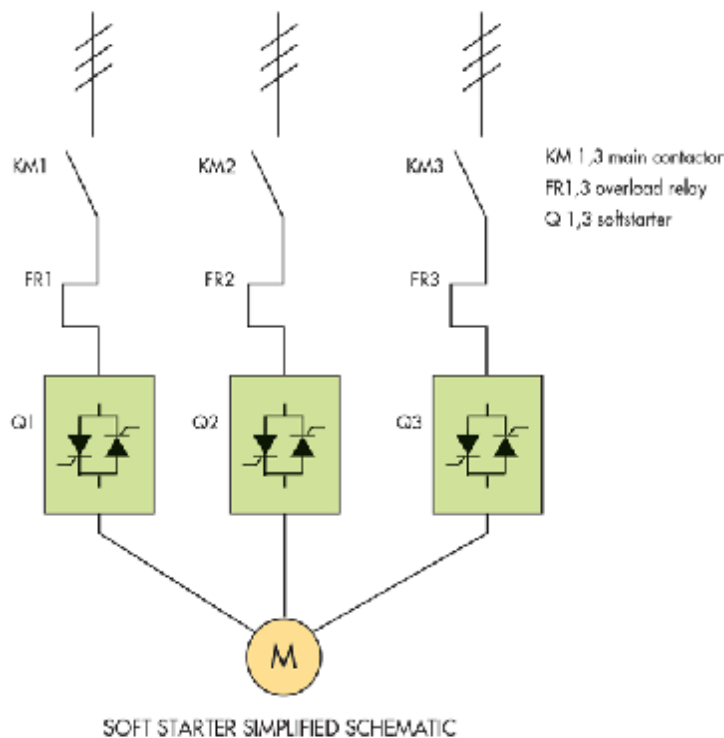
Λειτουργικά χαρακτηριστικά

- Ρεύμα εκκίνησης $I_{εκκ} \approx (2 \text{ έως } 5) \cdot I_{ον}$
- Ροπή εκκίνησης $T_{εκκ} \approx (0,5 \text{ έως } 1) \cdot T_{ον}$
- Δυνατότητα ρύθμισης των παραπάνω με τις ράμπες επιτάχυνσης και επιβράδυνσης

Τα κύρια πλεονεκτήματα των ομαλών εκκινητών είναι:

- Επιλογή της εκκίνησης ανάλογα με το είδος του φορτίου (ομαλή εκκίνηση με παλμό τάσης, ράμπα τάσης, περιορισμό τάσης και ρεύματος, καθώς επίσης και δυνατούς συνδυασμούς).
- Ποικιλία δυνατοτήτων φρεναρίσματος (π.χ. ελεύθερο σταμάτημα, ομαλό σταμάτημα, πέδηση συνεχούς ρεύματος).
- Ένδειξη καταστάσεων λειτουργίας και βλαβών
- Προστασία υπερθέρμανσης
- Διαθεσιμότητα συσκευών που διαθέτουν θύρα για επικοινωνία με PC ώστε σε συνδυασμό με το πρόγραμμα (software), να γίνει ακριβέστερη ρύθμιση των παραμέτρων καθώς και ο έλεγχος της συσκευής. Η δυνατότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρες (Dahlander), σε κινητήρες με μεταγωγή πόλων, συστήματα αιολικής ενέργειας καθώς και για σειριακή εκκίνηση κινητήρων με διαφορετική ισχύ ή φορτίο.

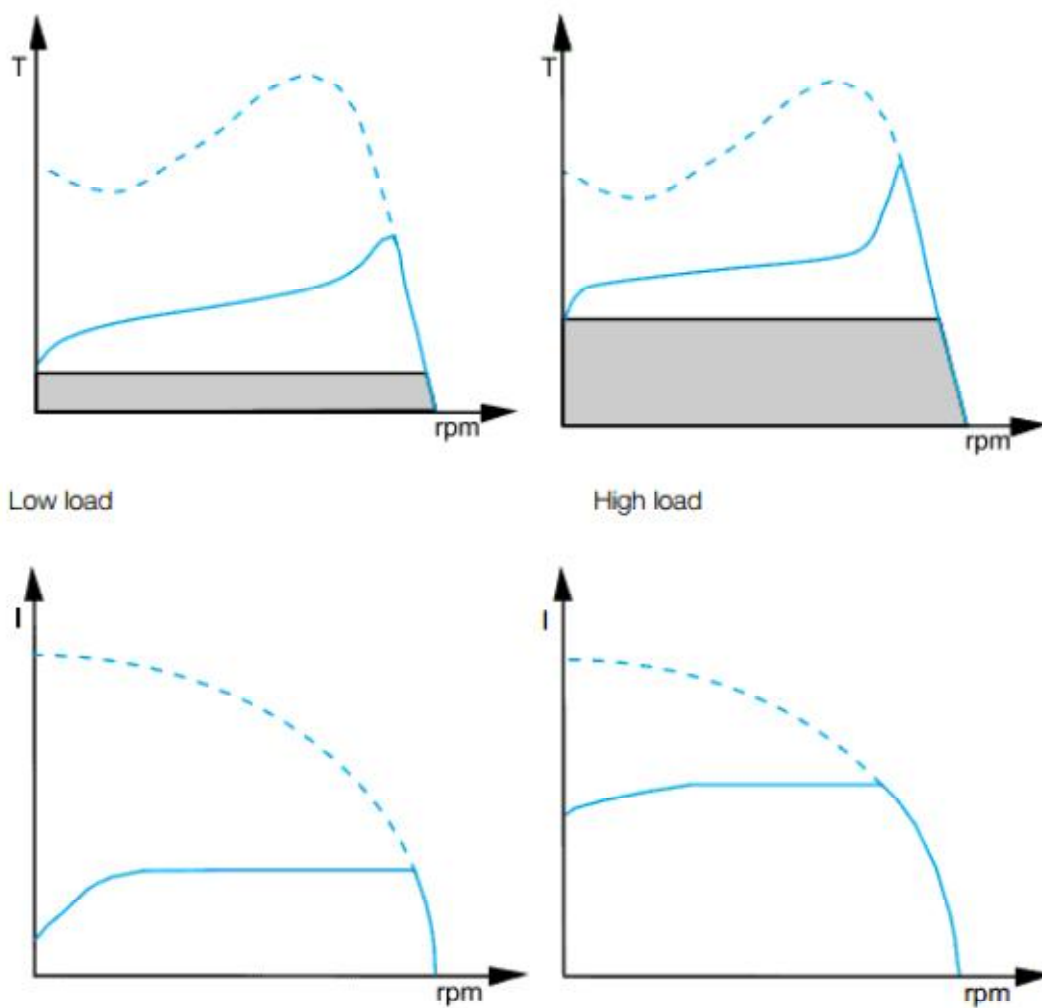
Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η δομή ενός τριφασικού ομαλού εκκινητή (soft starter) με θυρίστωρ.



Σχ. 2.10 Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικού ρυθμιστή τάσης

Κατά την εκκίνηση μειώνοντας την τάση του κινητήρα, το ρεύμα και η ροπή εκκινήσεως μειώνονται επίσης. Η ροπή της εκκίνησης είναι τόσο χαμηλή που δεν δημιουργεί μηχανική καταπόνηση μεταξύ των συνδέσεων του άξονα του κινητήρα (ηλεκτρομειωτήρες, αλυσίδες, ιμάντες) με το φορτίο. Ένα από τα πλεονεκτήματα του ομαλού εκκινητή είναι ότι προσαρμόζεται εύκολα στις ανάγκες του φορτίου είτε είναι πλήρες φορτίο είτε όχι

Στο παρακάτω σχήμα μπορούμε να δούμε επίσης τις χαρακτηριστικές ροπής-στροφών και ρεύματος-στροφών για μεγάλο φορτίο αλλά και για μικρό φορτίο στον άξονα.



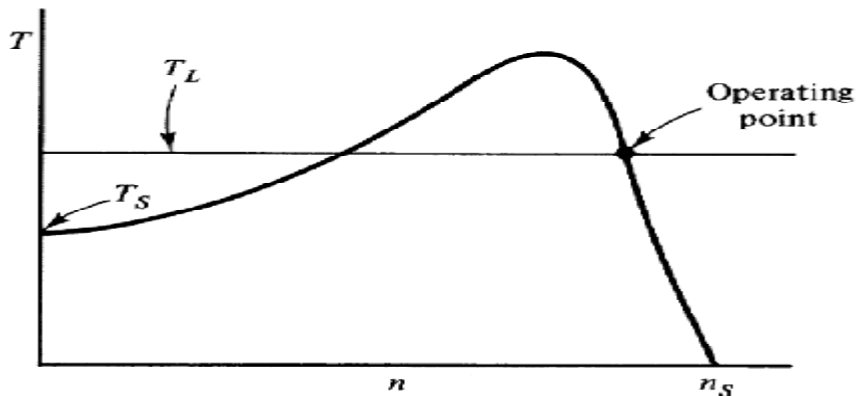
Torque and current curves when starting a low loaded motor and fully loaded motor using a softstarter.

Σχ. 2.11 Κυματομορφές ροπής-στροφών και ρεύματος-στροφών για χαμηλό και πλήρες φορτίο ομαλού εκκινητή

Τέλος χάρη στις πολλαπλές δυνατότητες ρύθμισης αλλά και τις ενσωματωμένες λειτουργίες που αναφέραμε πιο πάνω μπορούν να τοποθετηθούν σε πολλές εφαρμογές όπως αντλίες, συμπιεστές, εξαεριστήρες, ανεμιστήρες καθώς και μεταφορικές ταινίες, σπαστήρες, μύλους αναδευτήρες, μηχανήματα λείανσης, μηχανές όλκησης/υφαντουργικά, πρέσες, εργαλειομηχανές.

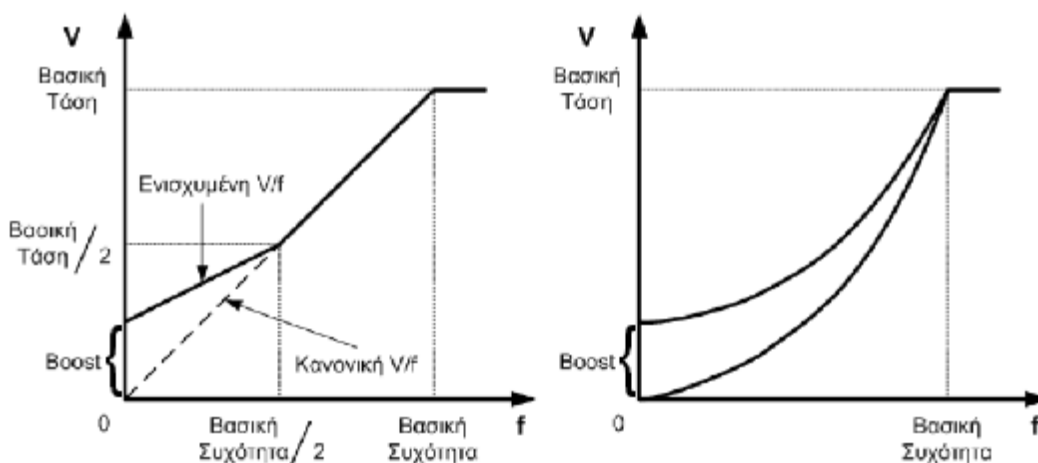
2.1.6 Αντιστροφέας (inverter)

Συχνά σε βιομηχανικές εφαρμογές υπάρχει η απαίτηση για μεγάλη ροπή κατά την εκκίνηση του επαγωγικού κινητήρα. Ένα σημαντικό πρόβλημα, που σχετίζεται με τους εκκινήτες που μειώνουν την τάση, είναι η μείωση της ροπής εκκίνησης. Η ροπή που παράγεται από έναν επαγωγικό κινητήρα είναι, για κάθε ταχύτητα, συνάρτηση του τετραγώνου της τάσης. Έτσι, τροφοδότηση του κινητήρα με τάση ίση με το μισό της ονομαστικής, οδηγεί σε μείωση της ροπής εκκίνησης κατά $\frac{3}{4}$. Το σχήμα 2.12 δείχνει ένα φορτίο με σταθερή οριζόντια καμπύλη T - n , όπως πχ. ένας μεταφορικός ιμάντας. Από την υπέρθεση των 2 καμπυλών, φαίνεται ότι ενώ ο κινητήρας δεν έχει πρόβλημα να κινήσει το φορτίο, δεν διαθέτει την απαιτούμενη ροπή εκκίνησης του φορτίου από την ηρεμία.



Σχήμα 2.12. Προβλήματα με ανάπτυξη ικανοποιητικής ροπής εκκίνησης επαγωγικού κινητήρα.

Σε αυτό το πρόβλημα έρχονται να δώσει λύση ο αντιστροφέας με την παράμετρο της ενίσχυσης της τάσης (boost). Με την παράμετρο της ενίσχυσης έχουμε τη δυνατότητα να αυξάνουμε την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα, χωρίς να μεταβάλλεται η συχνότητα δηλαδή να μεταβάλλουμε τον λόγο v/f . Η ενίσχυση (boost) μπορεί να ενισχύσει την τάση εκκίνησης έως και το 50% της βασικής τάσης ($U_N/4$) όπως μπορούμε να δούμε και στο παρακάτω σχήμα (2.13).



Σχήμα 2.13 Ενίσχυση τάσης στις χαμηλές συχνότητες

Έτσι με αυτή την παράμετρο/λειτουργία του αντιστροφέα μπορούμε να εκκινήσουμε εφαρμογές/φορτία που απαιτούν μεγάλη ροπή κατά την εκκίνηση χωρίς να χρειαστεί το φορτίο να συμπλεχθεί με τον κινητήρα όταν αυτός αποκτήσει την κατάλληλη ταχύτητα

περιστροφής με χρήση κάποιας ειδικής διάταξης. Όμως η παράμετρος αυτή της ενίσχυσης χρειάζεται προσοχή γιατί μία υπερβολική ενίσχυση θα οδηγήσει σε αύξηση του ρεύματος, η οποία θα ενεργοποιήσει πιθανά τον περιοριστή ρεύματος με συνέπεια τη διακοπή της τροφοδοσίας.

Λειτουργικά χαρακτηριστικά

- Μικρό ρεύμα εκκίνησης
- Δυνατότητα αύξησης της ροπής εκκίνησης με ενίσχυση της τάσης έως και 50% (boost) που δίνει την δυνατότητα εκκίνησης υπό φορτίο.
- Δυνατότητα ρύθμισης των παραπάνω μεγεθών με τις ράμπες επιτάχυνσης και επιβράδυνσης

2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Όταν ένας τριφασικός επαγωγικός κινητήρας τροφοδοτείται από το δίκτυο σταθερής τάσης και συχνότητας, στρέφεται με μια ταχύτητα η οποία είναι λίγο μικρότερη από τη σύγχρονη. Η μεταβολή της ταχύτητας σε σχέση με τη σύγχρονη εξαρτάται από το φορτίο. Η λειτουργία του κινητήρα με μειωμένη ταχύτητα σημαίνει αύξηση της ολίσθησης, αύξηση των απωλειών χαλκού στο δρομέα ($P_{cur} = s \cdot P_{ag}$), με συνέπεια τη μείωση του βαθμού απόδοσης. Οι απαιτήσεις των εφαρμογών για ομαλή εκκίνηση, περιοχή ελέγχου, οικονομική λειτουργία, ικανοποιούνται για ένα εύρος μεταβολής της ολίσθησης γύρω στο 5%. Πέρα από το όριο αυτό η ταχύτητα είναι ανάλογη του φορτίου.

Ετσι λοιπόν η επιλογή του επαγωγικού κινητήρα σε εφαρμογές μεταβλητής ταχύτητας δεν είναι η καλύτερη αν δεν αντιμετωπισθούν τα προβλήματα αυτά. Τα προβλήματα αυτά έρχονται να επιλύσουν σύγχρονα μέσα οδήγησης των κινητήρων αυτών που θα αναφερθούν στη συνέχεια.

Οι κύριες μεθοδολογίες ελέγχου της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων είναι::

- Μεταβολή Ολίσθησης
- Μεταβολή της Σύγχρονης Ταχύτητας

2.2.1 Μεταβολή Ολίσθησης

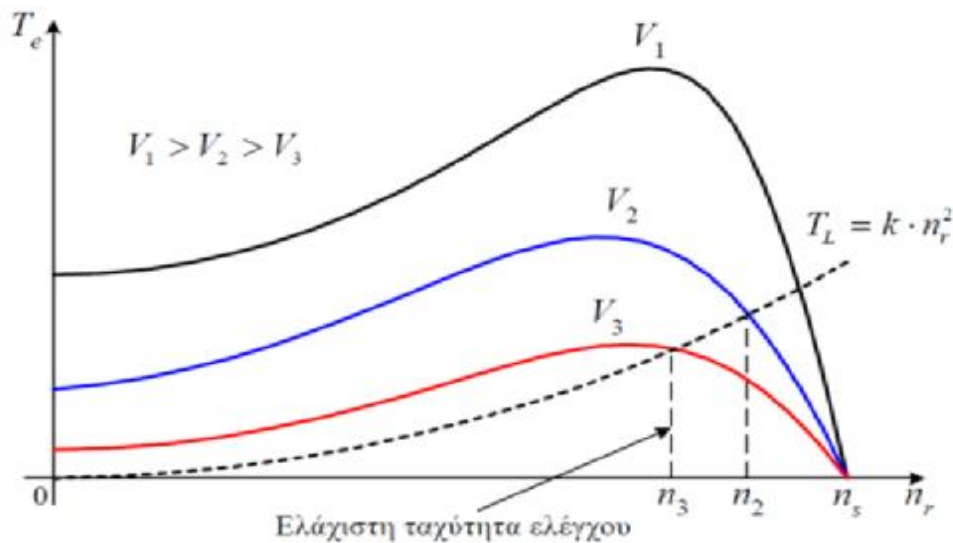
Σε έναν επαγωγικό κινητήρα η ρύθμιση της ταχύτητας με μεταβολή της ολίσθησης περιλαμβάνει δυο μεθόδους: :

- Μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας
- Μεταβολή της αντίστασης του δρομέα (για κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα)

2.2.1.1 Μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας

Στους επαγωγικούς κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού, η ρύθμιση της ολίσθησης (ταχύτητας) επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας. Η συχνότητα των τάσεων είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα του δικτύου. Καθώς η ροπή που αναπτύσσει ο επαγωγικός κινητήρας είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης, η χαρακτηριστική ροπής–ταχύτητας μεταβάλλεται όπως στο σχήμα 2.14, για διάφορες τιμές της τάσης. Στο ίδιο σχήμα γίνεται φανερό ότι, η ταχύτητα του κινητήρα δεν μπορεί να ελεγχθεί σε μεγάλο εύρος τιμών δηλαδή σε τιμές πολύ μικρότερες από τη σύγχρονη. Η ελάχιστη δυνατή ταχύτητα είναι η n_3 , που αντιστοιχεί στη ροπή ανατροπής για τάση $1/\sqrt{3}$. Ακόμη, το ρεύμα του κινητήρα είναι

ανάλογο της τάσης. Ο λόγος ροπής προς ρεύμα, η μέγιστη ροπή, ο συντελεστής ισχύος και ο βαθμός απόδοσης, μειώνονται επίσης με τη μείωση της ταχύτητας.



Σχ. 2.14 Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, με τη μεταβολή της τάσης

Ο έλεγχος στροφών μέσω της μεταβολής της τάσης δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός, και χρησιμοποιείται κυρίως σε συστήματα ψύξης, αντλίες, φερωτές, εξαερισμούς καθώς η ροπή για τις εφαρμογές αυτές θα πρέπει να είναι ικανοποιητική.

Ο έλεγχος της τάσης στα τυλίγματα του στάτη επιτυγχάνεται με κατάλληλους μετατροπείς ισχύος, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλουν την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα.

Τριφασικός ρυθμιστής εναλλασσόμενης τάσης

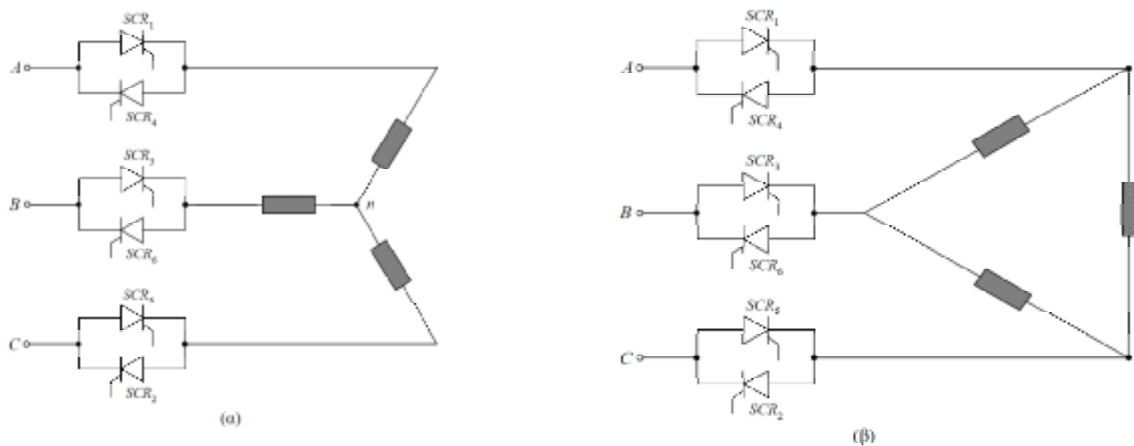
Ο ρυθμιστής αποτελείται από έξι ελεγχόμενους ανορθωτές πυριτίου (SCR), οι οποίοι συνδέονται ανά δύο αντιπαράλληλα. Σε μικρές ισχύεις χρησιμοποιούνται ως διακόπτες τρία TRIAC, στη θέση των έξι SCR. Το TRIAC συμπεριφέρεται όπως δύο αντιπαράλληλοι ελεγχόμενοι ανορθωτές πυριτίου, όμως έχει ικανότητα χειρισμού χαμηλής ισχύος. Οι SCR δέχονται παλμούς έναυσης με τη σειρά αρίθμησής τους και με διαφορά φάσης 60 μοίρες.

Η κυκλωματική δομή του τριφασικού ρυθμιστή εναλλασσόμενης τάσης εικονίζεται στα παρακάτω σχήματα. Τα τυλίγματα του κινητήρα μπορεί να είναι σε σύνδεση αστέρα ή τριγώνου (σχήμα 2.15 α,β).

Οι ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης χρησιμοποιούνται συνήθως στον έλεγχο της ταχύτητας επαγωγικών κινητήρων κλάσης D, σε εφαρμογές αντλιών και ανεμιστήρων, όπου δεν απαιτείται έλεγχος της ταχύτητας σε χαμηλές τιμές. Όπως προαναφέρθηκε η κυριότερη εφαρμογή τους είναι στην εκκίνηση των επαγωγικών κινητήρων όλων των κατηγοριών, οπότε ονομάζονται soft starters. Οι ηλεκτρονικοί εκκινητές έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους (με αυτομετασχηματιστή ή διακόπτη αστέρα-τριγώνου) όπως είναι ο έλεγχος του ρεύματος, η μειωμένη συντήρηση, και η προστασία από έλλειψη ή ασυμμετρία των φάσεων

Επιπλέον, ένας εκκινητής με ρυθμιστή εναλλασσόμενης τάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την ελαχιστοποίηση των απωλειών του επαγωγικού κινητήρα, λειτουργώντας τον κινητήρα με μειωμένη τάση σε μικρά φορτία. Ως γνωστόν ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί με το μέγιστο βαθμό απόδοσης στο ονομαστικό φορτίο, όπου η κατανομή των επιμέρους

απωλειών του είναι η βέλτιστη. Όταν το φορτίο μειώνεται, η βέλτιστη κατανομή των απωλειών διαταράσσεται και ο βαθμός απόδοσης μειώνεται. Μεταβάλλοντας όμως την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα ανάλογα με το φορτίο του, ώστε η μαγνητική ροή στο διάκενο να έχει πάντα τη βέλτιστη τιμή, επιτυγχάνουμε το μέγιστο βαθμό απόδοσης. Η βέλτιστη τιμή της μαγνητικής ροής εξαρτάται από το φορτίο και την ταχύτητα του κινητήρα.



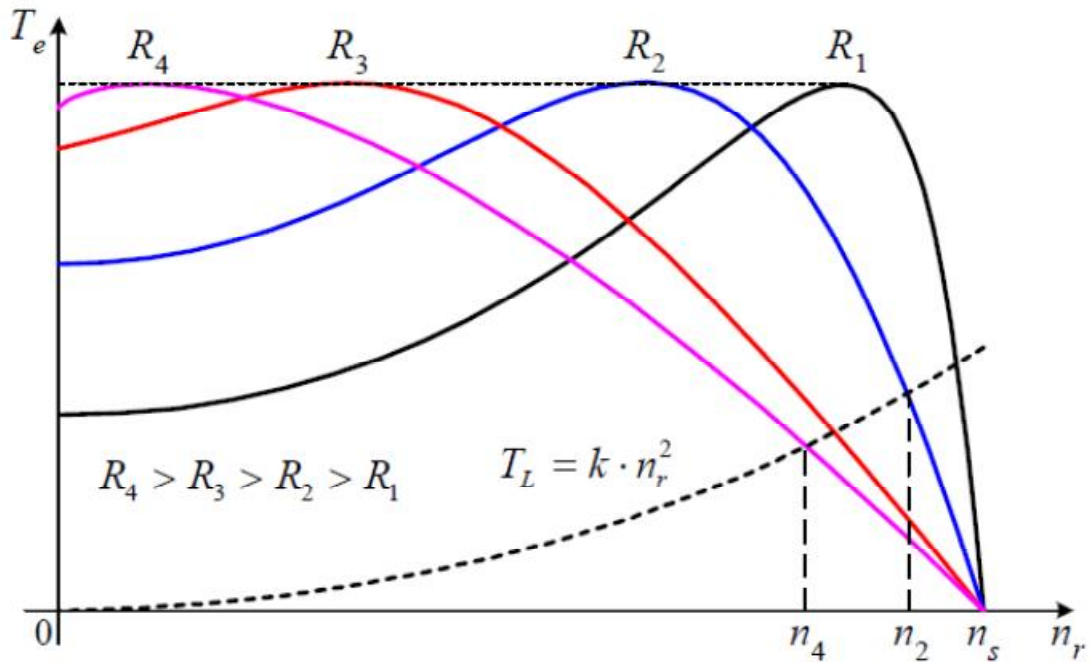
Σχήμα 2.15 Τριφασικός ρυθμιστής εναλλασσόμενης τάσης, με φορτίο σε σύνδεση αστέρα (α) και τρίγωνο (β)

2.2.1.2 Μεταβολή της αντίστασης του δρομέα

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται μόνο σε επαγωγικούς κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα. Η ταχύτητα ρυθμίζεται με την εισαγωγή μεταβλητών αντιστάσεων στο τύλιγμα του δρομέα. Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλοντας τις αντιστάσεις που έχουν συνδεθεί στο δρομέα μεταβάλλεται η μορφή της χαρακτηριστικής ροπής–ταχύτητας του κινητήρα. Στο παρακάτω σχήμα εικονίζονται οι χαρακτηριστικές του κινητήρα για τέσσερις διαφορετικές τιμές της αντίστασης του δρομέα, μαζί με τη χαρακτηριστική του φορτίου η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας.

Η μεταβολή της ταχύτητας με τη μεταβολή των αντιστάσεων είναι φανερή. Η ταχύτητα του κινητήρα μειώνεται από την τιμή $n/2$ όταν $R_r = R_2$ και στην τιμή $n/4$ όταν $R_r = R_4$.

Η χαρακτηριστική φορτίου αυτής της μεθόδου είναι πολύ κοινή και συναντάται σε αντλίες, τους ανεμιστήρες και τα ανυψωτικά (*pump, fan, crane*). Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι η μείωση του βαθμού απόδοσης της διάταξης με τη μείωση της ταχύτητας, εξαιτίας της κατανάλωσης ενέργειας στις εξωτερικές αντιστάσεις, αλλά και η μικρή μεταβολή της ταχύτητας σε σχέση με τη μεταβολή του φορτίου.



Σχ. 2.16 Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με δακτυλιοφόρο δρομέα, με τη μεταβολή των αντιστάσεων του δρομέα

2.2.2. Μεταβολή Σύγχρονης Ταχύτητας

Η μεταβολή της σύγχρονης ταχύτητας μπορεί να επιτευχθεί με:

- Μεταβολή του αριθμού των πόλων
- Μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας

Όπως χαρακτηριστικά δείχνει και η σχέση:

$$n_s = f/P \text{ όπου}$$

f : η συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας σε Hz και

P: ο αριθμός ζευγών πόλων

2.2.2.1 Μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας

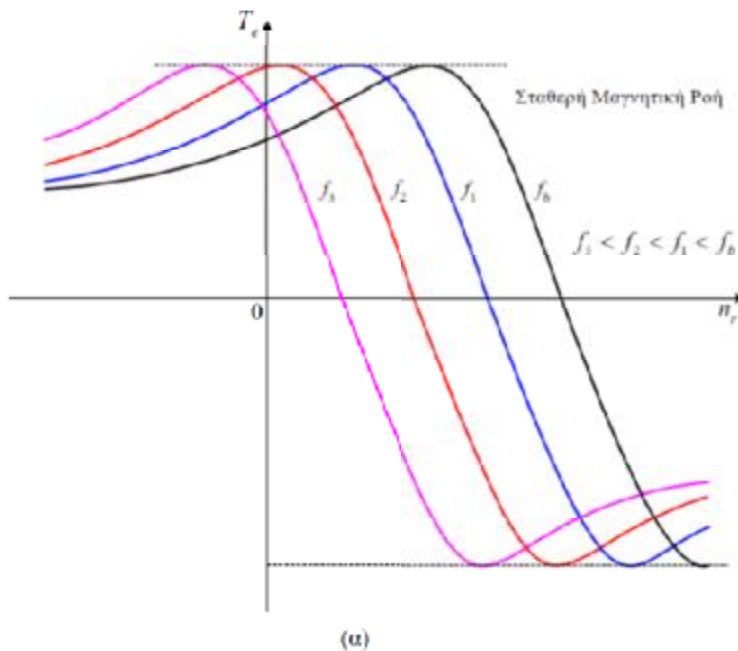
Η βέλτιστη μέθοδος για τον έλεγχο της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων κάθε είδους, είναι με τη ρύθμιση της συχνότητας τροφοδοσίας. Έτσι, μεταβάλλεται η σύγχρονη ταχύτητα, δηλαδή η ταχύτητα περιστροφής των μαγνητικών πεδίων και μαζί τους η ταχύτητα του κινητήρα. Η σύγχρονη ταχύτητα που αντιστοιχεί στην ονομαστική συχνότητα f_b , που ονομάζεται και βασική (base).

Το εύρος των τιμών ρύθμισης της συχνότητας συνήθως εκτείνεται από το 5% της βασικής συχνότητας μέχρι το διπλάσιο αυτής, με το άνω όριο να περιορίζεται από τη μηχανική αντοχή του κινητήρα. Εκτός από την ευρεία περιοχή ρύθμισης της ταχύτητας, η μέθοδος εξασφαλίζει τη λειτουργία του κινητήρα με μικρή ολίσθηση σε κάθε ταχύτητα. Έτσι, ο βαθμός απόδοσης διατηρείται υψηλός.

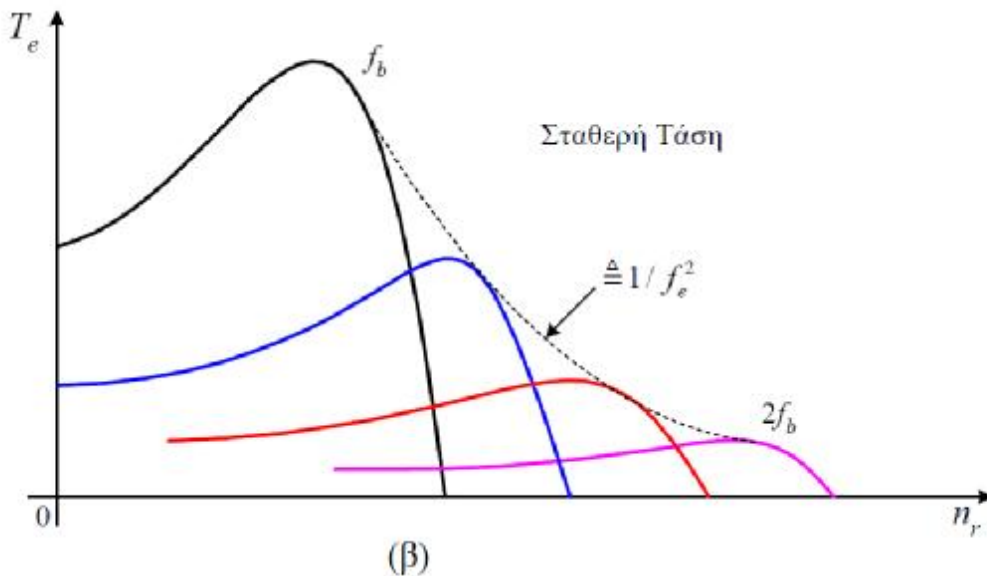
Στην ονομαστική ταχύτητα, ο κινητήρας τροφοδοτείται με την ονομαστική τάση και τη βασική συχνότητα. Όταν η ταχύτητα του κινητήρα ρυθμίζεται σε τιμές μικρότερες της βασικής, η μείωση της συχνότητας πρέπει να συνοδεύεται από αντίστοιχη μείωση της τάσης για να αποφευχθεί ο κορεσμός του πυρήνα του στάτη και η υπερβολική αύξηση του ρεύματος μαγνήτισης του κινητήρα. Το πλάτος της τάσης μεταβάλλεται γραμμικά με τη συχνότητα και ο λόγος της τάσης προς τη συχνότητα V/f διατηρείται σταθερός. Με τον τρόπο αυτό η μαγνητική ροή στο διάκενο του κινητήρα παραμένει περίπου σταθερή ($\Phi_m = E / f$). Στο σχήμα 2.17 εικονίζονται οι χαρακτηριστικές ροπής–ταχύτητας του κινητήρα, σε διάφορες συχνότητες μικρότερες από τη βασική, όταν μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή.

Παρατηρούμε ότι το μέγεθος της ροπής ανατροπής (μέγιστη ροπή), δεν μεταβάλλεται με τη μεταβολή της συχνότητας. Έτσι, ο κινητήρας μπορεί να ελέγξει φορτία, τα οποία απαιτούν μεγάλη ροπή σε μικρές ταχύτητες. Επιπλέον, η δυναμική συμπεριφορά του κινητήρα είναι εξαιρετική.

Για την αύξηση της ταχύτητας, σε τιμές πέρα από την ονομαστική τιμή, η συχνότητα γίνεται μεγαλύτερη από τη βασική. Όμως, η τάση τροφοδοσίας θα πρέπει να διατηρείται σταθερή στην ονομαστική τιμή, για την προστασία της μόνωσης των τυλιγμάτων. Επειδή η τάση δεν ακολουθεί την αύξηση της συχνότητας, η μαγνητική ροή μειώνεται καθώς η συχνότητα αυξάνει με αποτέλεσμα τη μείωση της μέγιστης ροπής (ροπή ανατροπής) κατά το τετράγωνο της συχνότητας, όπως εικονίζεται στο σχήμα 2.18 που ακολουθεί.



Σχήμα 2.17 Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με τη μεταβολή της συχνότητας, σε τιμές μικρότερες από τη βασική, με σταθερή τη μαγνητική ροή



Σχήμα 2.18 Έλεγχος της ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα με τη μεταβολή της συχνότητας, σε τιμές μεγαλύτερες από τη βασική, με σταθερή την τάση.

Αν και η μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας με τη ρύθμιση της συχνότητας προσφέρει πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά λειτουργίας απ' όλες τις άλλες μεθόδους, η χρήση της έχει γενικευτεί μόλις τα τελευταία χρόνια. Αυτό οφείλεται στην κατασκευή των κατάλληλων μετατροπέων ισχύος, οι οποίοι ονομάζονται αντιστροφείς (inverters), με λογικό κόστος και υψηλή αξιοπιστία.

I. Αντιστροφείς (inverter)

Ο αντιστροφείς είναι ηλεκτρονική διάταξη ισχύος που σκοπό τη μετατροπή μιας συνεχούς τάσης ή πηγής συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενη τάση με μεταβλητή συχνότητα και πλάτος, και για το λόγο αυτό πολλές φορές αναφέρονται και ως μετατροπείς D.C./A.C. Μία ολοκληρωμένη μονάδα αντιστροφή περιλαμβάνει τον ελεγχόμενο ανορθωτή, τάσης, το φίλτρο, τον αντιστροφή τάσης και τη μονάδα έλεγχου. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η δομή του.



Σχήμα 2.19 Δομικό διάγραμμα αντιστροφή

Αναλυτικότερα η μονάδα αντιστροφή περιλαμβάνει:

- Ανορθωτική διάταξη. Αποτελείται από διόδους ή θυρίστορ. Σκοπός της διάταξης είναι η μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου σε μια συνεχή τάση με ρυθμιζόμενη τιμή.
- Φίλτρο. Αποτελείται από μια συστοιχία πυκνωτών και πηνίων. Σκοπός του φίλτρου είναι να εξομαλύνει την συνεχή τάση του ανορθωτή.

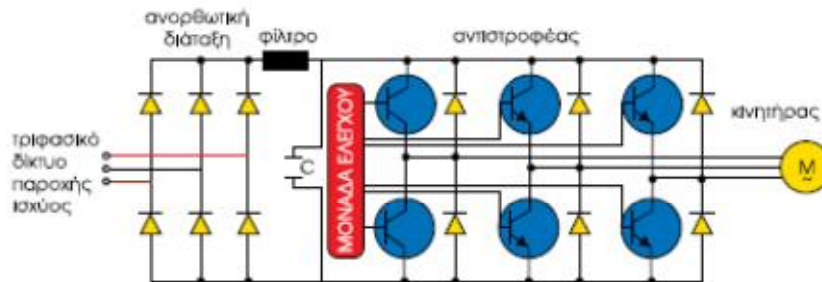
-Αντιστροφέας. Τροφοδοτείται από την συνεχή τάση που εξομαλύνθηκε. Σκοπός είναι να μετατρέψει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη μεταβλητής συχνότητας και πλάτους. Αποτελείται από έναν πυκνωτή για την διατήρηση/σταθερότητα της τάσης, διακοπτικά στοιχεία όπως θυρίστορ ή τα Bipolar Junction Transistors (BJTs), Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs), Power Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (Power MOSFETs) Ο τύπος τους καθορίζεται κυρίως από την ισχύ και τη συχνότητα λειτουργίας.

-Μονάδα οδήγησης και έλεγχου. Επικοινωνεί με όλα τα τμήματα εποπτεύει και ελέγχει τη λειτουργία της όλης μονάδας Περιλαμβάνει συχνά ένα μικροεπεξεργαστή στη μνήμη που μας επιτρέπει να εγγράψουμε διάφορες ρυθμίσεις ώστε να αναγνωρίζει τα χαρακτηριστικά του κινητήρα και να αυτοπροσαρμόζεται, δηλαδή να δίνει επιπλέον ροπή εκκίνησης όταν ζητηθεί από το φορτίο.

Γενικά η μονάδα/συσσκευή οδήγησης έχει τη δυνατότητα να ρυθμίζει κατάλληλα μεγέθη ώστε να λαμβάνονται τα επιθυμητά αποτελέσματα. Τα μεγέθη αυτά είναι:

- Η συχνότητα ή η ταχύτητα Η ρύθμιση γίνεται συνήθως με κάποιο εξωτερικό σήμα ελέγχου χειροκίνητα (σασί) ή με τη βοήθεια Η/Υ από τον
- Η μορφή της τάσης και της συχνότητας από την συσκευή οδήγησης η οποία έχει τη δυνατότητα παραγωγής ενός μεγάλου αριθμού καμπυλών τάσης-συχνότητας οπότε ανάλογα με τις απαιτήσεις του φορτίου επιλέγεται η κατάλληλη καμπύλη.
- Η επιτάχυνση ή επιβράδυνση για τον περιορισμό τους σε καθορισμένα επίπεδα ασφαλείας.
- Προστασία για την διακοπή της λειτουργίας όταν ανιχνευτούν προβλήματα, όπως υπερτάσεις, υποτάσεις, στιγμιαία υπερέυματα τα οποία θα μπορούσαν να βλάψουν τον κινητήρα.

Στο παρακάτω σχήμα μπορούμε να δούμε το κύκλωμα ισχύος ενός αντιστροφέα αποτελούμενος από διπολικά τρανζίστορ.



Σχήμα 2.20 Κύκλωμα ισχύος αντιστροφέα

Η παρουσία των διόδων είναι απαραίτητη για τις περιπτώσεις που έχουμε επαγωγικό φορτίο, διότι εξασφαλίζουν την κυκλοφορία της άεργης ισχύος καθώς και σε περιπτώσεις πέδησης, όπου έχουμε ροή ρεύματος αντίθετης φοράς από εκείνη των ελεγχόμενων διακοπτικών στοιχείων του αντιστροφέα.

Ο μετατροπέας αυτός εμφανίζει μεγάλες απώλειες στα διακοπτικά στοιχεία λόγω της μεγάλης διακοπτικής συχνότητας, αυξάνει σημαντικά την τάξη των αρμονικών της τάσης εξόδου του με αποτέλεσμα να αυξάνεται η επίδραση τους στη λειτουργία της μηχανής. Ακόμη, απαιτεί πολύ γρήγορα διακοπτικά στοιχεία, γι' αυτό συνήθως χρησιμοποιούνται MOSFETs και IGBTs.

Λειτουργικά χαρακτηριστικά

- Ομαλή εκκίνηση
- Ομαλή πέδηση
- Μικρό ρεύμα εκκίνησης
- Αύξηση της ροπής εκκίνησης (αν το απαιτεί η εφαρμογή)
- Αυτόματη ή προγραμματισμένη ρύθμιση
- Πλήρης έλεγχος στροφών
- Δυνατότητα αλλαγής φόρας περιστροφής χωρίς διακόπτες
- Προστασία κινητήρα
- Εξοικονόμηση ενεργείας

Συνήθεις βιομηχανικές εφαρμογές –συστήματα που οδηγούνται με τη βοήθεια inverter, συναντάμε σε μονάδες όπως :παρασκευή και επεξεργασία χαρτιού, επεξεργασία ξυλείας και μαρμάρου, μεταφορικές ταινίες, αντλίες, ανεμιστήρες, συμπιεστές, κλπ

Χρησιμοποιούμενα Διακοπτικά στοιχεία

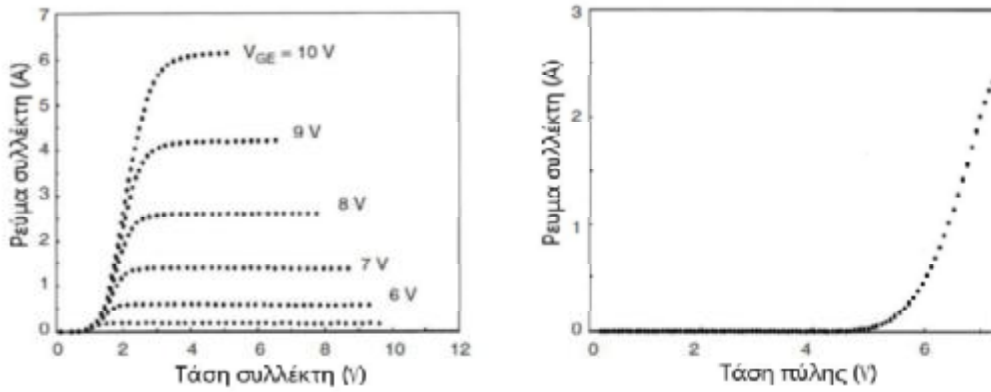
Η ανάλυση των διακοπτικών στοιχείων που ακολουθεί έχει στόχο να αναδείξει τα πλεονεκτήματα τους σε σχέση με το θυρίστορ και η γνώση αυτή να συμβάλει στην κατάλληλη επιλογή του αντιστροφέα.

1. Διπολικό τρανζίστορ επαφής (Bipolar Junction Transistor – BJT)

Γνωστό και σαν ενισχυτής σήματος. Αποτελεί ένα από τα πιο δημοφιλή διακοπτικά στοιχεία, γεγονός που οφείλεται στην ευκολία έναυσης και σβέσης του, με εφαρμογή ή αποκοπή σήματος στην βάση. Το μεγάλο του μειονέκτημα είναι ότι δεν μπορούν να υφίστανται μεγάλες αναστροφές τάσεις πάνω του, γεγονός που αποκλείει την χρήση του σε εφαρμογές διαμόρφωσης ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος, εκτός αν συνδιαστούν με κύκλωμα με διόδους σε σειρά. Η διακοπτική του ικανότητα είναι μεγάλη καθώς επιτρέπει συχνότητες έως και δεκαπλάσιες από αυτές των θυρίστορ, αλλά υστερεί στην ισχύ που μπορεί να διαχειριστεί. Έτσι βρίσκει εφαρμογή κυρίως σε αντιστροφείς και μετατροπής μικρής ισχύος.

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

Το IGBT συνδιάζει τα χαρακτηριστικά του MOSFET και του BJT. Η λειτουργία του στηρίζεται στην έναυση του στοιχείου με την εφαρμογή θετικής τάσης στην πύλη, ενώ με την αφαίρεση τούτης επέρχεται η σβέση του. Η συχνότητα που μπορεί να λειτουργήσει το IGBT είναι της τάξης των 50kHz και η ισχύ μερικά kW. Τείνει να αντικαταστήσει τα BJT καθώς είναι πιο εύκολο στην οδήγηση. Τα IGBT χρησιμοποιούνται έναντι των MOSFET σε εφαρμογές υψηλής τάσης με λιγότερες απώλειες. Επίσης αποτελούνται από λιγότερο πυρίτιο πράγμα το οποίο οδηγεί στην φθηνότερη κατασκευή τους. Η χαρακτηριστική του IGBT φαίνεται στο σχήμα 2.39. Τα Διπολικό τρανζίστορ μονωμένης πύλης χρησιμοποιούνται στους περισσότερους αντιστροφέας που κυκλοφορούν στην αγορά.

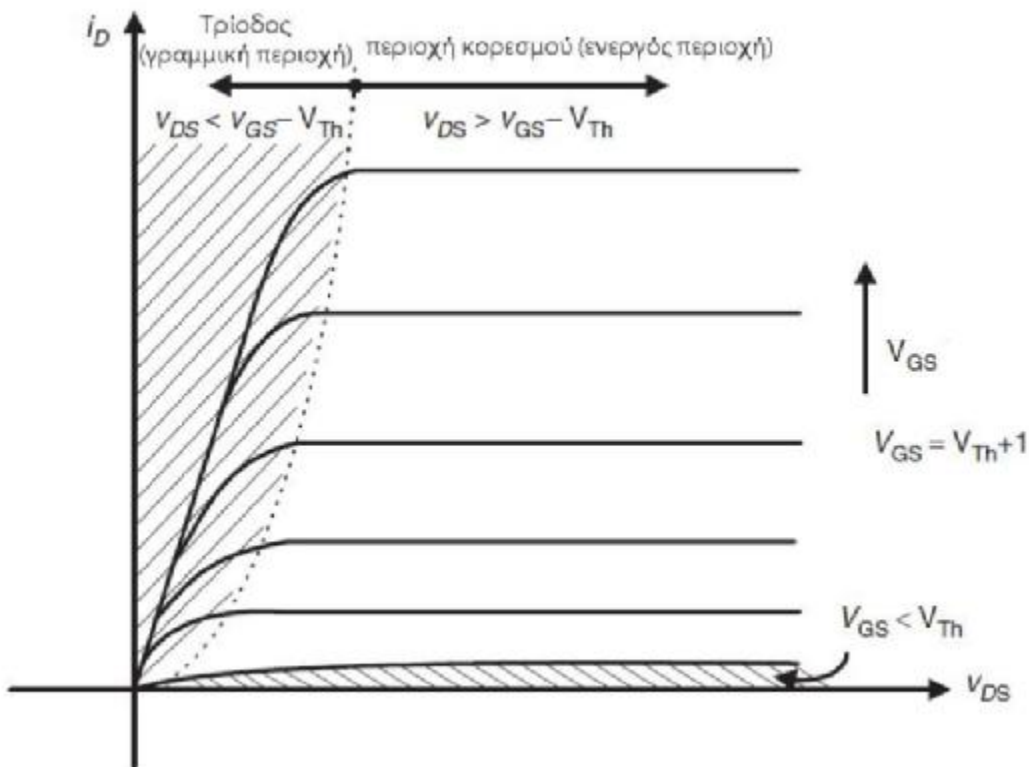


Σχήμα 2.21 Χαρακτηριστική αγωγής και χαρακτηριστική μεταφοράς IGBT

3. MOSFET

Αντίθετο με τα BJT τα MOSFET ανήκουν στην κατηγορία των μονοπολικών τρανζίστορ καθώς χρησιμοποιούν μόνο τους φορείς πλειονότητας όταν άγουν. Τα mosfet έχουν 3 ηλεκτρόδια - ακροδέκτες - την πύλη την εκροή και την πηγή. Στο σχήμα 2.22 φαίνεται η χαρακτηριστική $i-v$.

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



Σχήμα 2.22 Η χαρακτηριστική καμπύλη του MOSFET

II. Κυκλομετατροπείας

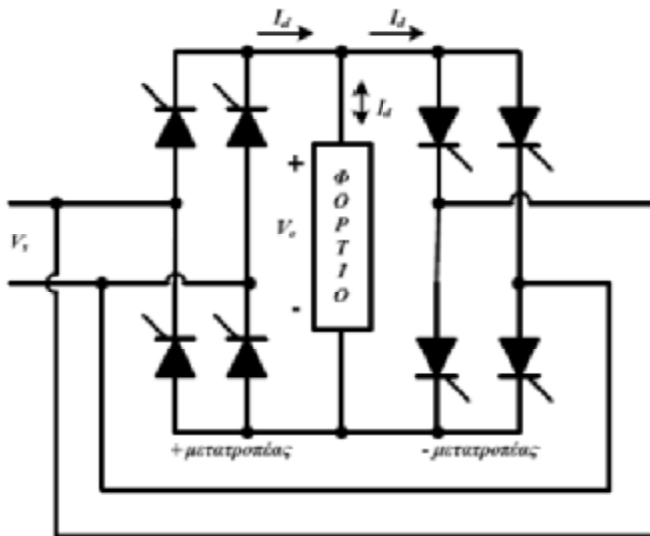
Ενας άλλος μετατροπείας ισχύος με έλεγχο της συχνότητας είναι και ο κυκλομετατροπείας.

Ένας κυκλομετατροπείας μετατρέπει την εναλλασσόμενη τάση εισόδου του σε εναλλασσόμενη τάση στην έξοδό του, αλλά διαφορετικής συχνότητας, χωρίς να απαιτείται ενδιάμεση βαθμίδα μετατροπής της τάσης σε συνεχή (dc) όπως στον αντιστροφέα). Η αρχή λειτουργίας των κυκλομετατροπείων βασίζεται στο συνδυασμό των γωνιών έναυσης των θυρίστορ στο διάστημα μιας ή περισσότερων διαδοχικών περιόδων της εναλλασσόμενης τάσης εισόδου, ώστε να επιτύχουμε τη θεμελιώδη αρμονική της τάσης εξόδου που μπορεί να ελεγχθεί με μεταβολή της γωνίας έναυσης α , για να επιτυγχάνουμε τελικά την επιθυμητή τιμή πλάτους και συχνότητας της τάσης εξόδου. Η λειτουργία με σταθερή γωνία έναυσης α δίνει μια κυματομορφή της τάσης εξόδου με πολλές αρμονικές συνιστώσες.

Οι κυκλομετατροπείες χωρίζονται σε δυο κατηγορίες ανάλογα με την εφαρμογή που θέλουμε να εκτελέσουμε :

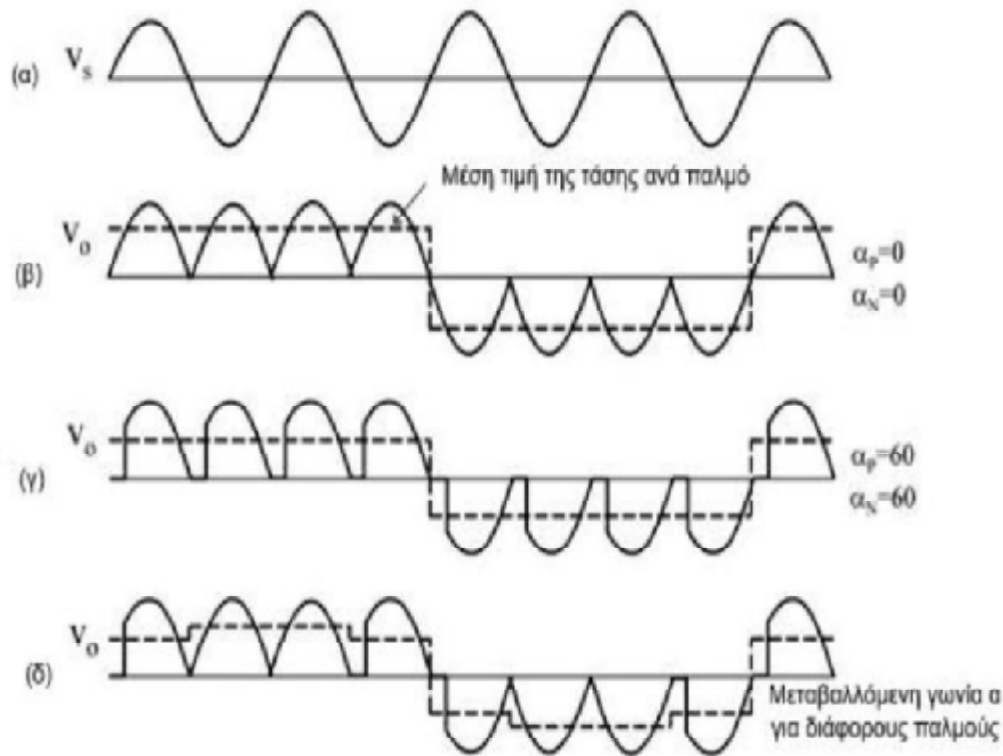
- κυκλομετατροπεία μείωσης συχνότητας (step-down cycloconverter), αν η συχνότητα της τάσης εξόδου είναι μικρότερη της συχνότητας της τάσης εισόδου
- κυκλομετατροπεία ανύψωσης (step-up cycloconverter), αν αυξάνεται η συχνότητα της τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου.

Η υλοποίηση του συστήματος ελέγχου ενός κυκλομετατροπείας είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη κι η εφαρμογή τους στον έλεγχο κυρίως σερβοκινητήριων συστημάτων είναι πολύ περιορισμένη. Για να καταλάβουμε την αρχή λειτουργίας του κυκλομετατροπείας, θα ξεκινήσουμε με τον απλούστερο, από μονοφασικό σε μονοφασικό (1φ-1φ) κυκλομετατροπείας. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένας κυκλομετατροπείας ανύψωσης της συχνότητας και αποτελείται από μια αντιπαράλληλη σύνδεση δύο κυκλωμάτων ανορθωτών γέφυρας.



Σχήμα 2.23 Κυκλομετατροπείας (1φ-1φ)

Αν υποθέσουμε ότι ο κυκλομετατροπείας λειτουργεί με ωμικό φορτίο τότε η τάση εισόδου V_s είναι εναλλασσόμενη στη συχνότητα f_1 , όπως δείχνει το σχήμα 2.24α. Οι κυματομορφές αυτές έχουν παραχθεί για διάφορες γωνίες έναυσης των θυρίστορ. Σημειώνεται ότι οι γωνίες έναυσης συμβολίζονται με α_p για το θετικό μετατροπείας (ανορθωτή) και με α_n για τον αρνητικό.



Σχήμα 2.24 Κυματομορφές κυκλομετατροπέα από μονοφασική σε μονοφασική

Στο παραπάνω διάγραμμα μπορούμε να δούμε τις κυματομορφές της (α) τάσης εισόδου, (β) τάση εξόδου για μηδενική γωνία έναυσης, (γ) τάση εξόδου για γωνία έναυσης $\pi/3$, (δ) τάση εξόδου για μεταβαλλόμενη γωνία έναυσης.

Κατά τις δύο πρώτες περιόδους της τάσης εισόδου V_s , λειτουργεί ο θετικός μετατροπέας, ο οποίος ανορθώνει την τάση εισόδου, παρέχοντας ηλεκτρικό ρεύμα στο φορτίο. Η τάση εξόδου αποτελείται από τέσσερις θετικές ημιπεριόδους της τάσης εισόδου (σχήμα 2.30β). Κατά τις επόμενες δύο περιόδους της τάσης εισόδου λειτουργεί ο αρνητικός μετατροπέας, ο οποίος τροφοδοτεί το φορτίο με ρεύμα, αλλά με αντίθετη φορά. Οι κυματομορφές του ρεύματος είναι ίδιες με αυτές της τάσης, αφού το φορτίο είναι ωμικό. Σημειώνεται ότι όταν λειτουργεί ο ένας μετατροπέας, ο άλλος δεν λειτουργεί, κι έτσι δεν κυκλοφορεί ρεύμα μεταξύ των δύο μετατροπέων.

Η συχνότητα της τάσης εξόδου v_o είναι τέσσερις φορές μικρότερη από αυτή της τάσης εισόδου v_s , δηλαδή $f_o/f_i = 1/4$. Επομένως, αυτός είναι ένας κυκλομετατροπέας υποβιβασμού της συχνότητας. Ο κυκλομετατροπέας αυτός μπορεί να λειτουργεί αμφίδρομα, οπότε κατά την ανάστροφη λειτουργία, η συχνότητα της τάσης εξόδου θα είναι τέσσερις φορές μεγαλύτερη από αυτή της τάσης εισόδου, δηλαδή $f_o/f_i = 4$. Στην περίπτωση αυτή ονομάζεται κυκλομετατροπέας αύξησης της συχνότητας. Η συχνότητα f_o της τάσης εξόδου v_o μπορεί να αλλάξει με μεταβολή του αριθμού των κύκλων λειτουργίας του θετικού και του αρνητικού μετατροπέα και θα είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της συχνότητας f_i της τάσης εισόδου, σε έναν $1\phi-1\phi$ κυκλομετατροπέα.

Οι κυκλομετατροπέες σήμερα λόγω του υψηλού τους κόστους, συνήθως προτιμούνται για τον έλεγχο ηλεκτροκινητήριων συστημάτων μεγάλης ισχύος, τόσο για τον έλεγχο της λειτουργίας σύγχρονων ηλεκτρικών κινητήρων, όσο και σε συστήματα για τη ρύθμιση της συχνότητας της τάσης διάφορων πηγών ισχύος (συσσωρευτές, φωτοβολταϊκές γεννήτριες, κυψέλες καυσίμου, κ.λπ.) προκειμένου αυτές να διασυνδεθούν σε δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος.

2.2.2.2. Μεταβολή του αριθμού των πόλων

Είναι γνωστό ότι η ταχύτητα του κινητήρα είναι αντιστρόφως ανάλογη του πλήθους των ζευγών των πόλων. Για να γίνει μεταβολή του αριθμού των πόλων υπάρχουν δύο μέθοδοι:

- Διαδοχικοί πόλοι
- Πολλαπλά τυλίγματα στο στάτη

Στη μέθοδο των διαδοχικών πόλων, με κάποιες απλές αλλαγές στη σύνδεση των ομάδων του τυλίγματος του στάτη, ο αριθμός των πόλων του μεταβάλλεται με ένα λόγο 2 προς 1. Έτσι, ο επαγωγικός κινητήρας μπορεί να έχει δύο ή τέσσερις πόλους δηλαδή σύγχρονη ταχύτητα 3000rpm ή 1500rpm αντίστοιχα. Μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι με το λόγο 2 προς 1 έχουμε μόνο δυο ταχύτητες.

Το μειονέκτημα της προηγούμενης μεθόδου λύνει η μέθοδος με τα πολλαπλά τυλίγματα στο στάτη. Τοποθετώντας στο στάτη περισσότερα από ένα ανεξάρτητα τριφασικά τυλίγματα, με τον επιθυμητό αριθμό πόλων ανάλογα με τη ζητούμενη ταχύτητα τροφοδοτείται κάθε φορά το κατάλληλο τύλιγμα.

Το μειονέκτημα των πολλαπλών τυλιγμάτων είναι η αύξηση του κόστους του κινητήρα.

3. ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1.Μεθοδολογία

Στη σημερινή εποχή καθώς η τεχνολογία, η ανάπτυξη και οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες του ανθρώπου εξελίσσονται με γοργούς ρυθμούς, το περιβάλλον αντίθετα συνεχίζει να επιβαρύνεται λόγω και των παραμέτρων αυτών. Στο αναπτυξιακό αυτό πλαίσιο έρχεται να προστεθεί η οικονομική ύφεση στην οποία έχουν περιέλθει οι περισσότερες χώρες του ανεπτυγμένου κόσμου.

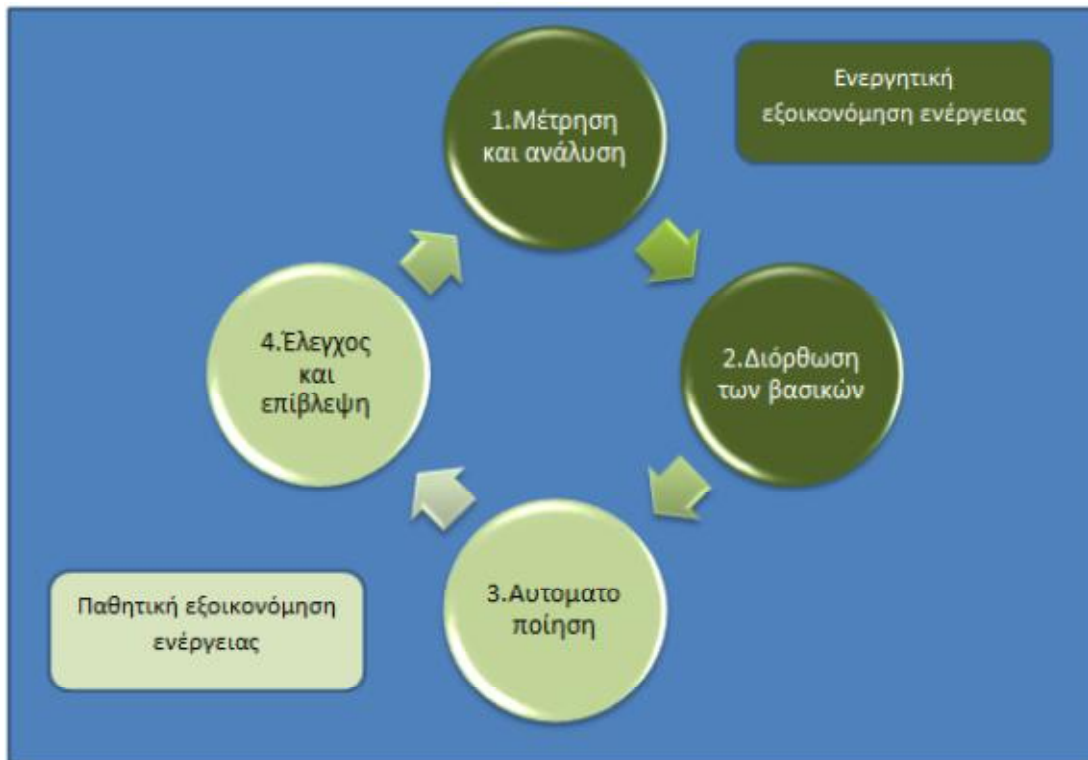
Το κυρίαρχο στοιχείο ανάπτυξης, που συγκαταλέγεται ανάμεσα στις βασικές ανάγκες του ανθρώπου, είναι η ενέργεια. Η ενέργεια αποτελεί ένα αγαθό υψίστης αξίας το οποίο προέρχεται από τη φύση και μέσω διαφόρων μεθόδων και τεχνικών συστημάτων που ανέπτυξε ο άνθρωπος στη μακρά πορεία της εξέλιξής του, μετατρέπεται από την αρχική μορφή της σε άλλες μορφές, κατάλληλες για άμεση χρήση.

Επειδή η ενέργεια πρέπει να χρησιμοποιείται με σύνεση, επιβάλλεται τα ποσά των ενεργειακών απωλειών να τείνουν, κατά το δυνατόν, προς το μηδέν. Έτσι κάθε σύστημα μετατροπής της ενέργειας καθώς και τα επιμέρους στοιχεία του, πρέπει να σχεδιάζονται και να λειτουργούν με αυστηρές προδιαγραφές για να επιτυγχάνεται όλο και υψηλότερος βαθμός απόδοσης και συνεπώς αύξηση της εξοικονόμησης ενέργειας.

Εξοικονόμηση ενέργειας γενικότερα είναι η διαδικασία μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας, χωρίς όμως αυτό να συνδυάζεται με μείωση της ποιότητας. Στην απόφαση για υλοποίηση οποιασδήποτε από τις ποικίλες τεχνολογικές παρεμβάσεις για εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα σύστημα, καθοριστικό ρόλο παίζει πάντα η οικονομικότητα ή διαφορετικά η οικονομική αποδοτικότητά της παρέμβασης. Με κατάλληλες μεθοδολογίες και με χρήση ορισμένων κριτηρίων, μπορεί να αξιολογηθεί η όλη επένδυση ως προς τη βιωσιμότητά της. Σε κάθε περίπτωση το κόστος της ενέργειας και το κόστος του χρήματος έχει καθοριστική σημασία.

Η μεθοδολογία εξοικονόμησης ενέργειας, όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 3.1, ξεκινά από τη διαδικασία της μέτρησης και της ανάλυσης. Το πρώτο στάδιο της είναι το στάδιο της ενεργητικής εξοικονόμησης ενέργειας, δηλαδή το στάδιο που περιλαμβάνει επεμβάσεις και διορθώσεις στα ήδη υπάρχοντα συστήματα ή και επιμέρους στοιχεία. Ειδικότερα:

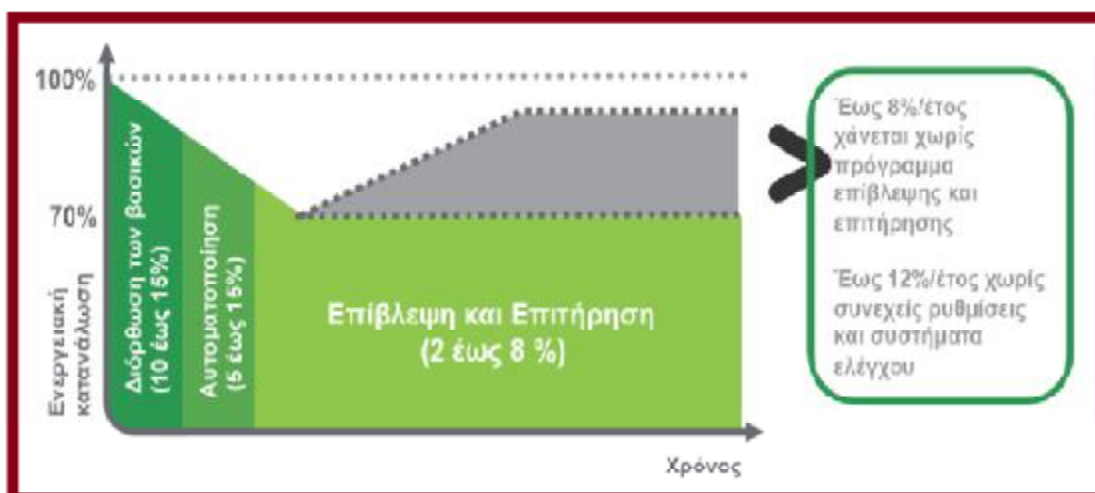
- Το πρώτο βήμα έχει να κάνει με την αναγνώριση του προβλήματος, και την περαιτέρω ανάλυση του. Για παράδειγμα η μέτρηση των καταναλώσεων των συσκευών που εξετάζονται, και στη συνέχεια η ανάλυση των ωρών λειτουργίας.
- Το δεύτερο βήμα έχει να κάνει με την διόρθωση των βασικών παραμέτρων/ στοιχείων που αρχικά είναι η επιλογή συσκευών χαμηλής κατανάλωσης, πιθανά επιπρόσθετα υλικά ή ακόμα και διόρθωση του συντελεστή ισχύος.
- Τα επόμενα δύο (τρία και τέσσερα) βήματα ανήκουν στο στάδιο της παθητικής εξοικονόμησης ενέργειας, δηλαδή στο στάδιο της προσπάθειας εξοικονόμησης με πιο δραστικές λειτουργίες/επεμβάσεις και με αλλαγές στην ηλεκτρολογική εγκατάσταση των συσκευών, όπως είναι: η αυτοματοποίηση, δηλαδή την προσθήκη κατάλληλων συσκευών αυτοματισμού έτσι ώστε να ελέγχονται οι καταναλώσεις και να αποφεύγεται η χωρίς χρήση λειτουργία κα ο έλεγχος και η επίβλεψη των αλλαγών που πραγματοποιήθηκαν στα προηγούμενα στάδια καθώς και η ανάλυση των νέων δεδομένων.



Σχ. 3.1 Μεθοδολογία εξοικονόμησης ενέργειας

ΠΗΓΗ: "Chapter K-Energy efficiency in electrical distribution"-Schneider electric

Από δημοσιευμένα στοιχεία προκύπτει ότι με την διόρθωση των βασικών παραμέτρων/στοιχείων επιτυγχάνεται ένα ποσοστό εξοικονόμησης από 10% έως και 15% , ενώ με την αυτοματοποίηση συστημάτων 5-15%. Μια απλή επίβλεψη και επιτήρηση προσφέρει 2-8 % εξοικονόμηση. Από την άλλη πλευρά όμως ένα ποσοστό ενέργειας έως και 8% χάνεται σε ετήσια βάση όταν δεν υπάρχει πρόγραμμα επίβλεψης της λειτουργίας, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό εξοικονόμησης, χωρίς συνεχείς ρυθμίσεις και συστήματα ελέγχου, είναι 12% το χρόνο. Τα παραπάνω στοιχεία φαίνονται και στο διάγραμμα που ακολουθεί.



Σχ. 3.2 Ενδεικτικά μεγέθη εξοικονόμησης ενέργειας

ΠΗΓΗ: "Chapter K-Energy efficiency in electrical distribution"-Schneider electric

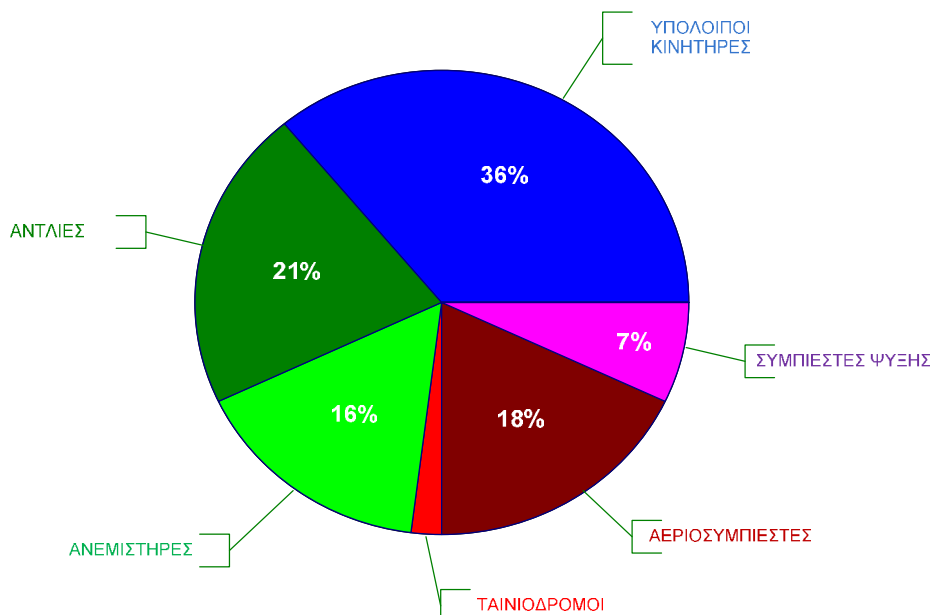
Με εξαίρεση το φωτισμό, το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται στην ηλεκτροκίνηση, δηλαδή καταναλώνεται από τους ηλεκτρικούς κινητήρες που ανέρχονται σε ένα τεράστιο αριθμό πάνω στον πλανήτη. Οι ηλεκτροκινητήρες προσφέρονται για εξοικονόμηση ενέργειας με διάφορους τρόπους όπως αυτοί θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Οι σταθερά αυξανόμενες τιμές της ενέργειας αλλά και η περίοδος παγκόσμιας οικονομικής κρίσης, υποχρεώνουν όλο και πιο συχνά τις επιχειρήσεις να λαμβάνουν μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας και κόστους. Προκαλεί εντύπωση το γεγονός ότι οι συζητήσεις στον τομέα της εξοικονόμησης, περιστρέφονται κυρίως γύρω από εναλλακτικές πηγές ενέργειας, ενώ οι ήδη διαθέσιμες τεχνικές λύσεις που παρέχουν δυνατότητες εξοικονόμησης, προσελκύουν σχετικά μειωμένο ενδιαφέρον, παρότι είναι πιο γρήγορος και πιο αποδοτικός τρόπος, σε σχέση με την εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής ενέργειας, για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών.

3.2. Εξοικονόμηση στα κινητήρια συστήματα

Σε έρευνα που είχε διεξαχθεί ειδικά για τις ευρωπαϊκές χώρες (2), τα κινητήρια συστήματα είναι υπεύθυνα για το 69% της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στη βιομηχανία και για το 38% στις οικιακές εφαρμογές, το οποίο σε απόλυτες τιμές αντιστοιχεί σε 575 και 186 TWh αντιστοίχως ανά έτος. Οι αντλίες, οι ανεμιστήρες και οι συμπιεστές που κινούνται από ηλεκτρικούς κινητήρες αποτελούν τα πιο σημαντικά φορτία ως προς την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας τόσο στις βιομηχανίες (το 62%) όσο και στον τομέα των υπηρεσιών (το 82%). Από τα στοιχεία προκύπτει ότι οι ηλεκτρικοί κινητήρες αποτελούν πολύ σημαντικό παράγοντα στο ισοζύγιο ηλεκτρικής ενέργειας, επομένως είναι σημαντικό ο βαθμός απόδοσης των κινητήρων αυτών να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερος.

Στο παρακάτω διαγράμματα που ακολουθεί μπορούμε να δούμε τις κατηγορίες των εφαρμογών των κινητήριων συστημάτων στην βιομηχανία και τη συμμετοχή της κάθε κατηγορίας στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχ 3.3: Ποσοστιαία ενεργειακή κατανάλωση ανά κατηγορία εφαρμογής κινητήριων συστημάτων στην βιομηχανία για τις ευρωπαϊκές χώρες.

ΠΗΓΗ: Εξοικονόμηση ενέργειας από την χρήση ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων μέσω ελεγχόμενων ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος-T.E.E.

Από το παραπάνω διάγραμμα γίνεται φανερό ότι οι αντλίες, οι ανεμιστήρες και οι αεροσυμπιεστές κατέχουν ένα σεβαστό ποσοστό στην κατανάλωση ενέργειας. Αν και συνήθως είναι υποτιμημένες καταναλώσεις, λόγω των σχετικά μικρότερων τιμών όσον αφορά το μέγεθος της ονομαστικής τους ισχύος, ο μεγάλος αριθμός τόσο στη βιομηχανία όσο και στους υπόλοιπους τομείς εφαρμογών (κίνηση, αντλιοστάσια, υπηρεσίες), μόνο αμελητέες καταναλώσεις δε μπορούν να χαρακτηριστούν.

3.3. Ενεργειακή κλάση κινητήρων

3.3.1. Προδιαγραφές Διεθνών Οργανισμών

Οι ηλεκτροκινητήρες ευθύνονται για κατανάλωση ενέργειας 1.07 Δισεκατομμυρίου Kwh μόνο στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΠΗΓΗ: http://www.civitec.it/site/new_specs.pdf). Υπολογίζεται ότι η αντικατάστασή τους με κινητήρες υψηλής απόδοσης θα συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας σε ποσοστό 20-30%, προκαλώντας αντίστοιχα μείωση των εκπομπών των «αερίων θερμοκηπίου» και του κόστους παραγωγής.

Μετά τα μέτρα που θεσπίστηκαν στις ΗΠΑ με την εφαρμογή του νόμου ERACT(ΠΗΓΗ:http://www.cres.gr/motorchallenge/Praktika/pdf_synedriou/Electric_Motor_systems.pdf), η Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω της Ευρωπαϊκής Επιτροπής έθεσε νέες προδιαγραφές και ενέργειες για την αύξηση της απόδοσης των συστημάτων κίνησης. Τα Κίνητρα ήταν η ελάττωση της καταναλισκόμενης ενέργειας, η μείωση των λειτουργικών εξόδων των ευρωπαϊκών επιχειρήσεων και η μείωση της εκπομπής των ρύπων του CO₂.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή σε συνεργασία με τους κατασκευαστές των κινητήρων συμφώνησαν να εφαρμόσουν τρεις κατηγορίες/κλάσεις για τους κινητήρες ανάλογα με τον βαθμό απόδοσης τους::

- EFF1 (High-efficiency motors),
- EFF2 (Improved-efficiency motors),
- EFF3 (Standard motors)

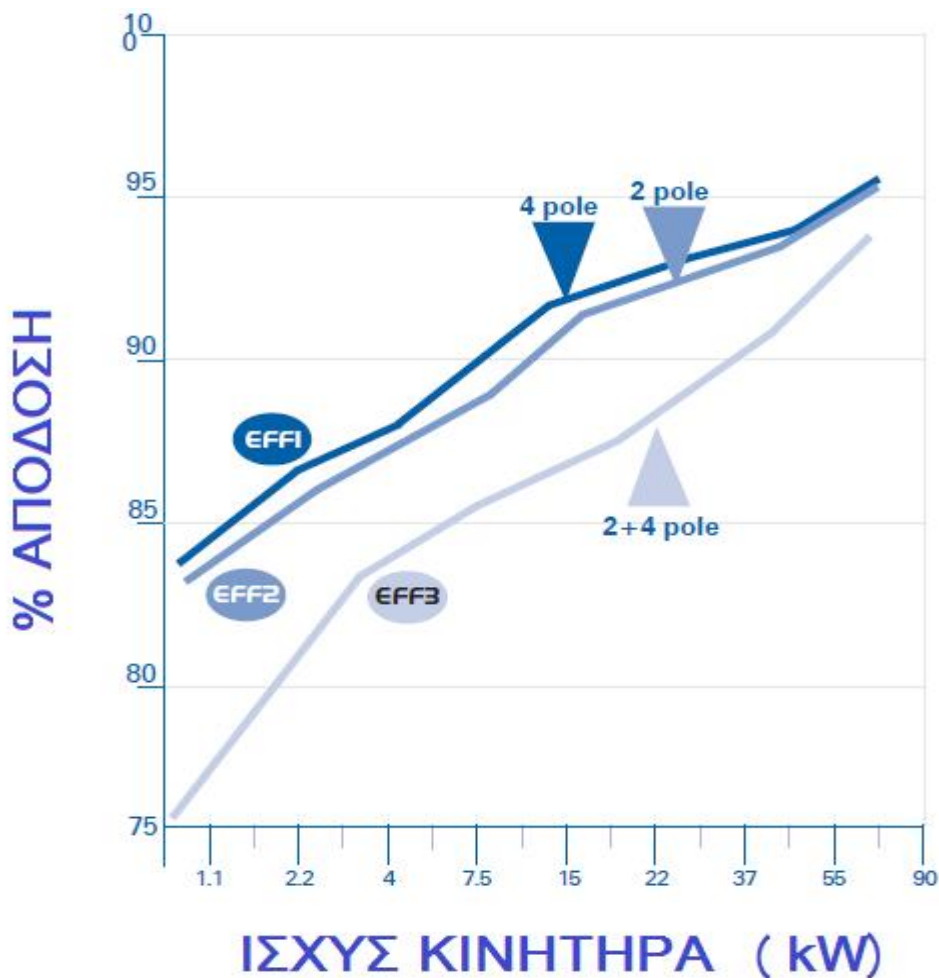
Οι τρεις αυτές κατηγορίες αφορούν το 80% περίπου των παραγόμενων κινητήρων στην Ευρώπη ονομαστικής ισχύος από 1.1 μέχρι 90 KW. Ο κάθε κατασκευαστής είναι υποχρεωμένος να αναγράφει στην πινακίδα της μηχανής και στους καταλόγους την κατηγορία στην οποία ανήκει ο κινητήρας.

Για την τελική επιλογή του κινητήρα σημαντικό οικονομοτεχνικό κριτήριο που πάντα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι και ο τρόπος/διάρκεια χρήσης δηλαδή σπάνια, συχνή, συνεχής. Αυτό είναι σημαντικό καθώς σε μερικές περιπτώσεις που η χρήση δεν είναι και τόσο συχνή ανάλογα θα συμφέρει και διαφορετική/χαμηλότερη κατηγορία. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η κατάταξη των κινητήρων ανάλογα με τη χρήση τους.

Πίνακας 3.1 Κατηγοριοποίηση απόδοσης κινητήρων ανάλογα με την χρήση

Κατηγορία	Χρήση	Απόδοση
EFF 1	Συνεχής	Πολύ υψηλή
EFF 2	Συχνή	Υψηλή
EFF 3	Περιστασιακή-Σπάνια	Χαμηλή

Το σχήμα που ακολουθεί δείχνει τη συσχέτιση των κατηγοριών ενεργειακής απόδοσης με τα κατασκευαστικά στοιχεία των κινητήρων.



Σχ. 3.4. Εκατοστιαία απόδοση σε σχέση με την ισχύ εξόδου ανά κατηγορία κινητήρων

Παρατηρώντας προσεκτικά το σχήμα, οι κινητήρες που ανήκουν στην υψηλή κατηγορία EFF1 και αποτελούνται από 4 πόλους κινούνται σε υψηλότερα επίπεδα απόδοσης, ειδικά για τιμές ονομαστικής ισχύος μεταξύ των 40 KW και 90 KW. Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα στα 40 KW ο πιο αποδοτικός κινητήρας είναι ο τετραπολικός κατηγορίας EFF1, ενώ αρκετά ικανοποιητική απόδοση θα μπορούσε να προσφέρει και ένας διπολικός κινητήρας κατηγορίας EFF2 ίδιας ονομαστικής ισχύος. Αντιθέτως στην ίδια ισχύ διπολικό ή τετραπολικό κινητήρες κατηγορίας EFF3 κινούνται σε αρκετά χαμηλότερα επίπεδα απόδοσης. Όπως θα αναλυθεί και παρακάτω ο αριθμός των πόλων παίζει και αυτός το ρόλο του.

Τελικά η πρώτη προσπάθεια κατηγοριοποίησης με τις τρεις κατηγορίες EFF θα μπορούσε να περιγραφεί με δυο λόγια ώστε να γίνει και πιο κατανοητή η χρήση τους.

EFF1: Πολύ υψηλή απόδοση διπολικό και τετραπολικό κινητήρες ονομαστικής ισχύος από 1.1 μέχρι 90 KW.

EFF2: Ιδανικοί για εξοικονόμηση ενέργειας, έχουν ήδη γίνει η ελάχιστη απαίτηση κατηγορίας στην Ευρωπαϊκή Ένωση.

EFF3: Έχει μειωθεί η χρήση τους αισθητά, η παραγωγή τους έχει σταματήσει, ενώ σύντομα θα καταργηθούν πλήρως.

Συνοψίζοντας επίσης τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά σημειώνουμε τις διαφορές μεταξύ των συμβατικών κινητήρων και των Ενεργειακά Αποδοτικών Κινητήρων (Ε.Α.Κ. –EFF..) :

-Υψηλότερη ποιότητα και πιο λεπτή πλαστικοποίηση χάλυβα στο στάτη.

- Περισσότερο χαλκό στην περιέλιξη.
 - «Βελτιστοποιημένο» διάκενο μεταξύ του δρομέα και του στάτη.
 - Μειωμένες απώλειες αερισμού
 - Υψηλότερη ανοχή κατεργασίας.
 - Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.
 - Υψηλής ποιότητας αλουμίνιο που χρησιμοποιείται στον κλωβό του δρομέα.
- Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι τα πλεονεκτήματα ενός Ε.Α.Κ.:
- Μεγαλύτερη αποδοτικότητα, λιγότερο λειτουργικό κόστος.
 - Μικρότερη ολίσθηση , άρα μεγαλύτερη ταχύτητα
 - Μείωση του κόστους συντήρησης και βελτίωση των εργασιών στη βιομηχανία
 - Αύξηση της παραγωγικότητας

Οι παραπάνω είναι οι μέχρι και σήμερα χρησιμοποιούμενες κατηγορίες απόδοσης των κινητήρων. Από το 2015 και μετά θα ισχύσουν οι νέες κατηγοριοποιήσεις που εισήχθησαν στις αρχές του 2009 και είναι οι ΙΕ...(International Energy Efficiency):

- ΙΕ1→ Κανονική απόδοση (Συγκρίνεται με EFF2 κατηγορία κινητήρων)
- ΙΕ2→Υψηλή απόδοση (Συγκρίνεται με EFF1 κατηγορία κινητήρων)
- ΙΕ3→Premium απόδοση (10-15% πιο αποδοτικοί)
- ΙΕ4→Super Premium απόδοση (Δεν έχει ακόμα ολοκληρωθεί)

Οι παραπάνω κατηγορίες/κλάσεις θα καλύπτουν κινητήρες με χαρακτηριστικά:

- Τάση έως και 1000V
- Ισχύς 0,75KW έως και 375 KW
- Αριθμός των πόλων 2,4 ή 6 (50 και 60 Hz)

3.3.2. Ενέργειες Διεθνών Οργανισμών

Οι τελικοί χρήστες είναι σημαντικό να γνωρίζουν σε ποια κατηγορία ανήκει ο κινητήρας από άποψη κατανάλωσης ενέργειας. Υψηλότερη απόδοση του κινητήρα συνεπάγεται λιγότερες απώλειες άρα λιγότερη κατανάλωση. Η εξοικονόμηση ενέργειας αυξάνεται επίσης ανάλογα και με την χρήση του κινητήρα, ενώ η εξοικονόμηση χρημάτων επιφέρει πιο γρήγορα απόσβεση του κόστους του.

Οι εταιρίες που εμπορεύονται κινητήρες διευκολύνονται αφάνταστα από την κατηγοριοποίηση καθώς όταν τα προϊόντα τους κατέχουν μια διεθνώς αναγνωρισμένη κατηγοριοποίηση, η διαδικασία επιλογής απλοποιείται ακόμα περισσότερο με κεντρικό σημείο την απόδοση του κινητήρα. Η κοστολόγηση σαφώς και γίνεται πιο προσιτή ακόμα και για διαφορετικούς τύπους κινητήρων.

Οι τεχνικοί μπορούν να συγκρίνουν διαφορετικά προϊόντα πάνω στην ίδια βάση και ανάλογα να επιλέξουν.

Για την αποφυγή των χρονοβόρων διαδικασιών με την εθελοντική δέσμευση των κατασκευαστών σε συγκεκριμένα πρότυπα θα ήταν σημαντικό οι διεθνείς οργανισμοί να προχωρήσουν σε συγκεκριμένες ενέργειες για την διάδοση αλλά και για την καθιέρωση των ενεργειακών προτύπων.

Από την μεριά της Ευρωπαϊκής Ένωσης οι κυριότερες από τις ενέργειες που έχουν θεσπιστεί για την διάδοση των ενεργειακά αποδοτικών κινητήρων είναι:

- Κατηγοριοποίηση κινητήρων και σήμανση της ενεργειακής τους κατανάλωσης
- Καθορισμός και εφαρμογή των προτύπων ενεργειακής απόδοσης
- Εθελοντικές συμφωνίες με κατασκευαστές γνήσιου εξοπλισμού
- Προγράμματα πληροφόρησης (συνέδρια, μαθήματα, έντυπα)
- Τεχνικά Εργαλεία (Αλγόριθμοι υπολογισμών, βάσεις δεδομένων, κτλ)
- Έρευνα, ανάπτυξη και επίδειξη των αποτελεσμάτων σε όλους τους άμεσα εμπλεκόμενους με την ενέργεια.

Οι κύριοι στόχοι της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και των κατασκευαστών ηλεκτροκινητήρων είναι:

- Αύξηση του οφέλους των χρηστών με αυξημένη οικονομία σε ενεργειακά έξοδα
- Διαφάνεια της Αγοράς για πελάτες και χρήστες μηχανημάτων
- Δυνατότητα επιλογής του σωστού κινητήρα από τον χρήστη
- Αποφυγή χρονοβόρων γραφειοκρατικών διαδικασιών με εθελοντική δέσμευση των κατασκευαστών ηλεκτροκινητήρων σε συγκεκριμένα πρότυπα

Απώτερος στόχος των ενεργειών είναι να χρησιμοποιούνται παγκοσμίως κινητήρες κατηγορίας IE3 ή NEMA προνομιακής ενεργειακής απόδοσης για τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης ή της Β. Αμερικής αντίστοιχα.

Από 1.1.2015 θα ισχύσει για την ΕΕ η καθιέρωση της κατηγορίας IE3 σαν ελάχιστη απαίτηση για όλους του κινητήρες ισχύος 7,5-375 KW.

Απο το 2017 θα ισχύσει για την ΕΕ η καθιέρωση της κατηγορίας IE3 σαν ελάχιστη απαίτηση για όλους του κινητήρες ισχύος 0-375 KW.

3.4 Χαρακτηριστικά λειτουργίας απόδοσης κινητήρα

3.4.1. Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

Η επίδραση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας σχετίζεται με το βαθμό απόδοσης κατά τη λειτουργία ενός ηλεκτροκινητήρα. Για να επιτύχουμε εξοικονόμηση ενέργειας πρέπει να επεμβαίνουμε στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των κινητήρων, προκειμένου να επιτευχθεί μείωση των απωλειών. Οι απώλειες των ηλεκτρικών κινητήρων διακρίνονται σε δύο κατηγορίες που είναι:

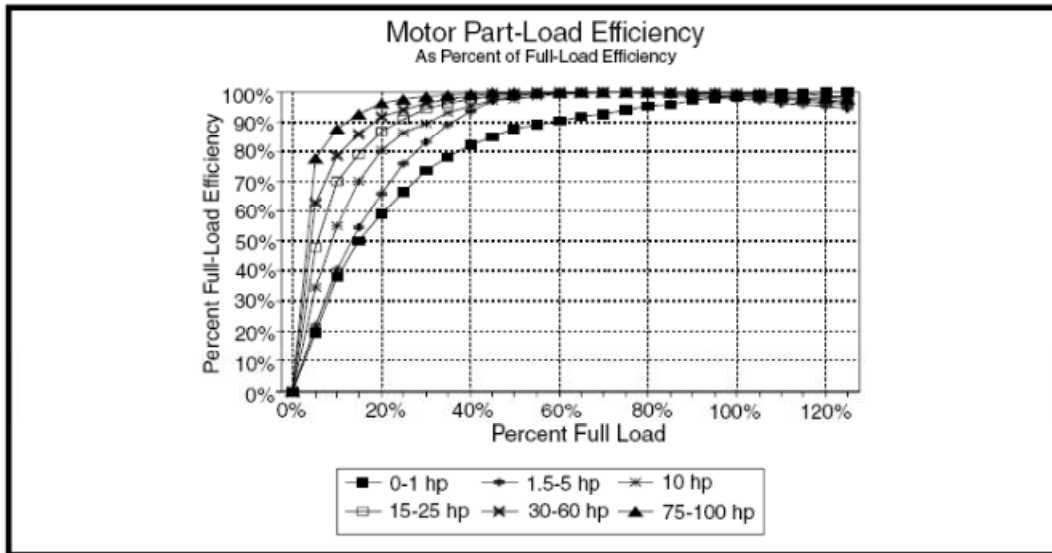
- Οι εξαρτώμενες από το φορτίο, εμφανίζονται στα αγώγιμα υλικά του στάτη και του δρομέα και είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος το οποίο εξαρτάται από το φορτίο.
- Οι ανεξάρτητες από το φορτίο, εμφανίζονται στα μη αγώγιμα υλικά (πυρήνες), θεωρούνται με μεγάλη προσέγγιση σταθερές (ανεξάρτητες του φορτίου), εξαρτώνται όμως από το μαγνητικό πεδίο, το οποίο εξαρτάται από την ηλεκτρική τάση.

Μείωση των μη σταθερών απωλειών επιτυγχάνεται με τη χρήση του χαλκού αντί του αλουμινίου στα αγώγιμα μέρη, τη μεγαλύτερη διατομή που οδηγεί σε μείωση της αντίστασης των τυλιγμάτων του στάτη ή των μπαρών του δρομέα. Κάτι τέτοιο βέβαια μπορεί να επιτευχθεί τροποποιώντας το σχεδιασμό των αυλακώσεων.

Οι σταθερές απώλειες, δηλαδή οι απώλειες στα σιδηρομαγνητικά υλικά όταν αυτά διαρρέονται από εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο (απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων),

μειώνονται χρησιμοποιώντας υλικά με αυξημένη μαγνητική διαπερατότητα (μείωση των απωλειών υστέρησης), ενώ μειώνοντας το πάχος των ελασμάτων του πυρήνα επιτυγχάνουμε μείωση των απωλειών που οφείλονται στα δινορεύματα.

Σε ό,τι αφορά τις επιδράσεις του φορτίου των κινητήρων, σαν ποσοστό της ονομαστικής ισχύος, στο βαθμό απόδοσης σημαντικές πληροφορίες παρέχει το σχήμα 3.7 στο οποίο αυτό παρουσιάζεται η μεταβολή του βαθμού απόδοσης σαν συνάρτηση της φόρτισης. Από τις καμπύλες του σχήματος αυτού μπορούμε να εκτιμήσουμε το βαθμό απόδοσης κατά τη μεταβολή του φορτίου που εφαρμόζεται στον άξονα του κινητήρα, για ένα φάσμα μηχανών τυπικού μεγέθους, οι οποίες συναντώνται συχνά στις διάφορες εφαρμογές.



Σχήμα 3.5: Ο βαθμός απόδοσης ασύγχρονων κινητήρων ανάλογα με τη φόρτιση
 ΠΗΓΗ: Darryl Van Son, Motor Test Results presented at Die Cast Copper Motor Workshop and Technology Demonstration Meeting, January 29, 2002, Denver, CO

Στον παρακάτω πίνακα μπορούμε να δούμε τις επιδράσεις του αγώγιμου υλικού του δρομέα στις απώλειες και συνεπώς στο βαθμό απόδοσης, σε τριφασικούς ασύγχρονους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα.

Πίνακας 3.2: Σύγκριση βαθμού απόδοσης Ασύγχρονων Κινητήρων με αλουμίνιο και χαλκό σαν αγώγιμο υλικό στο δρομέα

Απόδοση ασύγχρονων κινητήρων με αλουμίνιο και χαλκό			
KV	Αλουμίνιο	Χαλκός	Μείωση απωλειών (%)
3	83,2	86,4	19
5,5	74	79	19,2
7,5	85	86,5	10
11	89,5	90,7	11,4
19	90,9	92,5	17,6
30	88,8	90,1	11,6
90	91,4	92,8	16,3
200	92	93	12,5

ΠΗΓΗ: Darryl Van Son, Motor Test Results presented at Die Cast Copper Motor Workshop and Technology Demonstration Meeting, January 29, 2002, Denver, CO

Παρατηρούμε ότι με τη χρήση του χαλκού αντί του αλουμινίου σαν αγωγίμο υλικό στους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα, οι απώλειες του δρομέα περιορίζονται σημαντικά κατά μέσο όρο 14,7 %. Το αποτέλεσμα είναι επίσης και οι ακόλουθες διαφορές στα λειτουργικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τη χρήση αλουμινίου:

- Η ολίσθηση με φορτίο, η οποία είναι ανάλογη με τις απώλειες του δρομέα, είναι σημαντικά μικρότερη.
- Η καμπύλη ροπής στην περιοχή λειτουργίας έχει μικρότερη κλίση (είναι πολύ πιο απότομη) δηλαδή μικρότερη διακύμανση στην ταχύτητα για την ίδια μεταβολή φορτίου.
- Η ονομαστική ροπή και γενικότερα η κατανομή της ροπής επιτυγχάνεται σε ένα χαμηλότερο επίπεδο ολίσθησης.
- Η ροπή εκκίνησης, είναι επίσης χαμηλότερη καθόσον είναι ανάλογη των απωλειών του δρομέα.

Σε σχέση με τον κινητήρα αλουμινίου στον ενεργειακά αποδοτικό κινητήρα με δρομέα χαλκού, μια αύξηση της ποσότητας του σιδηρομαγνητικού υλικού είναι πολλές φορές απαραίτητη. Ο χαλκός αν και σημαντικό στοιχείο στην κατασκευή δεν αρκεί από μόνος του να επιφέρει θετικά αποτελέσματα. Ελασματοποιήσεις με προδιαγραφές κράματος χαμηλότερων απωλειών (απωλειών σιδήρου), καθώς και μεγαλύτερες διατομές περιελίξεων, είναι δύο ακόμα σημαντικά στοιχεία που απαιτούνται για τη θετική ενεργειακή συμπεριφορά.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένας ενεργειακά αποδοτικός κινητήρας με δρομέα από χαλκό.



Σχ. 3.6. Ασύγχρονος κινητήρας με δρομέα από χαλκό (ΕΑΚ)

Στον πίνακα που ακολουθεί αποτυπώνονται οι τυπικές απώλειες στα διάφορα μέρη ενός επαγωγικού κινητήρα, το ποσοστό τους στο σύνολο των απωλειών ανάλογα με το μέγεθος, οι παράγοντες που τις επηρεάζουν και μερικές τεχνικές που μπορούν να εφαρμοστούν για τη μείωση αυτών.

Πίνακας 3.3. Τυπικές απώλειες και τεχνικές εξοικονόμησης σε επαγωγικό κινητήρα

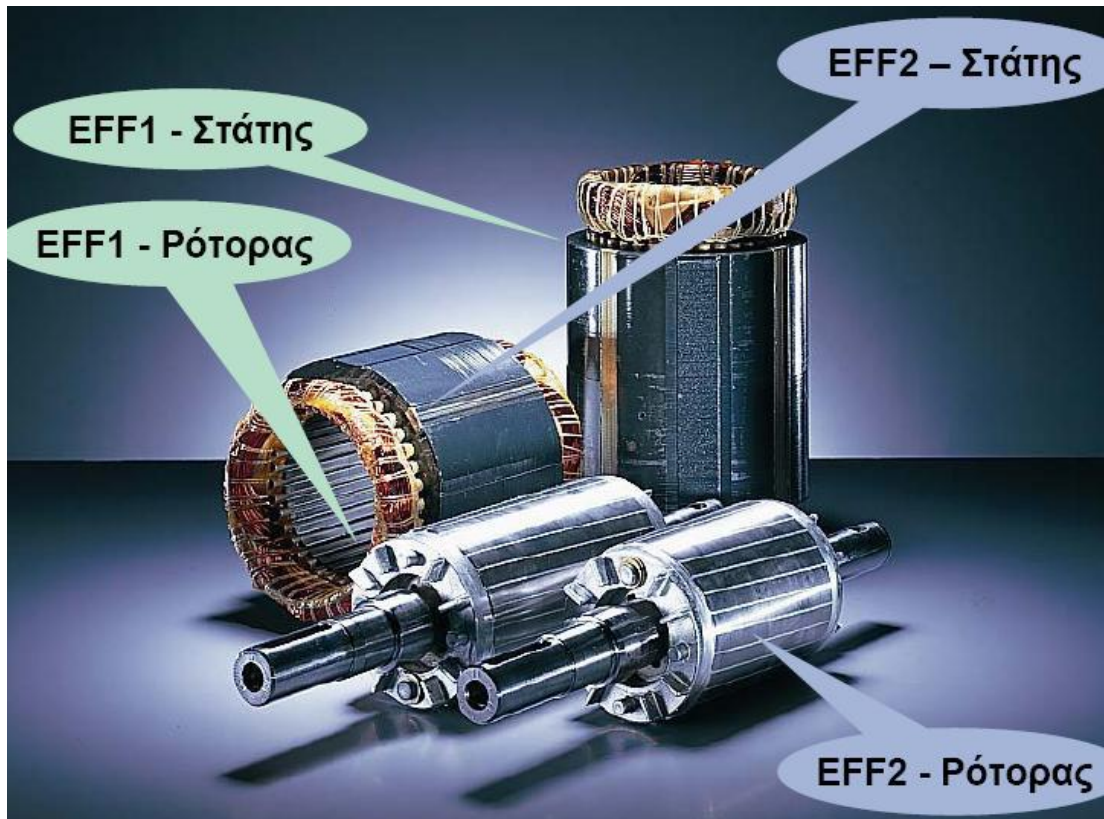
Είδος απωλειών	Ποσοστό Απωλειών (%)	Παράγοντες που επηρεάζουν τις απώλειες	Επιλογές εξοικονόμησης
Απώλειες στάτη	30-50	Υλικό και διατομή αγωγού του στάτη	Χρήση χαλκού και αυξημένη διατομή των τυλιγμάτων
Απώλειες δρομέα	20-25	Υλικό και διατομή αγωγού του δρομέα	Χρήση χαλκού και αγωγών μεγαλύτερης διατομής
Απώλειες πυρήνα	20-25	Τύπος και ποιότητα μαγνητικών ελασμάτων	Χρήση λεπτότερων ελασμάτων, χρήση περισσότερου χάλυβα στον πυρήνα
Απώλειες περιστροφής και αερισμού	5-10	Επιλογή των τριβέων και ανεμιστήρα	Κατάλληλη σχεδίαση και επιλογή των τριβέων και φτερωτής
Απώλειες φορτίου	5-15	Κακή επιλογή κινητήρα για ένα συγκεκριμένο φορτίο	Αυστηροί έλεγχοι προδιαγραφών και ποιότητας του φορτίου

ΠΗΓΗ: «Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems»- International energy agency-Paul Waide and Conrad U. Brunner

Σε μία εγκατάσταση οι κινητήρες που έχουν «καταγράψει» πολλές ώρες λειτουργίας είναι υποψήφιοι για αντικατάσταση από υψηλότερης αποδοτικότητας κινητήρες, ιδιαίτερα εάν είναι και ξεπερασμένης τεχνολογίας όπως θα αναλυθεί εκτενέστερα σε παρακάτω ενότητα.

Αναλόγως βέβαια και με το μέγεθος της ισχύος, η αντικατάσταση με κινητήρες ενεργειακής κλάσης EFF1 μπορεί να αυξήσει την λειτουργική τους απόδοση μέχρι και 10%, σε σύγκριση με τους κοινούς κινητήρες, πράγμα που σημαίνει 10% μείωση των απωλειών με ότι αυτό συνεπάγεται από μεριά κόστους, κλπ. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι οι κινητήρες που έχουν υποστεί επαναπεριέλιξη του τυλίγματος του στάτη παρουσιάζουν μείωση στην απόδοση 3 με 4% σε σχέση με τον καινούργιο κινητήρα.

Στο Σχ. 3.7 που ακολουθεί φαίνονται τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των EFF1 και EFF2 ενεργειακών κλάσεων σχεδίασης κινητήρων.



Σχ. 3.7. Σύγκριση των ενεργών κατασκευαστικών στοιχείων ηλεκτροκινητήρα EFF1/EFF2

3.4.2 Επιλογή μεγέθους

Πολλές φορές οι «ειδικοί» (ιδιοκτήτες, τεχνικοί) συνηθίζουν να προμηθεύονται και να εγκαθιστούν μεγάλους σε μέγεθος κινητήρες για λόγους ασφαλείας, για να ελαχιστοποιήσουν το ρίσκο της αποτυχίας (ακόμα και σε περιπτώσεις που αυτό δεν είναι απαραίτητο), ή από έλλειψη κατάλληλου συστήματος ελέγχου/ρύθμισης της λειτουργίας. Συχνοί λόγοι υπερδιαστασιολόγησης ενός κινητήρα μπορεί να είναι :

- Υπερβολική αύξηση των συντελεστών ασφαλείας
- Κακή «προσαρμογή» του κινητηρίου συστήματος σε σχέση με το φορτίο που αναμένεται να τροφοδοτήσει
- Τήρηση παλαιότερων προδιαγραφών ξεπερασμένης τεχνολογίας
- Λανθασμένη επιλογή κινητήρα για την εφαρμογή που απαιτείται ή και επιλογή κινητήρα με επιπλέον χαρακτηριστικά από αυτά που επαρκούν ώστε να πραγματοποιήσει σωστά το έργο που πρόκειται να του ανατεθεί.

Οι κινητήρες γενικά λειτουργούν στην υψηλότερη απόδοσή με φορτίο στο διάστημα από 60 μέχρι 100% (πλήρες φορτίο). Η απόδοση τους μειώνεται δραστικά όταν το φορτίο μειωθεί κάτω από το 50% του ονομαστικού. Στις περιπτώσεις αυτές η αλλαγή κινητήρων με μικρότερο μέγεθος ισχύος εάν ο κινητήρας λειτουργεί κάτω από 50% με πλήρες φορτίο γίνεται πλέον επιτακτική.

Πολλές φορές επίσης οι κινητήρες επιλέγονται με «ελαφρώς» χαμηλότερη τιμή σε ισχύ σε σχέση με το μέγιστο φορτίο που πρόκειται να εξυπηρετήσουν. Είναι γνωστό άλλωστε ότι όλοι οι κινητήρες μπορούν να λειτουργήσουν έως και 15% πάνω από την ονομαστική ισχύ τους.

3.5. Έλεγχος - ρύθμιση

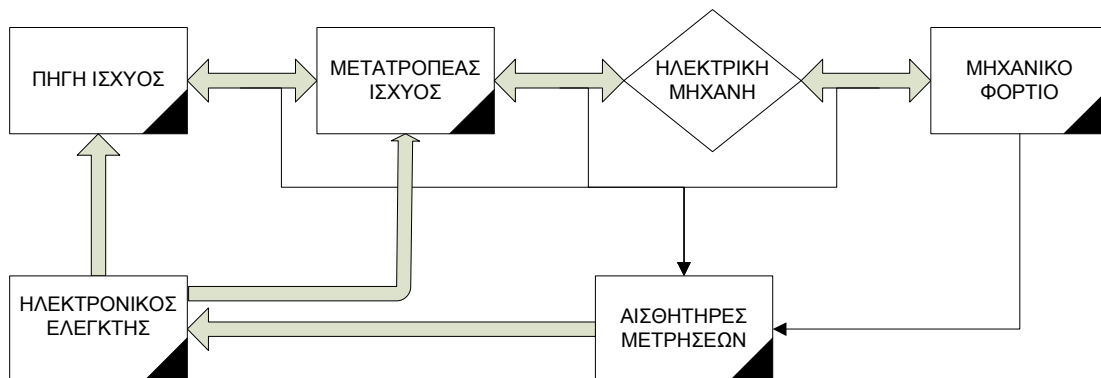
Σε διάφορες εφαρμογές τόσο στη βιομηχανία όσο και στον οικιακό τομέα, υπάρχει ένας πολύ μεγάλος αριθμός ηλεκτρικών κινητηρίων συστημάτων που είναι απαραίτητος ο έλεγχος της λειτουργίας τους με σκοπό να επιτυγχάνεται η διατήρηση ορισμένων μεγεθών σε επιθυμητές τιμές, σύμφωνα με προβλεπόμενο χρονοδιάγραμμα.

Για παράδειγμα σε ένα ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα με επαγωγικό κινητήρα ο έλεγχος είναι απαραίτητος για να επιτευχθεί τροφοδοσία του ηλεκτρικού κινητήρα με μεταβλητά ηλεκτρικά μεγέθη, (π.χ. μεταβλητή τάση ή συχνότητα) κατά τέτοιο τρόπο ώστε η παραγόμενη ροπή ή η ταχύτητα στον άξονά του να μεταβάλλονται κατάλληλα σύμφωνα με τις απαιτήσεις του φορτίου και γενικά σύμφωνα με μία προδιαγραφόμενη επιθυμητή λειτουργία. Όταν δεν μπορούμε να μεταβάλουμε τα ηλεκτρικά μεγέθη παροχής του κινητήρα, το κινητήριο σύστημα σπαταλά άσκοπες ποσότητες ενέργειας καθώς λειτουργεί αδιάλειπτα με αυξημένη ταχύτητα ανεξάρτητα από τη μεταβολή του φορτίου.

Σε γενικές γραμμές με τον έλεγχο ενός ηλεκτροκινητήριου συστήματος εξασφαλίζουμε:

- Ομαλή εκκίνηση
- Ομαλή πέδηση
- Μεταβαλλόμενο ρεύμα εκκίνησης
- Αυξημένη ροπή εκκίνησης
- Μεταβολή στροφών ανάλογα με τη μεταβολή του φορτίου
- Εξοικονόμηση ενεργείας

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η απλή δομή ενός ελεγχόμενου ηλεκτροκινητήριου συστήματος.



Σχ. 3.8. Βασική δομή ενός ελεγχόμενου ηλεκτροκινητήριου συστήματος

Με τον κατάλληλο «ρυθμιστή»/μετατροπέα τοποθετημένου μεταξύ του αυτόματου διακόπτη και του κινητήρα, η εξοικονόμηση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμάται ότι μπορεί να φτάσει από 15% έως 50% ανάλογα με την εγκατάσταση. Η απόσβεση της επένδυσης είναι συνήθως αρκετά σύντομη, μεταξύ 9 και 24 μηνών. Παρακάτω θα αναλυθούν ορισμένοι από τους τρόπους έλεγχου ενός ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος .

3.5.1. Έλεγχος με μετατροπείς ισχύος

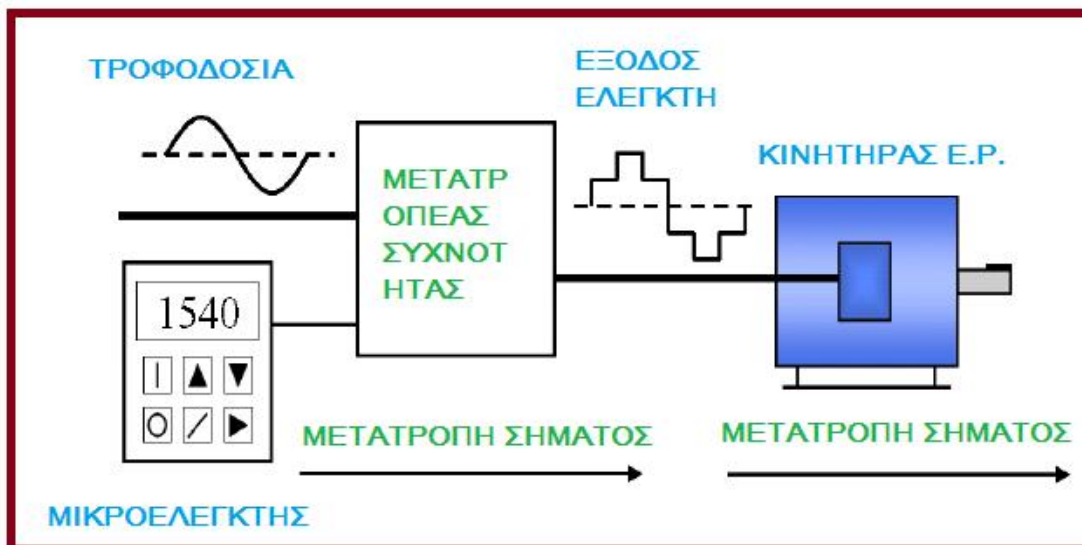
Ένας τρόπος έλεγχου των ηλεκτρικών κινητηρίων συστημάτων είναι με την χρήση των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Σε ένα ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος οι απώλειες του εξαρτώνται κυρίως από τις διακοπτικές απώλειες και τις απώλειες αγωγής των ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος και όπως είναι φυσικό επηρεάζουν τη συνολική απόδοση του συστήματος.

Οι μετατροπείς ισχύος με τη χρήση ημιαγωγικών στοιχείων ισχύος (θυρίστορ, τρανζίστορ ισχύος, MOSFET ισχύος, IGBT) επιτυγχάνουν μείωση των διακοπτικών απωλειών και ακριβή έλεγχο των ηλεκτρικών κινητήρων σε μια ευρεία περιοχή λειτουργίας με γρήγορο και αξιόπιστο τρόπο.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος είναι οι ανώτερες αρμονικές που προκαλούνται από τη λειτουργία τους και που διαχέονται στα ηλεκτρικά δίκτυα και επομένως προκαλούν σοβαρά προβλήματα τόσο στο ενεργειακό σύστημα όσο και στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα (ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές). Σε αυτά τα προβλήματα ως γνωστόν έρχεται να δώσει λύση η συνεχής εξέλιξη του τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος, κυρίως όσον αφορά τον τρόπο παλμοδότησης των ημιαγωγικών στοιχείων.

Ο πιο διαδεδομένος μετατροπέας ισχύος στην βιομηχανία είναι ο αντιστροφέας (Inverter) ελεγχόμενος μέσω τετραγωνικών παλμών (PWM) ή με ημιπονοειδή Διαμόρφωση Του Εύρους Των Παλμών (SPWM). Σε πολλές εφαρμογές κυρίως στη χρήση κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος χρησιμοποιούνται οι ανορθωτές (Rectifier) σε τριφασική μορφή με διόδους ή με θυρίστορ και έλεγχο της γωνίας έναυσης.

Η εξοικονόμηση ενέργειας δεν επιτυγχάνεται μόνο από τη βελτίωση του βαθμού απόδοσης του ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος δηλαδή του ηλεκτρονικού μετατροπέα και ηλεκτρικού κινητήρα, αλλά και από τις βελτιώσεις του ηλεκτρονικού υποσυστήματος που περιλαμβάνει τις μονάδες ελέγχου του ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος που βασίζονται στις σύγχρονες εξελιγμένες ηλεκτρονικές διατάξεις χαμηλής ισχύος όπως δείχνει και το σχέδιο που ακολουθεί.



Σχ.3.9. Έλεγχος κινητήρα με μικροελεγκτή και μετατροπέα συχνότητας

ΠΗΓΗ: «Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems»- International energy agency-Paul Waide and Conrad U. Brunner

Όπου σε ένα κινητήριο σύστημα που ελέγχεται από ένα μετατροπέα συχνότητας βάζουμε έναν μικροελεγκτή που του έχουμε δώσει τις επιθυμητές τιμές των μεγεθών για την εφαρμογή που θέλουμε να εκτελέσουμε(όπως στροφές) και μετατρέπουμε το ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα σε κλειστού βρόχου.

Οι μικροελεγκτές γενικά προγραμματίζονται σε γλώσσες χαμηλού επιπέδου. Τελευταία όλο και περισσότεροι προγραμματιστές επιλέγουν γλώσσες υψηλότερο επιπέδου. Ως γνωστόν γλώσσα χαμηλού επιπέδου ονομάζεται μια γλώσσα η οποία βρίσκεται πιο κοντά στο υλικό

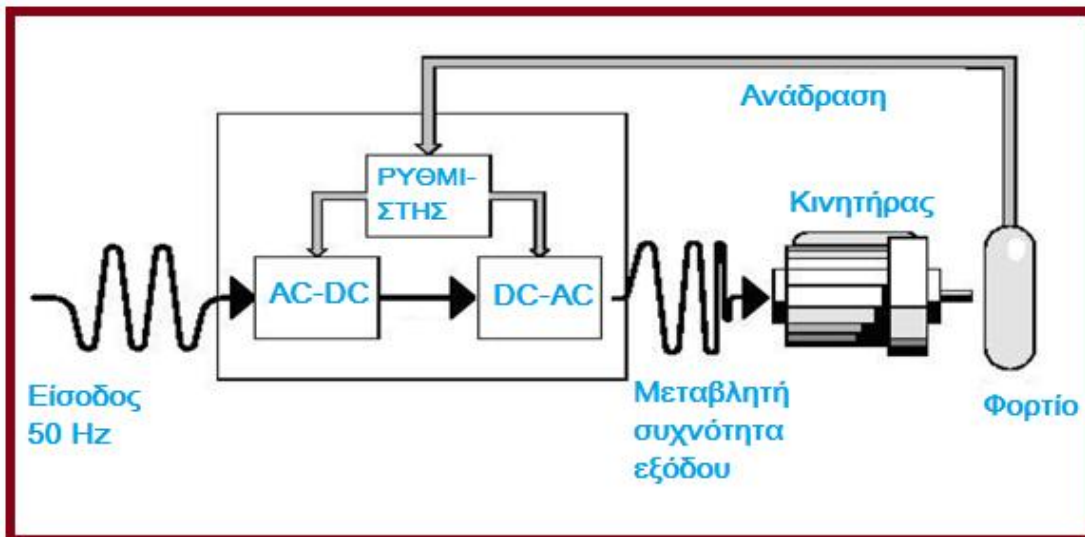
(γλώσσα μηχανής, assembly) ενώ γλώσσα υψηλού επιπέδου ονομάζεται μια γλώσσα η οποία είναι αυστηρά δομημένη και υπάρχει συγκεκριμένος μεταφραστής (compiler) ο οποίος μετατρέπει το πρόγραμμα σε γλώσσα μηχανής για τον συγκεκριμένο μικροελεγκτή.

Με τη χρήση των ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος σε παγκόσμιο επίπεδο ειδικά για τον έλεγχο των ηλεκτρονικών κινητήρων, οι οποίοι καταναλώνουν περίπου το 30% ολόκληρης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, παίζουν πρωταρχικό ρόλο στη μείωση των απωλειών και επομένως στην εξοικονόμηση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας.

3.5.2. Έλεγχος με μετατροπέα συχνότητας

Ως γνωστόν ο μετατροπέας συχνότητας αποτελεί από ένα κύκλωμα μετατροπής της AC τάσης που έχει σταθερή συχνότητα, σε διαφορετικό επίπεδο DC τάσης και ξανά μετατροπή σε AC τάση ρυθμιζόμενης συχνότητας. Κατά συνέπεια, η τάση εξόδου δεν είναι ημιτονοειδούς μορφής, αλλά ένα σχήμα τετραγωνικών παλμών υψηλής συχνότητας που προσιδιάζουν την ημιτονοειδή φόρμα όσο το δυνατόν ακριβέστερα.

Στο παρακάτω σχήμα μπορούμε να δούμε έναν μετατροπέα συχνότητας.



Σχήμα 3.10 Αρχή λειτουργίας μετατροπέα συχνότητας

Όμως η μη-ημιτονοειδής μορφή της τάσης εξόδου προκαλεί διάφορα προβλήματα, όπως δημιουργία αρμονικών που έχουν συνέπειες στη μόνωση των κυκλωμάτων, στα ρουλεμάν των κινητήρων και αλληλεπιδρούν με άλλα κυκλώματα ή μονάδες. Για να εξομαλυνθεί η κυματομορφή, τοποθετούνται φίλτρα αρμονικών στην έξοδο. Η παραπάνω λύση όμως είναι δαπανηρή και παράλληλα εισάγει έναν επιπλέον παράγοντα απωλειών. Συνηθέστερα, ωστόσο, για την αντιμετώπιση των παραπάνω φαινομένων επιλέγονται και ειδικοί κινητήρες που ανθίστανται στην ηλεκτρική επιβάρυνση αυτών. Επίσης ορισμένοι μετατροπείς συχνότητας έχουν μια επιπρόσθετη λειτουργία την λεγόμενη «Βελτιστοποίηση ροής», με την οποία βελτιστοποιείται η απόκριση της τάσης. Αυτή η λειτουργία μπορεί να αποδώσει μία πρόσθετη εξοικονόμηση ενέργειας στο σύστημα.

Οι περισσότεροι μετατροπείς συχνότητας χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα με επαγωγικούς κινητήρες. Μερικές από τις πιο συνήθεις εφαρμογές είναι:

- Συστήματα θέρμανσης
- Συστήματα εξαερισμού

- Συστήματα κλιματισμού
- Συστήματα άντλησης- μεταφοράς νερού
- Συστήματα παραγωγής πεπιεσμένου αέρα

3.6. Διόρθωση Συντελεστού Ισχύος (ΣΙ)

3.6.1. Ο ρόλος του Συντελεστού Ισχύος

Ως γνωστόν τα ωμικά ηλεκτρικά φορτία (αντιστάτες, λαμπτήρες πυρακτώσεως) απορροφούν από το δίκτυο μόνο ενεργό ισχύ (P) για την παραγωγή έργου. Στα φορτία αυτά η ένταση του ρεύματος (I) που απορροφούν από το δίκτυο δεν έχει διαφορά φάσης από την τάση (V) του δικτύου. Αντιθέτως, η πλειοψηφία των γραμμικών ηλεκτρικών φορτίων μίας εγκατάστασης χρειάζονται, εκτός από ενεργό ισχύ και άεργο ισχύ (Q) για την δημιουργία και διατήρηση του μαγνητικού πεδίου που απαιτείται για την λειτουργία τους.

Τα φορτία αυτά καλούνται επαγωγικά. Στα επαγωγικά φορτία η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα επιπορεύεται της τάσης κατά μια γωνία φ η οποία καλείται διαφορά φάσεως. Συνήθη τέτοια φορτία είναι:

- ασύγχρονοι κινητήρες που χρησιμοποιούνται στις παραγωγικές διαδικασίες βιομηχανιών και βιοτεχνιών
- ανελκυστήρες
- κυλιόμενες κλίμακες
- τα ηλεκτρικά αντλητικά συγκροτήματα
- ανεμογεννήτριες ορισμένων τεχνολογιών
- τα κλιματιστικά μηχανήματα
- οικιακές συσκευές (ψυγεία, πλυντήρια).

Το 80% της ηλεκτρικής ενέργειας καταναλώνεται σε επαγωγικά φορτία.

Ο «βαθμός» κατανάλωσης άεργου ισχύος από τα φορτία αυτά εκφράζεται με το μέγεθος του Συντελεστή Ισχύος (ΣΙ), το οποίο αντιστοιχεί στο λόγο της κατανάλωσης ενεργού ισχύος προς φαινόμενη ισχύ του φορτίου.

Αντίθετα από τα επαγωγικά, τα χωρητικά φορτία όπως είναι οι πυκνωτές παράγουν άεργο ισχύ. Έτσι όταν αυτά βρίσκονται σε κυκλώματα μαζί με επαγωγικά φορτία προσφέρουν ένα μέρος της άεργου ισχύος που παράγουν (αντισταθμίζουν) στα επαγωγικά φορτία ώστε να μην απορροφήσουν άεργο ισχύ από το δίκτυο. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται η απορρόφηση άεργου ισχύος από το δίκτυο.

Ένας κινητήρας που έχει «υποστεί» αντιστάθμιση παρουσιάζει ΣΙ κοντά στη μονάδα (>0,95) ενώ ένα φορτίο χωρίς αντιστάθμιση παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές (για τυπικούς επαγωγικούς κινητήρες 0.8-0.85).

Εάν ο κινητήρας κινεί φορτίο μικρότερο από το ονομαστικό του τότε ο ΣΙ μειώνεται όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στον Πίνακα 3.4. Αυτός είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο πρέπει να αποφεύγεται η υπερδιαστασιολόγηση ενός κινητήρα. Ένας υπερδιαστασιολογημένος κινητήρας δεν θα έχει δυσκολία να κινήσει το φορτίο του σε όλες τις περιπτώσεις, αλλά θα έχει μειωμένο συντελεστή ισχύος. Αντίθετα ένας υποδιαστασιολογημένος κινητήρας δεν θα μπορεί να κινήσει το φορτίο σε περιπτώσεις χαμηλής τάσης τροφοδοσίας ή σε περίπτωση απαίτησης «πρόσθετης» ροπής. Επιπλέον θα υπερφορτίζεται και θα έχει αυξημένο κόστος λειτουργίας και συντήρησης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4. Μεταβολή του ΣΙ(cosφ) με το φορτίο επαγωγικού κινητήρα

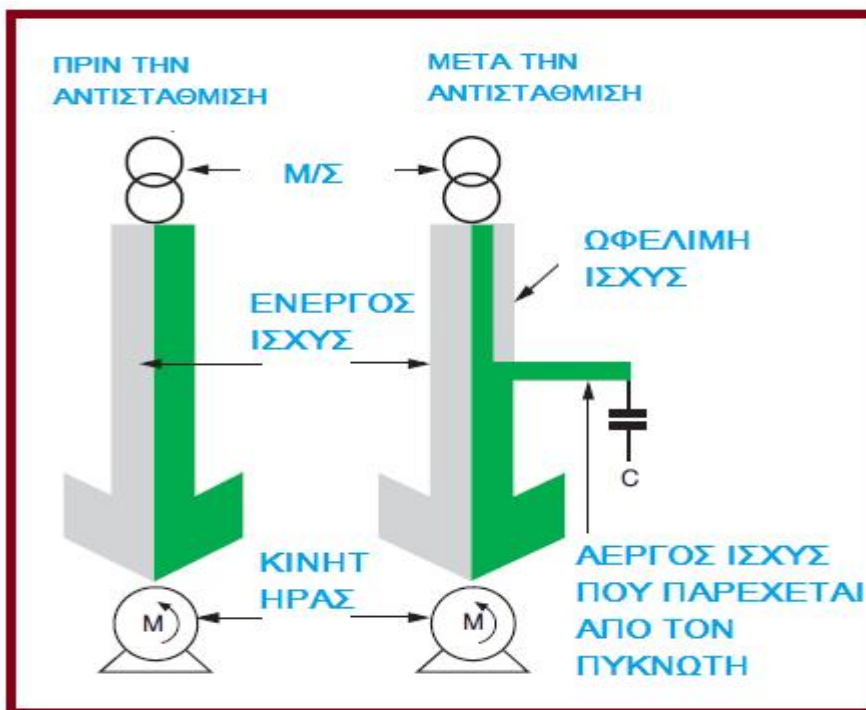
Φορτίο επαγωγικού κινητήρα (% του ονομαστικού)	ΣΙ (cosφ)
0% (χωρίς φορτίο)	0,17
25%	0,55
50%	0,73
75%	0,8
100%	0,85

ΠΗΓΗ: “Chapter L-Power factor correction and harmonic filtering”-Schneider electric

3.6.2. Διόρθωση Συντελεστού Ισχύος στους επαγωγικούς κινητήρες

Αντιστάθμιση με σύνδεση πυκνωτή

Ο πυκνωτής συνδέεται απευθείας στους ακροδέκτες του κινητήρα (ατομική αντιστάθμιση). Μετά την εφαρμογή αντιστάθμισης στον κινητήρα, το συνολικό ρεύμα (διανυσματικό άθροισμα του ρεύματος του κινητήρα και του πυκνωτή) θα μειωθεί ότα βέβαια το φορτίο ότι δεν έχει μεταβληθεί. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα σημαντικό μέρος της άεργου ισχύος που απαιτεί ο κινητήρας για την λειτουργία του τροφοδοτείται από τον πυκνωτή όπως μπορούμε να δούμε και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.11. Πριν την αντιστάθμιση με πυκνωτή ο μετασχηματιστής τροφοδοτεί όλη την άεργο ισχύ, μετά την αντιστάθμιση ο πυκνωτής τροφοδοτεί ένα μεγάλο μέρος της άεργου

ΠΗΓΗ: “Chapter L-Power factor correction and harmonic filtering”-Schneider electric

Παρόλα αυτά χρειάζεται προσοχή στον υπολογισμό και στη ρύθμιση της αντιστάθμισης καθώς η υπερβολική αντιστάθμιση μπορεί να βλάψει εξίσου ή και περισσότερο το σύστημα όπως αναλύεται στη συνέχεια.

Κίνδυνοι από υπερβολική αντιστάθμιση

Όταν ένας κινητήρας οδηγεί ένα φορτίο υψηλής ροπής αδράνειας, ο κινητήρας συνεχίζει να περιστρέφεται και μετά την διακοπή της τροφοδοσίας του. Η «μαγνητική αδράνεια» του κυκλώματος του δρομέα θα δημιουργήσει εξ' επαγωγής ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στις περιελίξεις του στάτη για ένα μικρό χρονικό διάστημα μετά την διακοπή τροφοδοσίας και θα οδηγήσει σε πλήρη απενεργοποίηση του κινητήρα μετά από ένα δυο κύκλους λειτουργίας όταν δεν υπάρχει αντιστάθμιση.

Οι πυκνωτές αντιστάθμισης, όταν υπάρχουν, αποτελούν ένα τριφασικό ασθενές φορτίο για την αναπτυσσόμενη τάση από το αλλοιωμένο πλέον ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, οπότε το ρεύμα του πυκνωτή συνεχίζει να ρέει μέσω των τυλιγμάτων του στάτη. Τα ρεύματα του στάτη παράγουν με την σειρά τους ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στον δρομέα το οποίο προστίθεται με το μαγνητικό πεδίο που αλλοιώθηκε, καθόσον ενεργεί στον ίδιο άξονα και με την ίδια κατεύθυνση με αυτό. Η ροή του δρομέα αυξάνεται με συνέπεια να αυξάνεται το ρεύμα του στάτη επομένως αυξάνεται και η τάση στα άκρα του κινητήρα, μερικές φορές και σε επικίνδυνο σημείο.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μέγιστες τιμές άεργου ισχύος που μπορούν να αντισταθμίσουν επαγωγικούς κινητήρες χωρίς να δημιουργηθεί αυτοδιέγερση για δεδομένα μεγέθη ισχύος και ταχύτητας αυτών..

Πίνακας 3.5. Μέγιστες τιμές άεργου ισχύος για ασφαλή αντιστάθμιση ανάλογα με την ισχύ και την ταχύτητα 3φασικών κινητήρων 230V/400V

Ονομαστική Ισχύς	Επιτρεπτό όριο σε KVar			
	Ταχύτητα περιστροφής (rpm)			
KW	3000	1500	1000	750
22	6	8	9	10
55	13	17	18	21
75	17	22	25	28
110	24	29	33	37
160	35	41	44	52
200	43	47	53	61
280	57	63	70	79
450	87	93	107	117

Το φαινόμενο της αυτοδιέγερσης, σαν αποτέλεσμα προβλημάτων στους υπολογισμούς ή στη ρύθμιση της ποσότητας της άεργου ισχύος συμπεριλαμβανομένης και της αποσύνδεσης, είναι ένας από τους λόγους που η λειτουργία των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος χειροτερεύει αντί να βελτιώνεται με την αντιστάθμιση.

ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΗΡΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

4.1. Τεχνικές παράμετροι λειτουργίας και απόδοσης

Η επιλογή του κινητήρα και της μονάδας οδήγησης αποτελούν βασικά ζητήματα σε ένα κινητήριο σύστημα μεταβλητής ταχύτητας και θα πρέπει να γίνονται μετά από μελέτη των χαρακτηριστικών και των απαιτήσεων της κάθε εφαρμογής. Η ικανοποιητική συνεργασία κινητήρα – μονάδας οδήγησης είναι σημαντική για να μπορέσουμε να έχουμε εξοικονόμηση ενεργείας και συνάμα μειωμένο κόστος λειτουργίας του κινητήριου συστήματος χωρίς να παραλείπεται βέβαια και το συνολικό οικονομικό κόστος που είναι πάντα το ζητούμενο.

Οι τεχνικοί παράμετροι λειτουργίας και απόδοσης ενός ηλεκτροκινητήριου συστήματος ώστε να πετύχουμε τους παραπάνω στόχους περιλαμβάνουν:

- Παράμετροι συστήματος ηλεκτρομηχανολογικής μετατροπής ενέργειας
- Παράμετροι απόκρισης λειτουργίας

Οι παράμετροι συστήματος ηλεκτρομηχανολογικής μετατροπής ενέργειας συνδέονται με την επιλογή των βασικών χαρακτηριστικών του ηλεκτροκινητήρα όπως θα αναλυθούν στη συνέχεια, ενώ οι παράμετροι απόκρισης λειτουργίας συνδέονται με την ικανοποιητική συνεργασία του συστήματος κινητήρα – μονάδας οδήγησης ανάλογα με την εργασία που πρέπει να εκτελέσουν.

4.1.1. Επιλογή κινητήρα

Για την επιλογή ενός κινητήρα που θέλουμε να εκτέλεση μια συγκεκριμένη εργασία πρέπει να πάρουμε υπόψη κάποιες παραμέτρους του κινητήρα όπως:

- Βαθμός απόδοσης
- Συντελεστής Ισχύος – Power Factor
- Λόγος απωλειών προς ροπή εξόδου (KW/Nm)
- Πυκνότητα Ροπής (Nm/m³ ή Nm/Kgr)

Βαθμός απόδοσης

Ο βαθμός απόδοσης ενός κινητήρα παίζει σημαντικό ρόλο στην επιλογή του. Ορίζεται το πηλίκο της παραγόμενης ισχύος του κινητήρα προς την ισχύ που προσφέρουμε σ' αυτόν.

$$\eta = (P_{out}/P_{in}) * 100\%$$

Ο βαθμός απόδοσης επηρεάζεται από τα υλικά που είναι κατασκευασμένος ο κινητήρας και από το μέγεθος του, καθώς μεγαλώνουν οι απώλειες του κινητήρα που είναι οι μαγνητικές απώλειες και οι μηχανικές απώλειες (όπως τα αναλύσαμε στο πρώτο κεφάλαιο). Επίσης ο βαθμός απόδοσης επηρεάζεται από την μεταβολή των ηλεκτρικών απωλειών εξαιτίας των ρευμάτων που διαρρέουν τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα, οι οποίες είναι μεταβλητές και εξαρτώνται από τη μεταβολή του φορτίου.

Ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου και την ταχύτητα περιστροφής του κινητήριου συστήματος. Από τα τεχνικά δεδομένα του κινητήρα είναι γνωστός ο ονομαστικός βαθμός απόδοσης στην ονομαστική φόρτιση που αντιστοιχεί στην ονομαστική ταχύτητα (Ω_N) στην ονομαστική τάση τροφοδοσίας. Για τα ελεγχόμενα κινητήρια συστήματα ενδιαφέρον παρουσιάζει και ο βαθμός απόδοσης στη μέγιστη ταχύτητα του κινητήριου συστήματος (Ω_{max}) που στις περιπτώσεις των επαγωγικών κινητήρων επιτυγχάνεται με αύξηση της συχνότητας της τάσης τροφοδοσίας, ενώ το μέγεθος της τάσης διατηρείται στην ονομαστική τιμή.

Έτσι όσον αφορά τον βαθμό απόδοσης πρέπει να επιλέγουμε τον μικρότερο κινητήρα, ανάλογα με την εργασία (φορτίο) που καλείται να αντεπεξέρθει, για να μειωθούν οι παραπάνω απώλειες και για να έχουμε καλύτερο βαθμό απόδοσης καθώς ένας μεγάλος κινητήρας σε μικρό φορτίο δεν λειτουργεί στον υψηλότερο βαθμό απόδοσης του.

Συντελεστής Ισχύος – Power Factor

Ο συντελεστής ισχύος είναι σημαντικός παράγοντας στην επιλογή κινητήρα γιατί αν δεν έχουμε καλό συντελεστή ισχύος θα έχουμε μεγάλη κατανάλωση σε άεργο ισχύ (όπως είδαμε στο κεφάλαιο 3).

Σαν συντελεστή ισχύος PF ορίζουμε:

$$PF = P/S$$

Όπου

- P είναι η απορροφούμενη από το δίκτυο ηλεκτρική ισχύς και ισούται με
- S είναι η φαινομένη ισχύς που δίνονται από τον τύπο $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$

όπου U η πολική τάση του δικτύου και I το ρεύμα γραμμής.

Ανεξάρτητα από τη μορφή των κυματομορφών της τάσης και του ρεύματος ο ΣI μεταβάλλεται ανάλογα με το φορτίο. Έτσι σε εφαρμογές που θέλουμε έναν κινητήρα να εργαστεί με καλό συντελεστή ισχύος θα πρέπει το φορτίο να είναι ίσο με το ονομαστικό φορτίο του κινητήρα για να έχουμε $\cos\phi$ κοντά στο 0.8 – 0.9.

Όπως γίνεται αντιληπτό η επιλογή κινητήρα με καλό συντελεστής ισχύος παίζει σημαντικό ρόλο στην εξοικονόμηση ενέργειας.

Λόγος απωλειών προς ροπή εξόδου (KW/Nm)

Ο λόγος απωλειών προς ροπή εξόδου είναι σημαντικός παράγοντας στην επιλογή κινητήρα καθώς εκφράζει το ποσό των απωλειών που παράγονται ανά μονάδα ροπής δηλ. ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης.

Ο λόγος αυτός δίνει και μία εικόνα της συμμετοχής των «σταθερών απωλειών» ενός κινητήρα (μαγνητικές και μηχανικές) στις συνολικές απώλειες του κινητήρα ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής του. Σε εφαρμογές που έχουμε χαμηλές ταχύτητες οι μηχανικές απώλειες κι οι απώλειες σιδήρου είναι μικρές και ο λόγος απωλειών προς ροπή εξόδου μεταβάλλεται ανάλογα με τις ωμικές/ηλεκτρικές απώλειες στα τυλίγματα.

Όταν έχουμε μια εφαρμογή με μεγαλύτερες ταχύτητες οι μηχανικές απώλειες κι οι απώλειες σιδήρου αυξάνονται με αποτέλεσμα να επηρεάζεται σημαντικά ο λόγος απωλειών προς ροπή εξόδου.

Πυκνότητα Ροπής (Nm/m³ ή Nm/Kgr)

Η πυκνότητα ροπής αναφέρεται στα σχεδιαστικά και κατασκευαστικά στοιχεία του κινητήρα. Είναι σημαντικός παράγοντας στην επιλογή κινητήρα καθώς συνδέει τη ροπή που μπορεί να παράγει ο ηλεκτρικός κινητήρας με τις γεωμετρικές του διαστάσεις και το βάρος.

Παίζει σημαντικό ρόλο σε εφαρμογές που απαιτείται ο κινητήρας να είναι μικρού βάρους και μικρών διαστάσεων. Χαμηλή πυκνότητα ροπής έχουμε σε εφαρμογές που χρησιμοποιούνται κινητήρες μικρής ισχύος και με χαμηλό κατασκευαστικό κόστος.

4.1.2. Απόκριση λειτουργίας συστήματος ελέγχου

Η επιλογή της μονάδας οδήγησης ανάλογα με την εφαρμογή και ανάλογα με τον κινητήρα που έχουμε επιλέξει είναι σημαντικός παράγοντας ώστε να έχουμε ικανοποιητική συνεργασία του κινητήρα με την μονάδα οδήγησης και πρέπει να πληρούν κάποιοι παράμετροι οι όποιοι είναι:

- Λόγος Μέγιστης στιγμιαίας ροπής / Ροπή αδράνειας
- Χρόνος εκκίνησης
- Ακρίβεια ελέγχου ροπής, ταχύτητας και θέσης
- Εύρος ελέγχου της ταχύτητας
- Παλμικές ροπές
- Επίπεδο θορύβου
- Μέγιστη θερμοκρασία

Λόγος Μέγιστης στιγμιαίας ροπής / Ροπή αδράνειας

Η παράμετρος αυτή εκφράζει τη μέγιστη μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας (επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης) που μπορεί να αναπτύξει η κινητήρια μηχανή του συστήματος σε μία μεταβατική κατάσταση λειτουργίας συμπεριλαμβανομένης της εκκίνησης και της πέδησης.

Η ικανότητα ενός κινητήριου συστήματος για μεγάλες ή μικρές επιταχύνσεις ή επιβραδύνσεις εξαρτάται από τον τύπο και τις διαστάσεις του κινητήρα, την τεχνική ελέγχου και τη σωστή ρύθμιση των παραμέτρων του συστήματος οδήγησης/μετατροπέα. Για παράδειγμα όταν σε μια εφαρμογή ο κινητήρας καλείται να αντεπεξέλθει σε γρήγορες μεταβολές του φορτίου τότε πρέπει να επιλέξουμε μια μονάδα οδήγησης που να μας δίνει τη δυνατότητα για γρήγορες επιταχύνσεις ή γρήγορες επιβραδύνσεις.

Ενας αντιστροφείας (inverter) μας δίνει την δυνατότητα μεταβολής του ρυθμού επιτάχυνσης και του ρυθμού επιβράδυνσης. Για παράδειγμα ένας βιομηχανικός αντιστροφείας παρέχει τη δυνατότητα ρύθμισης του ρυθμού επιτάχυνσης και επιβράδυνσης ενός κινητήρα ανάλογα με τις απαιτήσεις του φορτίου σε εύρος:

- Ρυθμός επιτάχυνσης (Acceleration rate) με εύρος από 0 μέχρι 3200.0 s/100Hz
- Ρυθμός επιβράδυνσης (Deceleration rate) με εύρος από 0 μέχρι 3200.0 s/100Hz

ΠΗΓΗ: Manual inverter

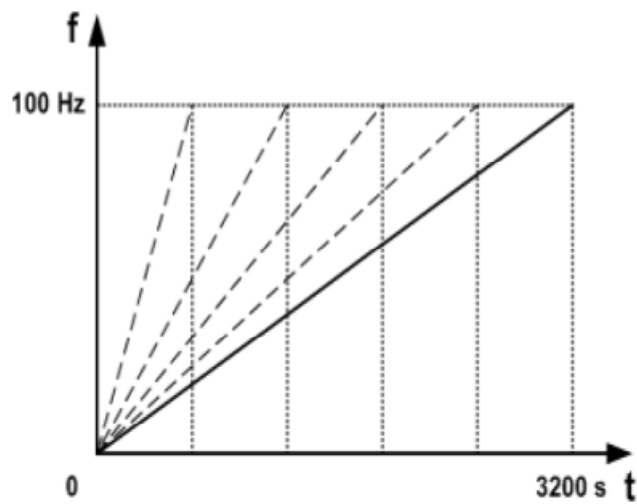
Χρόνος εκκίνησης

Ο χρόνος εκκίνησης σε κάποιες εφαρμογές είναι σημαντικός. Είναι ο χρόνος που θα χρειαστεί το σύστημα για να πάει από την ηρεμία στις ονομαστικές στροφές δηλαδή ο κινητήρας να αναπτύξει από ροπή μηδέν την ονομαστική ροπή. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται

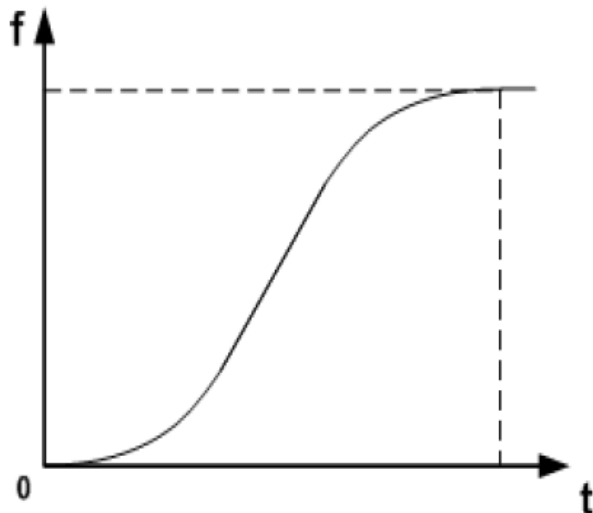
από τον τύπο και τις διαστάσεις του κινητήρα, την τεχνική ελέγχου και τη ρύθμιση του συστήματος οδήγησης/μετατροπέα.

Το να έχουμε τη δυνατότητα ρύθμισης του χρόνου εκκίνησης είναι σημαντικό. Ο αντιστροφέας (inverter) μας δίνει τη δυνατότητα να ελέγχουμε το χρόνο εκκίνησης μέσω της ράμπας επιτάχυνσης και ειδικότερα ρύθμισης του χρόνου εκκίνησης μέσω έλεγχου του ρυθμού αύξησης της συχνότητας κατά την εκκίνηση.

Οι ράμπες επιτάχυνσης μπορεί να είναι γραμμικές όπως φαίνονται στο σχήμα 4.1 ή μπορεί να είναι τύπου S που χρησιμοποιούνται για τον περιορισμό των μηχανικών σοκ (χτυπήματα) κατά την στιγμή της εκκίνησης της ηλεκτρικής μηχανής. Οι ράμπες τύπου S φαίνονται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.1 Γραμμικές ράμπες επιτάχυνσης



Σχήμα 4.2 Ράμπες επιτάχυνσης τύπου S

ΠΗΓΗ: Manual inverter

Ακρίβεια ελέγχου ροπής, ταχύτητας και θέσης

Η ακρίβεια στον έλεγχο της ροπής, ταχύτητας και θέσης παίζει σημαντικό ρόλο σε ένα ηλεκτροκινητήριο σύστημα. Η ακρίβεια του ελέγχου εξαρτάται από την επιλογή: του συστήματος ελέγχου (ανοικτού ή κλειστού βρόχου), της τεχνικής ελέγχου (ψηφιακή ή αναλογική τεχνική) και της μεθόδου διαμόρφωσης των παλμών ελέγχου των ηλεκτρονικών διακοπών του αντιστροφέα.

Η επιλογή του συστήματος και της τεχνικής ελέγχου καθορίζεται από τις ανάγκες της εφαρμογής, τις απαιτήσεις σε ποιότητα κι αξιοπιστία ελέγχου και σε σχέση με το συνολικό κόστος της εγκατάστασης.

Σε εφαρμογές όπου ο χρόνος κι η ακρίβεια απόκρισης του συστήματος δεν παίζουν σημαντικό ρόλο και δεν απαιτείται έλεγχος θέσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύστημα ελέγχου ανοικτού βρόχου το οποίο είναι απλό στην κατασκευή, εύκολο στην εγκατάσταση και οικονομικό. Αντίθετα, σε εφαρμογές όπου απαιτείται ακρίβεια και γρήγορη απόκριση στα σήματα εντολής ταχύτητας και θέσης του δρομέα (δηλαδή απαιτούνται γρήγορες κι ελεγχόμενες επιταχύνσεις κι επιβραδύνσεις) επιλέγεται σύστημα με έλεγχο κλειστού βρόχου.

Εύρος ελέγχου της ταχύτητας

Ένα σύστημα οδήγησης πρέπει να έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει την ταχύτητα από μηδέν μέχρι την ονομαστική για όλο το εύρος μεταβολής του φορτίου δηλαδή από μηδέν μέχρι την ονομαστική ροπή. Η ονομαστική ταχύτητα (n_N) επιτυγχάνεται στην ονομαστική τάση, ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες θα πρέπει να μειωθεί το μαγνητικό πεδίο.

Το εύρος ελέγχου της ταχύτητας ενός κινητήρα ($0-n_{max}$) είναι σημαντική παράμετρος ιδίως σε εφαρμογές σταθερής/ ονομαστικής ισχύος εξόδου. Το εύρος αυτό καθορίζεται από την μηχανική αντοχή του κινητήρα και εξαρτάται από την ικανότητα του συστήματος οδήγησης να δώσει την ταχύτητα αυτή. Έτσι όταν έχουμε μια εφαρμογή που πρέπει να ελέγχουμε την ταχύτητα του κινητήρα σε αυξημένο εύρος ταχυτήτων θα πρέπει να επιλέξουμε τον επαγωγικό κινητήρα με λόγο $n_{max}/n_N > 1$. Για τους επαγωγικούς κινητήρες ο λόγος αυτός κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 2 και 4. Μονάδα ελέγχου που μας δίνει τη δυνατότητα αυτή είναι ο αντιστροφέας (inverter), ο οποίος έχει δυο παραμέτρους που είναι:

- Ελάχιστη ορισμένη ταχύτητα (Minimum set speed) και μας δίνει εύρος από 0 μέχρι 2 Hz
- Μεγίστη ορισμένη ταχύτητα (Maximum set speed) και μας δίνει εύρος από 0 μέχρι 1500 Hz

ΠΗΓΗ: Manual inverter

Παλμικές ροπές

Σε ένα ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα οι παλμικές ροπές εξαρτώνται από τον τύπο και τις παραμέτρους του κινητήρα καθώς κι από την μονάδα οδήγησης και την τεχνική ελέγχου. Ο παραπάνω παράγοντας αναφέρεται στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας και παίζει πολύ σημαντικό ρόλο καθώς επηρεάζει

- Την ακρίβεια ελέγχου της ταχύτητας και θέσης
- Προκαλούν δονήσεις στο ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα
- Ενισχύουν τον θόρυβο του κινητήρα.

Γίνεται αντιληπτό ότι ο λόγος του μεγέθους των παλμικών ροπών (ΔT_p) προς το μέγεθος της ονομαστικής ροπής (T_N) θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος.

Επίπεδο θορύβου

Σε ένα ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα μεταβλητής ταχύτητας ο θόρυβος που παράγεται από τον κινητήρα και τη μονάδα οδήγησης είναι ανεπιθύμητος.

Ανάλογα με την εφαρμογή που θέλουμε το ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα να εκτελέσει μπορούμε να θέσουμε και το ανώτερο επίπεδο θορύβου που είναι αποδεκτό και το οποίο στη συνέχεια θα παίξει σημαντικό ρόλο στην επιλογή του κινητήρα και της μονάδας οδήγησης και της τεχνικής ελέγχου. Είναι γνωστό ότι τα υψηλά επίπεδα θορύβου σε εργασιακό χώρο δημιουργεί πολλά προβλήματα όπως:

- Κάλυψη επιθυμητών ήχων
- Ενόχληση
- Ακουστική κόπωση
- Βλάβη της ακοής

Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας

Το μέγιστο όριο θερμοκρασίας που μπορεί να λειτουργεί η ηλεκτρική μηχανή και η μονάδα οδήγησης είναι από τα σημαντικότερα στοιχεία σχεδιασμού.

Για εφαρμογές που το ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα εκτίθεται σε μεγάλες θερμοκρασίες δημιουργούνται κίνδυνοι για τον κινητήρα καθώς το ανώτερο επίπεδο θερμοκρασίας του προκύπτει από την κλάση μόνωσης του κι εξαρτάται από το βαθμό προστασίας και τον τρόπο ψύξης του.

Γενικά η θερμοκρασία λειτουργίας του κινητήρα παίζει σημαντικό ρόλο στη διάρκεια ζωής του καθώς επηρεάζει τη διάρκεια ζωής των μονώσεων του.

Όσον αφορά στο μετατροπέα (μονάδα οδήγησης) η αύξηση της θερμοκρασίας πάνω από το επιτρεπτό όριο μειώνει την απόδοσή του, ώστε να προστατεύσει τα εξαρτήματα από υπερθέρμανση και σε ακραίες περιπτώσεις ο μετατροπέας απενεργοποιείται εντελώς. Μόλις η θερμοκρασία των εξαρτημάτων που κινδυνεύουν πέσει κάτω από την κρίσιμη τιμή θερμοκρασίας ο μετατροπέας ενεργοποιεί ξανά το ιδανικό σημείο λειτουργίας του.

4.2. Οικονομικοί παράμετροι λειτουργίας και απόδοσης

Το συνολικό κόστος ενός ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος είναι πολύ σημαντικό κριτήριο κι εξαρτάται από τον τύπο του κινητήρα και την μονάδα οδήγησης του που επιλέγεται για την εκάστοτε εφαρμογή και διακρίνεται σε:

- Κόστος αγοράς
- Κόστος λειτουργίας
- Κόστος συντήρησης

Το κόστος αγοράς είναι το κόστος ολοκλήρου του ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος δηλαδή κινητήρα, μονάδα ελέγχου λειτουργίας, αισθητήρες, μετρητικές ή διατάξεις καταγραφής μεγεθών.

Το κόστος συντήρησης είναι το κόστος που απαιτεί το ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα για συντήρηση για όλη τη διάρκεια ζωής του.

Το κόστος λειτουργίας είναι το κόστος που απαιτεί το ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα για τη λειτουργία κατά τη διάρκεια της ζωής του και εξαρτάται σημαντικά από το βαθμό απόδοσης όλης της διάταξης.

Από τα τρία παραπάνω κόστη το μεγαλύτερο είναι το κόστος λειτουργίας (όπως θα δούμε στον παρακάτω πίνακα 4.3) και μπορεί να γίνει και μεγαλύτερο αν δεν έχουμε κάνει σωστή επιλογή του κινητήρα και της μονάδας οδήγησης.

4.3 Παραδείγματα εξοικονόμησης ενέργειας και χρημάτων σε μια εφαρμογή

Χρήση μετατροπέα συχνότητας

Αφού αναφερθήκαμε ιδιαίτερα στις εφαρμογές εγκατάστασης ενός μετατροπέα συχνότητας για τον έλεγχο λειτουργίας ενός κινητήριου συστήματος, στον παρακάτω πίνακα αναλύεται ένα παράδειγμα εξοικονόμησης κόστους μιας εφαρμογής αντλιοστασίου. Στην εφαρμογή αυτή η αντλία λειτουργεί συνδεδεμένη μέσω ενός μετατροπέα συχνότητας και με απευθείας σύνδεση του συστήματος στο δίκτυο.

Πίνακας 4.2. Οικονομική αποδοτικότητα ανάλογα με τον έλεγχο λειτουργίας επαγωγικού κινητήρα

	Απευθείας σύνδεση	Σύνδεση μέσω μετατροπέα συχνότητας
Αντλία και κινητήρας (~3KW)	1.000 €	1.000 €
Εγκατάσταση	1.000 €	1.200 €
Μετατροπέας συχνότητας		800 €
Συνολικό κόστος εγκατάστασης	2.000 €	3.000 €
Κατανάλωση ενέργειας επί 15 έτη με το συγκεκριμένο σύστημα	394200 KWh	275940 KWh
Συνολικό κόστος ενέργειας με το συγκεκριμένο σύστημα (0,09€/KWh)	35.478 €	24.834 €

ΠΗΓΗ: "Ενεργειακή αποδοτικότητα χάρη στην αυξομείωση στροφών συστήματος κίνησης με μετατροπέα συχνότητας"-www.centraline.com

Το συμπέρασμα που προκύπτει από τον παραπάνω πίνακα είναι:

Αν εγκαταστήσει κάποιος τον κινητήρα σύστημα με απευθείας σύνδεση θα εξοικονομήσει το ποσό των 1000€ στην αγορά και εγκατάσταση του συστήματος. Σε 15 χρόνια όμως θα έχει χάσει ένα ποσό της τάξης των 10000 € περίπου ή αλλιώς περίπου 800€ το χρόνο καθόσον στο χρονικό αυτό διάστημα λειτουργίας της ίδιας αντλίας με μετατροπέα συχνότητας καταναλώνονται συνολικά 118260 KWh λιγότερες σε σχέση με απευθείας σύνδεση, αξίας 10.644 €, δηλαδή 7884KWh λιγότερες ή 710 € περίπου το χρόνο.

Η χρήση μετατροπέων συχνότητας για τον έλεγχο του αριθμού στροφών μηχανών συνεχούς ροής, όπως αντλιών, ανεμιστήρων και συμπιεστών δεν είναι καινούργια ιδέα. Ωστόσο οι νέες τεχνολογίες στον τομέα αυτό κάνουν αυτή την λύση ακόμα ελκυστικότερη λόγω του περιορισμένου κόστους. Η χρήση ηλεκτροκινητήρων με αυξομείωση στροφών σε συστήματα

θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού παρέχει σημαντικές δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας. Αυτή η τεχνολογία συμβάλει σημαντικά στην τήρηση τοπικών και διεθνών συμφωνιών και προτύπων στον τομέα της πολιτικής εξοικονόμησης ενέργειας και στην μείωση των εκπομπών ρύπων διοξειδίου του άνθρακα.

Αντικατάσταση κινητήρων

Η αντικατάσταση των κινητήρων σαφώς και αποτελεί την ευκολότερη λύση όσον αφορά την μείωση των ενεργειακών απωλειών. Στις περιπτώσεις που δεν έχουμε κάνει καλή επιλογή κινητήρα για την εφαρμογή που τον θέλουμε είναι πιο συμφέρουσα λύση η αντικατάσταση του κινητήρα όπως θα δούμε παρακάτω. Πόσο μάλλον όταν πρόκειται για αντικατάσταση πεταλαιωμένων κινητήρων και υπερδιαστασιοποιημένων κινητήρων που δεν πληρούν σε κανένα σημείο τις σύγχρονες προδιαγραφές. Λόγω των διάφορων απωλειών (απώλειες χαλκού στάτη, πυρήνα, χαλκού δρομέα, τριβών και ανεμισμού, διαφεύγουσες απώλειες, ηλεκτρικές απώλειες), η απόδοση του κινητήρα αυτών συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 75 έως 95% ανάλογα με το μέγεθός του. Αν και είναι η πιο δαπανηρή λύση να αντικαταστήσει κάποιος ένα κινητήρα, το πραγματικό κέρδος όμως επιτυγχάνεται σε βάθος χρόνου.

Όπως μπορούμε να δούμε στον παρακάτω πίνακα το πραγματικό κόστος δεν είναι ούτε της αγοράς ούτε της συντήρησης καθώς το κόστος λειτουργίας φτάνει στους περισσότερους κινητήρες σε τιμές πάνω από 90% επί του συνολικού κόστους ανεξαρτήτως ισχύος.

Πίνακας 4.3. Σύγκριση κόστους ανάλογα με το μέγεθος του επαγωγικού κινητήρα

	1.5KW	15KW	110KW
Κόστος συντήρησης	0.9%	0.2%	0.1%
Κόστος Αγοράς	2.3%	1.1%	0.9%
Κόστος λειτουργίας	96.8%	98.7%	99%

ΠΗΓΗ: Παρουσίαση Siemens «Ενεργειακά αποδοτικοί κινητήρες»

Όπως μπορούμε να καταλάβουμε ανάλογα με την εφαρμογή που θέλουμε να εκτελέσουμε κυρίαρχο ρόλο παίζουν οι υψηλότερης απόδοσης κινητήρες. Έτσι οι αντικαταστάσεις των παλαιότερων κινητήριων συστημάτων έχει γίνει επιτακτικός σκοπός των βιομηχανιών και όχι μόνο καθώς οι διαφορές και οι επιπτώσεις (όπως αναλύθηκαν και παραπάνω) σε σχέση με τα νέα σύγχρονα κινητήρια συστήματα δε θα μπορούσαν να περάσουν απαρατήρητα.

5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία έγινε μία προσπάθεια αποτίμησης των τεχνικών μέτρων για την αύξηση της αποδοτικότητας και ιδιαίτερα την εξοικονόμηση ενέργειας στα ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα παραγωγής, καθώς τα συστήματα αποτελούν έναν από τους πλέον ενεργοβόρους τομείς στην παγκόσμια βιομηχανία και όχι μόνο.

Αναλύονται οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν και την κατανάλωση ενέργειας ενός ηλεκτροκινητήριου συστήματος, όπως είναι η αποδοτικότητα του κινητήρα, η διαστασιολόγησή του, η κατάλληλη επιλογή του συστήματος ελέγχου, ο έλεγχος έναρξης λειτουργίας και έλεγχος ταχύτητας και η ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος. Πολλές εφαρμογές στη βιομηχανία μπορεί να έχουν απαίτηση από το ηλεκτρικό κινητήριο συστήματα λειτουργία σε μεγάλο εύρος ταχύτητας, άμεση απόκριση με γρήγορες επιταχύνσεις κι επιβραδύνσεις, σταθερότητα ροπής και ακρίβεια στον έλεγχο ταχύτητας και θέσης. Η επιλογή του κινητήρα (αποδοτικότητα, διαστασιολόγηση) και της μονάδας οδήγησης (έναρξη/παύση λειτουργίας, έλεγχος ταχύτητας και ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος), πρέπει να γίνεται αναλύοντας αρχικά τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής και λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους που αναλύθηκαν στο κεφαλαίο 4, ώστε να πετύχουμε μείωση στο κόστος λειτουργίας του ηλεκτρικού κινητήριου συστήματος.

Όμως οι ενέργειες για μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας στα ηλεκτροκινητήρια συστήματα αυτά δεν σταματούν, καθώς η βελτίωση της συνεργασίας μεταξύ κινητήρα και μονάδα οδήγησης αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την επίτευξη του στόχου. Όπως καταλαβαίνουμε η αποδοτικότητα σε ένα ηλεκτρικό κινητήριο σύστημα δεν επιτυγχάνεται βελτιώνοντας ένα μέρος του αλλά επιτυγχάνεται βελτιώνοντας όλη τη διάταξη αυτού ώστε να πετύχουμε:

- Καλύτερο έλεγχο της διαδικασίας παραγωγής
- Αποδοτική λειτουργία (π.χ. μικρότερη φθορά μηχανολογικού εξοπλισμού, λιγότερο θόρυβο) σε μεγαλύτερο εύρος μεταβολών
- Αξιοπιστία σε μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας

Έτσι οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες για βελτίωση της ποιότητας των ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων οδήγησαν πολλές κατασκευαστικές εταιρίες ηλεκτρικών κινητήρων και μονάδων οδήγησης στο να πετύχουν το βέλτιστο ολοκληρωμένο σχεδιασμό συστημάτων, ώστε να έχουμε εμείς την επιλογή το καλύτερου συνδυασμού των δυο, που θα ανταποκρίνεται καλύτερα στις ανάγκες και απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής που θέλουμε να εκτελέσουμε.

Η παρούσα εργασία, αν και δεν περιλαμβάνει ενδελεχή ανάλυση της τεχνικής και της οικονομίας αύξησης της ενεργειακής αποδοτικότητας των συστημάτων οδήγησης επαγωγικών κινητήρων, βοηθά στον προσδιορισμό των επιλογών ή των παρεμβάσεων που είναι κατάλληλες για ένα ηλεκτροκινητήριο σύστημα, και δίνει μία «εκτίμηση» της εξοικονόμησης σχετικά με το κόστος παρέμβασης.

Τονίζουμε και πάλι ότι η καταλληλότητα των παρεμβάσεων εξαρτάται από το μέγεθος, αλλά και από τα ειδικά χαρακτηριστικά της κάθε εφαρμογής/εγκατάστασης και αποτιμάται με βάση την εφαρμοσιμότητα και την αποδοτικότητα/κερδοφορία.

6. Βιβλιογραφία

Ηλεκτρικές μηχανές – Stephen Chapman

Ηλεκτρικά κινητήρια συστήματα – R. Krishnan

Οδηγός ενεργειακού ελέγχου και καταγραφής -Κ.Α.Π.Ε.

Εξοικονόμηση ενέργειας-οδηγός λύσεων-schneider electric

Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems-International energy agency-Paul Waide and Conrad U. Brunner

http://library.tee.gr/digital/m2483/m2483_tsotoulidis2.pdf

http://hlektrologia.weebly.com/uploads/6/7/1/5/6715419/p209_284.pdf

http://en.wikipedia.org/wiki/Induction_motor

http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/HLMHX_EN6.pdf

<http://eclass.teipat.gr/eclass/modules/document/file.php/487116/Manual%20inverter.pdf>

<http://eclass.teipat.gr/eclass/modules/document/file.php/487116/%CE%A3%CE%97%CE%9C%CE%95%CE%99%CE%A9%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3%20%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%91%CE%A3%CE%A4%CE%97%CE%A1%CE%99%CE%9F%CE%A5%20%CE%97.%CE%9A.%CE%A3..pdf>

http://www.cres.gr/motorchallenge/Praktika/pdf_synedriou/Electric_Motor_systems.pdf

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

http://www.civitec.it/site/new_specs.pdf

<http://alexander.ee.auth.gr:8083/eTHMMY/archive/106/customStore/elecmach.pdf>

<http://www.cres.gr/motorchallenge/Distribution.pdf>

<http://vivliothmmy.ee.auth.gr/1914/1/motor.pdf>

<http://sfhmmy3.sfhmmy.gr/cd/data/10.pdf>

<http://blogs.sch.gr/mlagoudakos/files/2015/03/Valiadis-Motors.pdf>