



A.E.I ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ

Τ. Ε. Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΧΟΛΗ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

Επιβλέπων: ΗΡΑΚΛΗΣ ΒΥΛΛΙΩΤΗΣ, Καθηγητής Εφαρμογών

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

STUDY AND CONSTRUCTION OF SINGLE- PHASE ENGINE



Πτυχιακή Εργασία:

ΛΑΜΠΡΟΣ ΣΥΜΙΓΙΑΝΝΗΣ

ΑΜ: 36486

ΑΙΓΑΛΕΩ

Οκτώβριος 2017

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Σε αυτό το σημείο της πτυχιακής, θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον κ. Ηρακλή Βυλλιώτη υπεύθυνο καθηγητή της πτυχιακής μου για την πολύτιμη βοήθεια του και καθοδήγηση κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης τον αδελφό μου Θοδωρή για την τεχνική υποστήριξη που μου παρείχε στο πρακτικό κομμάτι της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου, στους γονείς μου Ιωάννη και Σταματική, για τη διαρκή υποστήριξή τους τόσο οικονομικά όσο και ψυχολογικά μέχρι και σήμερα, δείχνοντας μου κατανόηση και εμπιστοσύνη. Σε αυτούς θα ήθελα να αφιερώσω την πτυχιακή μου εργασία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη των μονοφασικών επαγωγικών κινητήρων καθώς και η κατασκευή της περιέλιξης ενός μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα με πυκνωτή λειτουργίας.

Στο πρώτο κεφάλαιο της πτυχιακής αναφέρομαι στα βασικά μέρη της θεωρίας των ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής, στο προσδιορισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος μηχανών επαγωγής, στην κλάση σχεδίασης των κινητήρων και στους διάφορους μεθόδους ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής των κινητήρων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνω έμφαση στους μονοφασικούς κινητήρες, αναλύοντας την αρχή λειτουργία τους και τους διάφορους τρόπους εκκινήσεως τέτοιων κινητήρων. Στην συνέχεια παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα των μονοφασικών κινητήρων και οι διάφοροι τρόποι ελέγχου της ταχύτητας τους.

Στα κεφάλαια τρία και τέσσερα αναφέρομαι στα διαφορετικά είδη των τυλιγμάτων, επικεντρώνοντας περισσότερο στα μονοφασικά τυλίγματα.

Το πέμπτο κεφάλαιο σχετίζεται με τα μονωτικά υλικά και τους αγωγούς που χρησιμοποιούνται στις περιελίξεις των κινητήρων παρουσιάζοντας τις ιδιότητες τους.

Στα δυο τελευταία κεφάλαια πραγματοποιείται μελέτη και σχεδιασμός ενός μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα, καθώς και η αναλυτική περιγραφή της ανακατασκευής των τυλιγμάτων του.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ηλεκτρικές μηχανές, μονοφασικοί κινητήρες, τυλίγματα, μονωτικά υλικά, περιέλιξη,

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to study single-phase induction motors as well as the construction of winding of a single-phase motor with a capacitor.

In the first chapter of the dissertation I refer to the basic parts of the theory of electric induction motors, to the determination of the parameters of the equivalent induction motor circuit, to the engine design class and to the various methods of controlling the speed of rotation of the motors.

In the second chapter I focus on single-phase motors, analyzing their starting function and the various ways to start such motors. The equivalent circuit of the single-phase motors and the various ways of controlling their velocity are presented below.

In chapters three and four I refer to the different types of windings, focusing more on single-phase windings.

The fifth chapter relates to insulating materials and conductors used in motor windings presenting their properties.

In the last two chapters you study and design a single-phase induction motor with a short-circuited rotor, as well as a detailed description of the reconstruction of its windings.

KEY WORDS

Electric motors, single-phase motors, windings, insulating materials, winding,

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Ηλεκτρικές μηχανές.....	6
1.1 Ηλεκτρική ενέργεια και μηχανές επαγωγής	6
1.2 Ιστορική αναδρομή	7
1.3 Βασική δομή μιας μηχανής εναλλασσομένου ρεύματος	10
1.3.1 Στάτης.....	11
1.3.2 Δρομέας.....	12
1.4 Συχνότητα και ολίσθηση.....	13
1.5 Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα.....	15
1.6 Απώλειες και διάγραμμα ροής ισχύος.....	18
1.7 Χαρακτηριστική ροπής – στροφών.....	19
1.8 Κατάταξη κινητήρων επαγωγής	22
1.9 Έλεγχος ταχύτητας στους επαγωγικούς κινητήρες	25
1.9.1 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή του αριθμού των πόλων.....	26
1.9.2 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της συχνότητας του δικτύου	30
1.9.3 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας.....	30
1.9.4 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της αντίστασης δρομέα	31
1.10 Προστασία του Κινητήρα.....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ασύγχρονοι μονοφασικοί επαγωγικοί κινητήρες	33
2.1 Εισαγωγή.....	33
2.2 Αρχή λειτουργίας ασύγχρονου μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα	33
2.3 Τεχνικές εκκίνησης και λειτουργίας μονοφασικών επαγωγικών κινητηρών	37
2.3.1 Εκκίνηση με χρήση του βοηθητικού τυλίγματος.....	38
2.3.2 Εκκίνηση με χρήση πυκνωτή εκκίνησης.....	41
2.3.3 Εκκίνηση με χρήση πυκνωτή μόνιμης λειτουργίας	43
2.3.4 Εκκίνηση με χρήση δύο πυκνωτών(εκκίνησης και μόνιμης λειτουργίας).....	45
2.3.5 Κινητήρες με βοηθητικούς πόλους.....	46
2.4 Ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα.....	48
2.4.1 Ισοδύναμο κύκλωμα για λειτουργία του κινητήρα με το κύριο τυλίγμα.....	48
2.4.2 Ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα για λειτουργία με δυο τυλίγματα	52
2.5 Έλεγχος της ταχύτητας των μονοφασικών επαγωγικών κινητηρών	54
2.6 Χωρητικότητα πυκνωτών μονοφασικών ασύγχρονων κινητήρων.....	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Τυλίγματα στάτη E.P.	56
3.1 Συγκρότηση των τυλιγμάτων του στάτη	56
3.2 Χρησιμοποίηση των τυλιγμάτων με μάτσα και μπάρες.....	56
3.3 Τιμή της Η.Ε.Δ.	56
3.4 Είδη Τυλιγμάτων.	57
3.5 Γεωμετρικές ηλεκτρικές μοίρες.....	57
3.6 Τύποι των τυλιγμάτων του στάτη	58
3.7 Τυλίγματα με βήμα ακέραιο και με βήμα σμικρυνόμενο	58
3.8 Πλεονεκτήματα των τυλιγμάτων με 2 στρώσεις και με βήμα σμικρυνόμενο	60
3.9 Συντελεστής τυλίγματος, συντελεστής βήματος	61
3.10 Συντελεστής κατανομής	62
3.11 Συντελεστής του σμικρυνόμενου βήματος.....	63

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μονοφασικά τυλίγματα.....	64
4.1 Τύποι μονοφασικών τυλιγμάτων.....	64
4.2 Συστήματα συνδέσεων.....	69
4.2.1 Σύνδεση σε σειρά.....	69
4.2.2 Σύνδεση παράλληλη.....	69
4.2.3 Σύνδεση μεικτή (σειράς – παράλληλη).....	70
4.3 Συντελεστής κατανομής K_k	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Μόνωση περιελίξεων.	72
5.1 Εισαγωγή.....	72
5.2 Μονωτικά υλικά.....	73
5.3 Ιδιότητες μονωτικών υλικών.....	75
5.4 Διηλεκτρική σταθερά και αντοχή ενός υλικού.....	76
5.5 Αγωγοί τυλιγμάτων.....	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Μελέτη ασύγχρονου μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα με πυκνωτή λειτουργίας.....	81
6.1 Υπολογισμός ειδικών μεγεθών του στάτη.....	81
6.2 Το κύριο τύλιγμα.....	84
6.3 Το βοηθητικό τύλιγμα.....	84
6.4 Ο δρομέας.....	85
6.5 Ο πυκνωτής λειτουργίας.....	85
6.6 Υπολογισμός ολίσθησης.....	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Περιέλιξη μονοφασικού κινητήρα.....	87
7.1 Ο κινητήρας της εφαρμογής.....	87
7.2 Αφαίρεση τυλιγμάτων στάτη.....	88
7.3 Η μόνωση του κινητήρα.....	90
7.4 Η διαμόρφωση των τυλιγμάτων του μονοφασικού κινητήρα.....	91
7.5 Η περιέλιξη του μονοφασικού κινητήρα.....	94
7.6 Οι εσωτερικές συνδέσεις των τυλιγμάτων.....	97
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	103

Κεφάλαιο 1 : Ηλεκτρικές Μηχανές.

1.1 Ηλεκτρική ενέργεια και μηχανές επαγωγής.

Η παραγωγή αγαθών και υπηρεσιών με έξυπνο τρόπο σχετίζεται άμεσα με την ευημερία μιας κοινωνίας.

Η ενέργεια σήμερα διατίθεται ως επί το πλείστον στις εξής μορφές: θερμική, ηλεκτρική και μηχανική. Η ηλεκτρική ενέργεια, με ανοδική τάση μάλιστα αντιπροσωπεύει το 30% της συνολικής χρησιμοποιούμενης ενέργειας, ενώ άλλο μέρος της χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμότητας ή για φωτισμό. Το μεγαλύτερο μέρος της, μετατρέπεται με τη βοήθεια των ηλεκτρικών κινητήρων σε μηχανική.

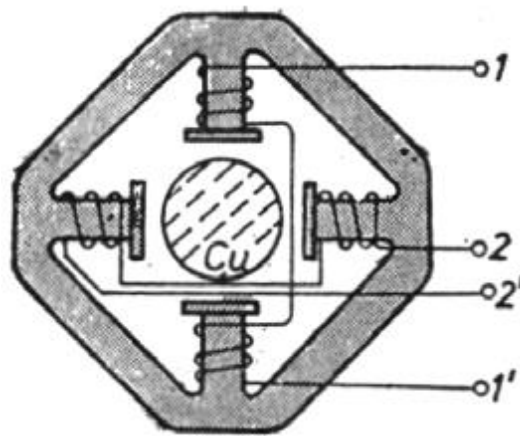
Μεταξύ των ηλεκτρικών κινητήρων, οι κινητήρες επαγωγής είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται περισσότερο, στη βιομηχανία αλλά και σε οικιακές συσκευές. Βασικά χαρακτηριστικά που συνέβαλαν στην καθιέρωση τους είναι η τροφοδοσία τους, η οποία γίνεται απευθείας από το ηλεκτρικό δίκτυο τόσο στο μονοφασικό όσο και στο τριφασικό. Επίσης, είναι κατασκευαστικά στιβαροί και απλοί διασφαλίζοντας έτσι περιορισμένο κόστος κατασκευής.

Σήμερα περίπου το 10% των ηλεκτρικών κινητήρων χρησιμοποιεί μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος για τον έλεγχο της ταχύτητάς τους, οι περισσότεροι κινητήρες τροφοδοτούνται απευθείας από το δίκτυο. Τέτοιες διατάξεις βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στις μεταφορές, σε συμπιεστές και αντλίες, σε ανεμιστήρες, στη ρομποτική, σε υβριδικά ή ηλεκτρικά αυτοκίνητα, σε πλυντήρια κτλ. Στην επομένη δεκαετία προβλέπεται ότι περισσότερο του 50% των κινητηρίων θα χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά ισχύος.

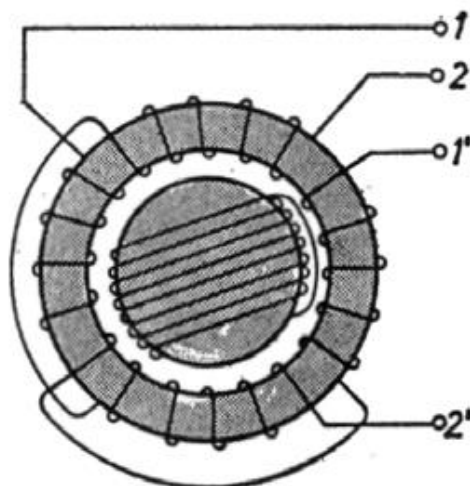
Βασικό πλεονέκτημα της μεταβαλλόμενης ταχύτητας είναι η υψηλότερη παραγωγικότητα με λιγότερες απώλειες και μικρότερο κόστος. Ειδικότερα, η μείωση των απωλειών οδηγεί σε μικρότερη περιβαλλοντική, θερμική και χημική επιβάρυνση στο χώρο που δουλεύει ο κινητήρας, καθώς επίσης και σε περιορισμό της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας στη μονάδα παραγωγής. Το σημαντικότερο μειονέκτημα των ηλεκτρονικών ισχύος είναι η δημιουργία αρμονικών συχνοτήτων που μολύνουν το ηλεκτρικό δίκτυο προκαλώντας ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στο περιβάλλον.

1.2 Ιστορική αναδρομή.

Έχοντας ήδη ανακαλυφθεί ο νόμος της επαγωγής το 1831 από τον Faraday και οι εξισώσεις του ηλεκτρισμού (εξισώσεις Maxwell) το 1860 από τον Maxwell, οι συνθήκες για την εφεύρεση της μηχανής επαγωγής από τους Galileo Ferraris το (1885) και Nicola Tesla το (1886) ήταν καλές. Οι μηχανές επαγωγής τους φαίνονται στο Σχήμα 1.1 και στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.1. Κινητήρας επαγωγής του Ferraris (1885).



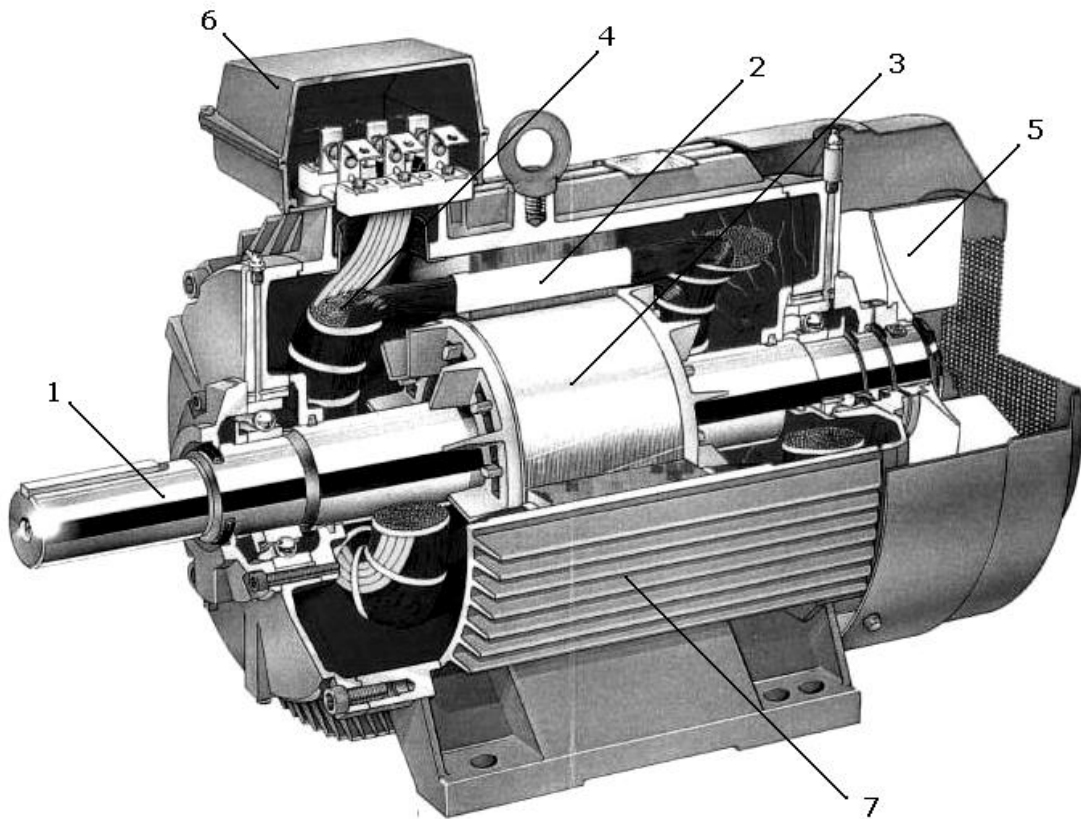
Σχήμα 1.2. Κινητήρας επαγωγής του Tesla (1887).

Οι κινητήρες των Tesla και Ferraris τροφοδοτούνται και οι δυο από διφασική εναλλασσόμενη τάση για αυτό και υπάρχουν τα διφασικά συγκεντρωμένα τυλίγματα (1-1' και 2-2') στο πυρήνα του στάτη.

Ο δρομέας του κινητήρα επαγωγής του Ferraris είναι κατασκευασμένος από χάλκινο κύλινδρο, ενώ του Tesla αποτελείτε από σιδηρομαγνητικό κύλινδρο με βραχυκυκλωμένο τύλιγμα. Παρόλο που οι σύγχρονοι κινητήρες επαγωγής έχουν καλύτερη απόδοση και πιο περίτεχνη τοπολογία η βασική αρχή δεν έχει αλλάξει.

Δηλαδή, πολυφασικό εναλλασσόμενο τύλιγμα στο στάτη που δημιουργεί στρεφόμενο πεδίο το οποίο επάγει τάσεις. Στη συνέχεια, οι επαγόμενες τάσεις δημιουργούν ρεύματα στο βραχυκυκλωμένο τύλιγμα του δρομέα. Τα επαγόμενα ρεύματα στο δρομέα αλληλεπιδρούν με το πεδίο του στάτη κάνοντας τον κινητήρα να λειτουργεί. Αν η ροπή σε μηδενική ταχύτητα δρομέα είναι μη μηδενική, ο κινητήρας επαγωγής μπορεί να ξεκινήσει αυτόνομα.

Ο Dolivo-Dobronosky το 1880 ήταν αυτός που πρότεινε το τριφασικό εναλλασσόμενο δίκτυο ικανό για την μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, αλλά και να μπορεί να τροφοδοτεί κινητήρες επαγωγής και άλλους καταναλωτές. Επίσης, το 1889 εφηύρε κινητήρα επαγωγής με τυλιγμένο δρομέα καθώς και των δρομέα κλωβού, με μια τυπολογία πολύ κοντά σε αυτή που χρησιμοποιείται σήμερα. Τέλος, εφηύρε το δρομέα διπλού κλωβού.



Σχήμα 1.3. Μοντέρνος 3Φ κινητήρας επαγωγής βραχυκυκλωμένου κλωβού: (1) άξονας, (2) στάτης, (3) δρομέας, (4) τύλιγμα στάτη, (5) φτερωτή ανεμισμού, (6) κιβώτιο σύνδεσης τυλιγμάτων /ακροδεκτών και (7) πλαίσιο (κατασκευή ABB, 90KW,1484ΣΑΛ,630kg).

Παρόλο που οι κινητήρες επαγωγής ήταν έτοιμοι για βιομηχανική χρήση από το 1910, μέχρι το 1985 οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος κατείχαν το μεγαλύτερο μέρος σε εφαρμογές μεταβλητής ταχύτητας, μόνο μετά την ανάπτυξη των IGBT PWM (παλμοκωδική διαμόρφωση με χρήση διακοπών IGBT) οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος είχαν δυναμική επιστροφή σε τέτοιου τύπου εφαρμογές αντικαθιστώντας τους DC κινητήρες.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα γεγονότα και οι εξελίξεις που σημάδεψαν την ιστορία των κινητήρων επαγωγής.

- Όλο και καλύτερα αναλυτικά μοντέλα μόνιμης κατάστασης.
- Καλύτερα μονωτικά υλικά και συστήματα ψύξης.
- Οικονομικότεροι μετατροπείς IGBT PWM μεγαλύτερης πυκνότητας ισχύος και λιγότερων απωλειών.
- Ντετερμινιστικές και στοχαστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης του σχεδιασμού.
- Νέες μέθοδοι για κατασκευή και δοκιμή των μηχανών επαγωγής.
- Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων και σε συνδυασμό με κυκλωματικά μοντέλα για εκτενή ανάλυση μηχανών με κρίσιμη ηλεκτρική και μαγνητική φόρτιση .

1.3 Βασική δομή μιας μηχανής εναλλασσομένου ρεύματος.

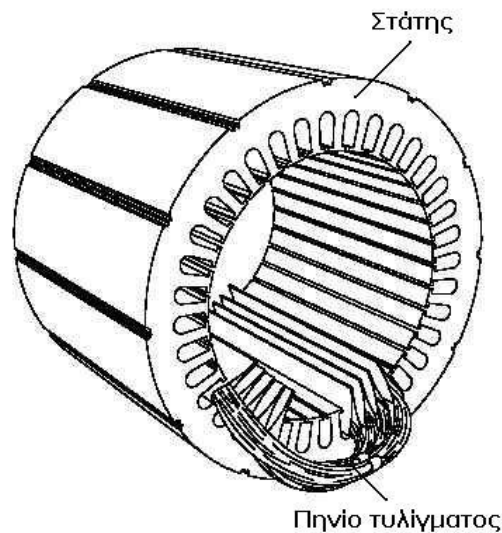
Οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος αποτελούνται από δυο μέρη, το σταθερό τμήμα της που λέγεται στάτης ενώ το άλλο βρίσκεται επί του άξονος της μηχανής και λέγεται δρομέας, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να στρέφεται.

Στο στάτη είναι τοποθετημένα τυλίγματα, ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από τον αριθμό των φάσεων. Τα τυλίγματα του στάτη είναι υπεύθυνα για την παραγωγή του κύριου μαγνητικού πεδίου, τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενη τάση είτε απευθείας από το δίκτυο είτε μέσω αντιστροφέα.

Η κατασκευαστική δομή του στάτη αποτελείται από ελάσματα πολύ καλά μονωμένα μεταξύ τους, ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία δινορευμάτων σε αυτόν. Όπως σημειώθηκε πιο πάνω, ο δρομέας αποτελεί ουσιαστικά το κινούμενο μέρος της μηχανής. Στην περίπτωση που η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας, όταν περιστρέφεται προσφέρει κινητική ενέργεια, ενώ όταν λειτουργεί ως γεννήτρια δέχεται κινητική ενέργεια. Ο δρομέας και αυτός επίσης είναι κατασκευασμένος από ελάσματα για τον ίδιο λόγο, δηλαδή τη μείωση των απωλειών λόγω των δινορευμάτων.

1.3.1 Στάτης.

Ο Στάτης είναι ένας κούφιος κύλινδρος, ο οποίος αποτελείται από ομοιόμορφα διανεμημένες αύλακες στο εσωτερικό του.

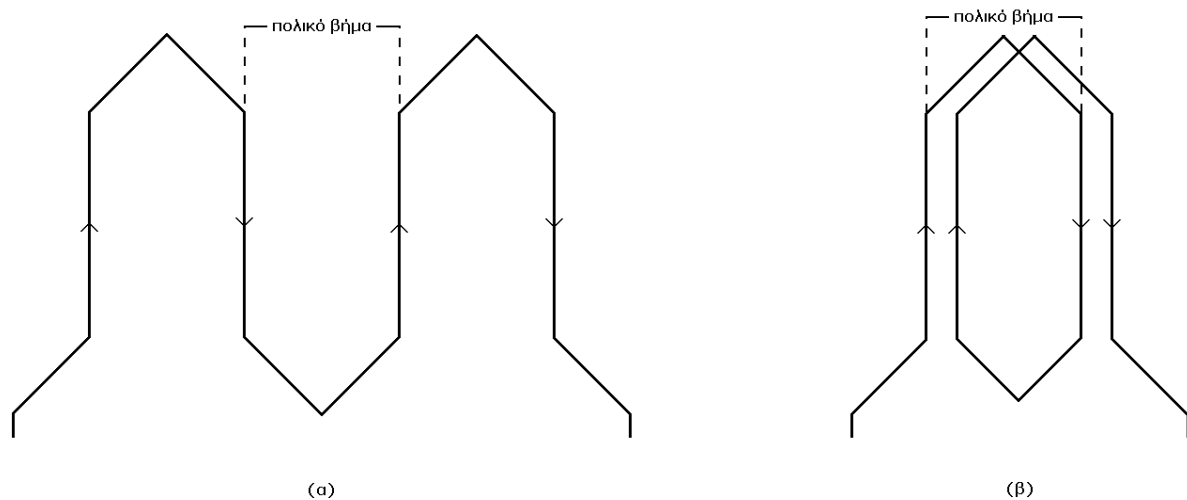


Σχήμα 1.4. Στάτης μηχανής επαγωγής.

Σε αυτές τις όμορφες διανεμημένες αύλακες τοποθετούνται τα σύρματα, για την δημιουργία ενός πλήρους τυλίγματος όμοια πηνία τοποθετούνται σε απέναντι αύλακες, ενώ στη συνέχεια συνδέονται μεταξύ τους σε ομάδες. Για παράδειγμα, στους τριφασικούς κινητήρες τα πηνία τους συνδέονται σε σχήμα αστέρα ή τριγώνου.

Επίσης, υπάρχουν τυλίγματα διπλής στρώσης, όπου κάθε αύλακα περιέχει δυο πλευρές πηνίου: η μια βρίσκεται στην κορυφή ενώ η άλλη στο κάτω μέρος του αύλακα. Ο αριθμός των πόλων εξαρτάται από το τύλιγμα και την τροφοδότηση της μηχανής.

Το βρογχοτύλιγμα και το κυματοειδές είναι αυτά που χρησιμοποιούνται περισσότερο. Το βρογχοτύλιγμα χρησιμοποιείται σε μηχανές με λίγους πόλους και υψηλές ταχύτητες, ενώ το κυματοειδές σε πολυπολικές μηχανές χαμηλών ταχυτήτων.



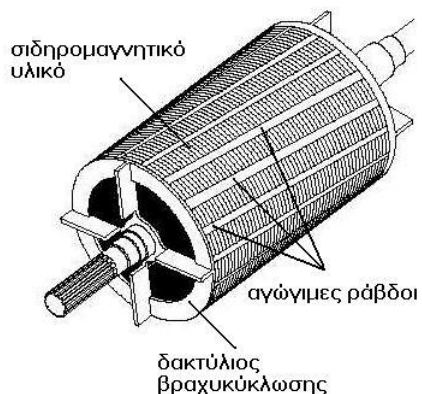
Σχήμα 1.5. Τα τυλίγματα των ηλεκτρικών μηχανών: (α) κυματοειδές, (β) βρογχοειδές.

1.3.2 Δρομέας

Ο δρομέας μιας μηχανής επαγωγής έχει και αυτός τύλιγμα το οποίο είναι ηλεκτρικά κλειστό.

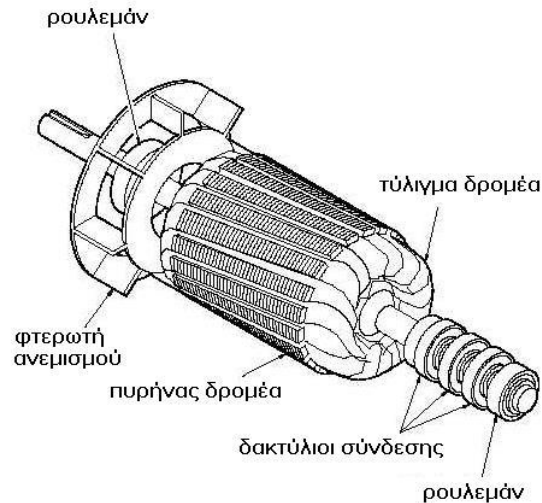
Οι ποιο διαδεδομένοι τύποι δρομέων που χρησιμοποιούνται είναι δυο :

(α) Τύλιγμα κλωβού: Ο συγκεκριμένος τύπου δρομέα αποτελείται από αγωγίμους ράβδους, κατασκευασμένοι από αλουμίνιο ή χαλκό, τοποθετημένοι σε αύλακες στο σιδερένιο πύρινα του δρομέα και βραχυκυκλωμένοι στα άκρα τους με δακτυλίους.



Σχήμα 1.6. Δρομέας με τύλιγμα κλωβού.

(β) Τυλιγμένος (δακτυλιοφόρος) δρομέας: Αυτού του τύπου δρομέας έχει πολυφασικό τύλιγμα όμοιο με αυτό του στάτη, επίσης έχει και τον ίδιο αριθμό πόλων. Η σύνδεση των ακροδεκτών του τυλίγματος γίνεται μέσω δακτυλίων και ψυκτών με εξωτερικές ρυθμιζόμενες αντιστάσεις που χρησιμοποιούνται για την αύξηση της αντίστασης του δρομέα κατά την εκκίνηση του κινητήρα.



Σχήμα 1.7. Τυλιγμένος δρομέας.

1.4 Συχνότητα και ολίσθηση.

Η επαγόμενη τάση στους αγωγούς του δρομέα εξαρτάται από τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς τα μαγνητικά πεδία. Η σχετική κίνηση του δρομέα περιγράφεται από δυο μεγέθη, το πρώτο είναι η διαφορά ταχύτητας του δρομέα από τη σύγχρονη ταχύτητα και ορίζεται ως ταχύτητα ολίσθησης:

$$n_r = n_s - n$$

οπού n_r : η ταχύτητα ολίσθησης της μηχανής.

n_s : η ταχύτητα των μαγνητικών πεδίων ή σύγχρονος αριθμός στροφών.

n : η μηχανική ταχύτητα του δρομέα.

Επίσης, ο σύγχρονος αριθμός στροφών n_s ορίζεται συναρτήσει της συχνότητας ως εξής:

$$n_s = \frac{f_s}{p}$$

όπου f_s : η συχνότητα του εναλλασσομένου ηλεκτρικού ρεύματος στο στάτη.

p : είναι ο αριθμός των μαγνητικών πόλων.

Ακόμα η ταχύτητα ολίσθησης μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της συχνότητας ως εξής:

$$n_r = \frac{f_r}{p}$$

όπου f_r : η συχνότητα του εναλλασσομένου ηλεκτρικού ρεύματος στο δρομέα.

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι :

$$f_s = f_r + np$$

- f_s : στάτης
- f_r : δρομέας
- n : αριθμός στροφών δρομέα

Το δεύτερο βασικό μέγεθος που χαρακτηρίζει τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο είναι η ολίσθηση (slip), η οποία ορίζεται ως η ποσοστιαία διαφορά της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα από τη σύγχρονη ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, και εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{n_r}{n_s}$$

Όταν έχουμε κατάσταση ηρεμίας δηλαδή ο δρομέας μια μηχανής επαγωγής είναι ακινητοποιημένος $n = 0$ τότε ισχύει $s = 1$, ενώ όταν ο δρομέας στρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα δηλαδή $n = n_s$ ολίσθηση είναι μηδέν $s = 0$, επίσης για $n > n_s$ όταν δηλαδή ο δρομέας στρέφεται πιο γρήγορα από το στρεφόμενο πεδίο, η ολίσθηση είναι αρνητική.

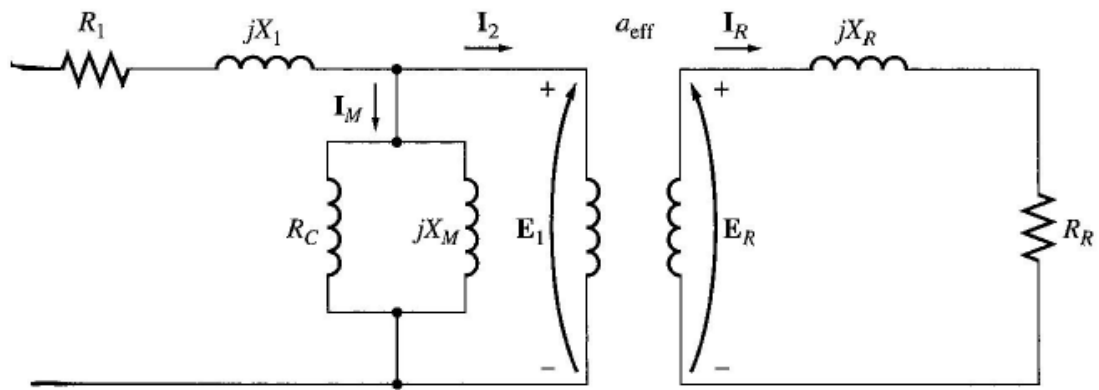
Η συχνότητα στο δρομέα σχετίζεται με την ηλεκτρική συχνότητα στο στάτη ως εξής.

$$f_r = s f_s$$

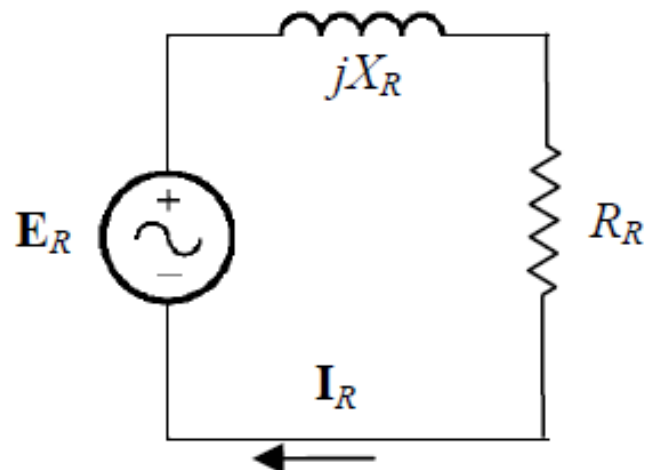
- Στην κατάσταση αδράνειας ($n = 0 \text{ rpm}$) ισχύει $s = 1$ οπότε η συχνότητα του δρομέα γίνεται $f_r = f_s$
- Ενώ για $n = n_s$ έχουμε $s=0$ οπότε η συχνότητα του δρομέα είναι $f_r = 0 \text{ Hz}$

1.5 Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα.

Έχοντας υπόψη την αρχή λειτουργίας των κινητήρων επαγωγής συμπεραίνουμε ότι η λειτουργία τους είναι παρόμοια με αυτή του μετασχηματιστή, επομένως το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα θα μοιάζει αρκετά με αυτό του μετασχηματιστή. Μπορεί να θεωρηθεί ότι το πρωτεύον ενός μετασχηματιστή με αντίσταση R_1 είναι στην ουσία το τύλιγμα του στάτη, το οποίο αντικατοπτρίζει τις θερμικές απώλειες των αγωγών του. Η σύζευξη των επιμέρους κυκλωμάτων του κινητήρα δεν είναι τόσο καλή εξαιτίας του διακένου συγκριτικά με αυτή του μετασχηματιστή. Αυτό ισχύει επειδή η συνολική μαγνητική ροή που δημιουργεί το κύκλωμα του στάτη αναλύεται σε δυο μέρη, το ένα μέρος της σχετίζεται με αυτό του κυκλώματος του δρομέα και το άλλο στη ροή σκέδασης η οποία παριστάνεται μέσω της αντίδρασης X_1 . Ακόμα το ρεύμα μαγνήτισης είναι το I_M (ο λόγος της ανάπτυξης της μαγνητικής ροής) στο οποίο αντιστοιχίζεται η αντίδραση X_M . Οι απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων στο σιδηρομαγνητικό υλικό περιγράφονται με την ωμική αντίσταση R_C . Οι εσωτερικές τάσεις E_1 και E_R σχετίζονται μέσω κάποιου μετασχηματισμού a . Η τάση E_R είναι αυτή που επάγεται στο δρομέα και δημιουργεί την κυκλοφορία του ηλεκτρικού ρεύματος στο κύκλωμά του. Σημειώνεται ότι η βασική διαφορά μεταξύ των ισοδύναμων κυκλωμάτων του μετασχηματιστή και του κινητήρα επαγωγής παρουσιάζεται σε αυτά τα μεγέθη του δρομέα που προέρχονται από την επίδραση της μεταβολής της συχνότητας του δρομέα στα μεγέθη E_R, R_R, X_R .



Σχήμα 1.8. Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα.



Σχήμα 1.9. Ισοδύναμο κύκλωμα μόνο του δρομέα.

Η σχετική ταχύτητα του δρομέα ως προς το πεδίο του στάτη εξαρτάται άμεσα από την επαγόμενη τάση στους αγωγούς του, δηλαδή όσο πιο μεγάλη η σχετική ταχύτητα τόσο πιο μεγάλη και η επαγόμενη τάση στο δρομέα. Πιο συγκεκριμένα, στην εκκίνηση του κινητήρα ο δρομέας έχει μηδενική ταχύτητα και η επαγόμενη τάση είναι η μέγιστη δυνατή (E_{R0}), ενώ όταν ο δρομέας περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα η τάση στο δρομέα είναι μηδέν. Για όλες τις υπόλοιπες τιμές της ταχύτητας περιστροφής η επαγόμενη τάση είναι ανάλογη της ολίσθησης.

$$E_R = S E_{R0}$$

Η αντίδραση του δρομέα X_R εξαρτάτε από την αυτεπαγωγή και από τη συχνότητα του ρεύματός που τον διαρρέει. Επειδή όμως, η συχνότητα του ρεύματος του δρομέα συνδέεται άμεσα με αυτή του στάτη μέσω της σχέσης $\omega_R = S\omega_e$, προκύπτει πως η αντίδραση του δρομέα εκφράζεται ως εξής :

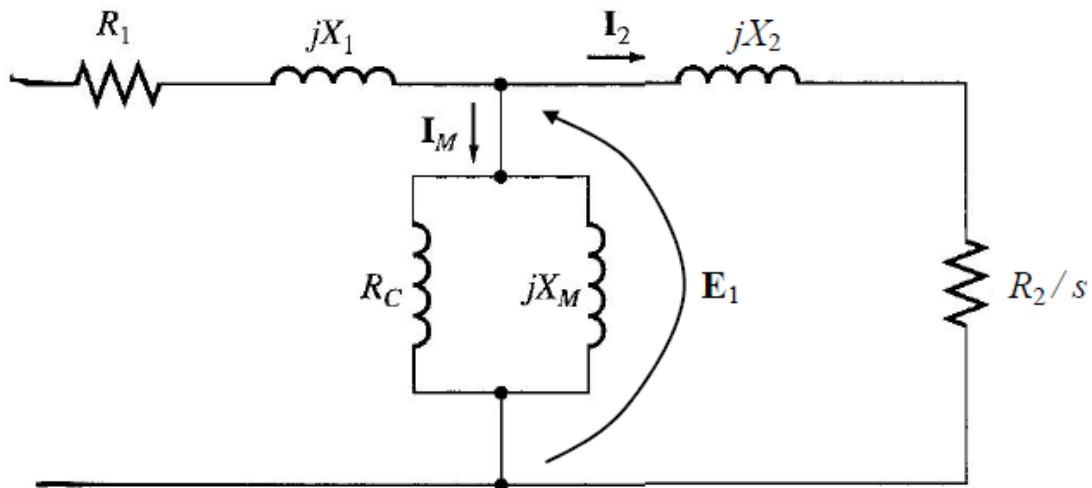
$$X_R = \omega_R L_R = S\omega_e L_R = S X_{R0}$$

X_{R0} είναι η αντίδραση του δρομέα όταν αυτός δεν περιστρέφεται . Ενώ για το ρεύμα του δρομέα ισχύει :

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R} \Rightarrow I_R = \frac{E_{R0}}{\frac{R_R}{S} + jX_{R0}}$$

Συμπεραίνουμε πως το κύκλωμα του δρομέα μπορεί να θεωρηθεί ότι τροφοδοτείται από μια σταθερή πηγή τάσης E_{R0} ενώ επίσης περιλαμβάνει μια (ισοδύναμη) μεταβλητή σύνθετη αντίσταση $R_R/S + jX_{R0}$. Ακόμα βλέπουμε πως όταν η ολίσθηση είναι μικρή το ωμικό μέρος παίρνει μεγάλες τιμές ($R_R/S \gg X_{R0}$) ενώ το ρεύμα μεταβάλλεται γραμμικά με την ολίσθηση, αντίθετα όταν η ολίσθηση παίρνει μεγάλες τιμές ($R_R/S \ll X_{R0}$) το ρεύμα προσεγγίζει σταθερή τιμή.

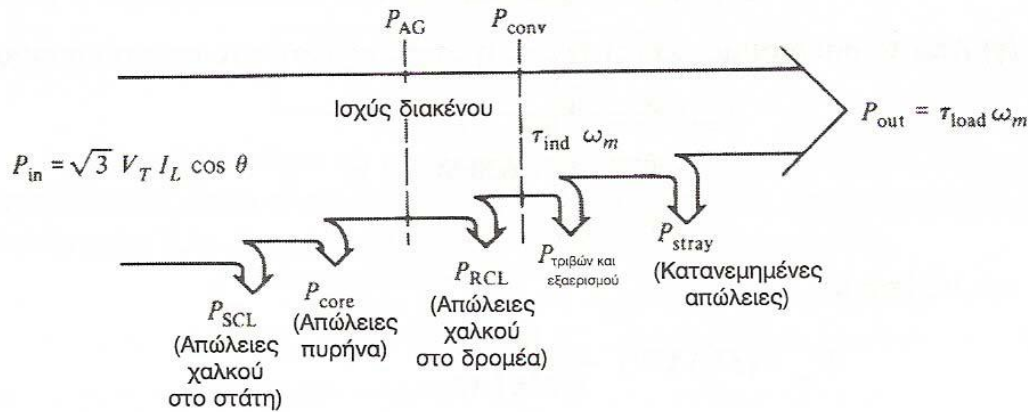
Τέλος, για το ακόλουθο τελικό κυκλωματικό ισοδύναμο του επαγωγικού κινητήρα συνυπολογίζουμε την τιμή του λόγου μετασχηματισμού a και ορίζουμε τις τιμές $E_1 = a E_{R0}$, $I_2 = I_R / a$, $R_2 = a^2 R_R$ και $X_2 = a^2 X_{R0}$



Σχήμα 1.10. Τελικό κυκλωματικό ισοδύναμο του επαγωγικού κινητήρα.

1.6 Απώλειες και διάγραμμα ροής ισχύος.

Επειδή ο δρομέας ενός επαγωγικού κινητήρα είναι βραχυκυκλωμένος στην έξοδο της μηχανής δεν εμφανίζεται ηλεκτρική ισχύς αλλά μηχανική. Στο παρακάτω διάγραμμα ροής παρουσιάζονται οι απώλειες στον κινητήρα επαγωγής καθώς και η σχέση ανάμεσα στην ηλεκτρική ισχύ εισόδου και στη μηχανική ισχύ εξόδου .



Σχήμα 1.11. Διάγραμμα ροής- Απώλειας κινητήρων.

Σύμφωνα με το διάγραμμα ροής βλέπουμε ότι η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από το τριφασικό σύστημα ισχύς εισέρχεται στον κινητήρα και εξέρχεται ως μηχανική.

Στην συνέχεια οι θερμικές απώλειες στο τυλίγμα χαλκού του στάτη είναι οι πρώτες που συναντάμε.

$$P_{scl} = I^2 R$$

Ενώ συνέχεια έχουν οι :

P_{core} όπου είναι οι απώλειες στον πυρήνα, δηλαδή οι απώλειες υστέρησης δινορευμάτων του μετάλλου της μηχανής.

P_{AG} η ισχύς που έχει απομείνει διέρχεται από το διάκενο και μετατρέπεται ως εξής:

P_{RCL} θερμικές απώλειες στα τυλίγματα του δρομέα.

P_{conv} η εναπομένουσα ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική.

$P_{F\&W}$ η μηχανικές απώλειες δηλαδή οι απώλειες τριβών και εξασρισμού.

P_{stray} καταναεμημένες απώλειες που δεν μπορούν να ενταχθούν σε κάποια από τις προηγούμενες κατηγορίες απωλειών, μαζί με τις $P_{F\&W}$ αποτελούν τις απώλειες περιστροφής της μηχανής.

P_{out} είναι η ισχύς εξόδου της μηχανής η ισχύς δηλαδή που έχει απομείνει.

Η P_{out} δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$P_{out} = T_{load} \omega_m$$

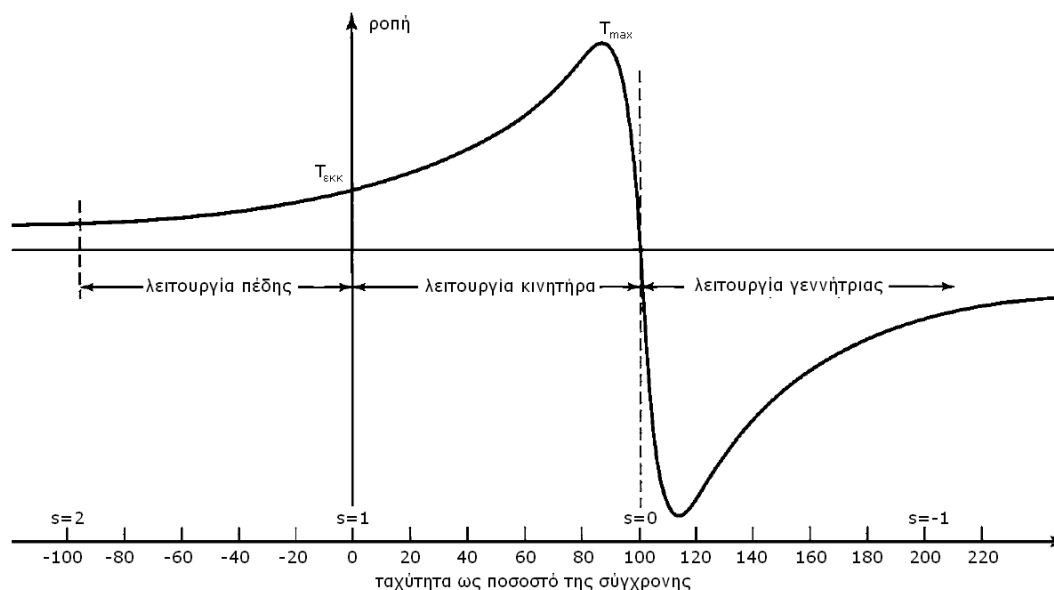
Η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα και οι απώλειες περιστροφής είναι ανάλογες ,δηλαδή όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής αυξάνονται και οι απώλειες. Αντίθετα, οι απώλειες του πυρήνα μικραίνουν όσο μεγαλώνει η ταχύτητα του κινητήρα.

1.7 Χαρακτηριστική ροπής –στροφών.

Η γενική εξίσωση για τη σχέση της επαγόμενης ροπής του κινητήρα με την ταχύτητα περιστροφής του βγαίνει με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα και το διάγραμμα ροής.

$$T_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 \frac{R_2}{S}}{\omega_{sync} \left[\left(R_{TH} + \frac{R_2}{S} \right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]}$$

Η καμπύλη ροπής – ολισθήσεως χαράζεται σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση.



Σχήμα 1.12. Η καμπύλη ροπής –ολίσθησεως.

Στην καμπύλη φαίνονται οι τρεις περιοχές λειτουργίας της επαγωγικής μηχανής. Για ολίσθηση $1 > s > 0$ η μηχανή συμπεριφέρεται ως κινητήρας, για $s < 0$ συμπεριφέρεται ως γεννήτρια και για $s > 1$ βρίσκεται σε κατάσταση πέδησης.

Στην περιοχή πέδησης είμαστε όταν κατά την λειτουργία ως κινητήρας έχουμε αντιστροφή φάσεων στα τυλίγματα τροφοδοσίας. Αυτό έχει ως συνέπεια την αναστροφή του μαγνητικού πεδίου καθώς και την ανάπτυξη μια ηλεκτρομαγνητικής ροπής αντίθετη από την ήδη υπάρχουσα μηχανική ροπή, πράγμα που οδηγεί τον κινητήρα στην πέδηση. Την στιγμή που οι δυο ροπές εξισωθούν και αποσυνδεθεί η τροφοδοσία τότε έχουμε αποτελεσματική πέδηση του κινητήρα.

Για το διάστημα $1 > s > 0$ η μηχανή συμπεριφέρεται ως κινητήρας. Τη στιγμή που η ολίσθηση είναι μηδέν, δηλαδή ο κινητήρας περιστρέφεται στη σύγχρονη ταχύτητα, η ηλεκτρομαγνητική ροπή δεν αναπτύσσεται. Με την αύξηση της ολίσθησης η σχετική ταχύτητα μειώνεται ενώ η ηλεκτρομαγνητική ροπή αυξάνεται μέχρι τη μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής. Η πτώση τάσης στο στάτη είναι χαμηλή και η ροπή διακένου παραμένει περίπου σταθερή σε αυτή την περιοχή λειτουργίας.

$$T_{\epsilon\kappa\kappa} = \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_{th}^2 R_2}{(R_{th} + r_2)^2 + (X_{th} + x_2)^2}$$

Μεγίστη ροπή έχουμε όταν η προδιδόμενη στην αντίσταση R_2/s ισχύς γίνει μέγιστη. Αυτή η ισχύς θα είναι μέγιστη όταν η σύνθετη αντίσταση R_2/s είναι ίση με το μέτρο της σύνθετης αντίστασης μεταξύ αυτής και της σταθερής τάσης V_1 δηλαδή :

$$\frac{R_2}{S_{maxT}} = \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}$$

Οπότε η ολίσθηση όταν έχουμε μέγιστη ροπή είναι :

$$S_{maxT} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}}$$

Ενώ η μέγιστη ροπή είναι :

$$T_{max} = \frac{3}{2} \frac{1}{\omega_s} \frac{V_{th}^2}{R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}}$$

Σύμφωνα με τις εξισώσεις η ολίσθηση είναι ανάλογη με την αντίσταση του δρομέα R_2 . Με την αύξηση της αντίστασης του δρομέα χρησιμοποιώντας μια εξωτερική αντίσταση (ο επαγωγικός κινητήρας είναι τυλιγμένου δρομέα) η μέγιστη εσωτερική ροπή δεν επηρεάζεται αλλά η ταχύτητα στην οποία λαμβάνεται μπορεί να ελεγχθεί .

Η τρίτη περιοχή είναι αυτή που η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια. Αυτό συμβαίνει όταν η ολίσθηση της μηχανής γίνει αρνητική δηλαδή ο δρομέας περιστρέφεται σε συχνότητα μεγαλύτερη της συχνότητας του δικτύου τροφοδοσίας του στάτη. Έτσι δημιουργείται ροή ισχύος από το μηχανικό μέρος στο δίκτυο του στάτη.

1.8 Κατάταξη κινητήρων επαγωγής.

Εξαιτίας των διαφόρων εφαρμογών και λειτουργικών χαρακτηριστικών των κινητήρων επαγωγής η NEMA (National Electrical Manufacturer Association) των ΗΠΑ κατάταξε του κινητήρες σε διάφορες κατηγορίες ή κλάσεις όπως λέγονται ανάλογα με τη χαρακτηριστική ροπής - στροφών του κάθε κινητήρα.

Κλάση σχεδίασης Α.

Είναι κινητήρες που παρουσιάζουν κανονική ροπή εκκίνησης, κανονικό ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση. Όταν λειτουργεί με πλήρες φορτίο η ολίσθηση θα πρέπει είναι μικρότερη του 5% και μικρότερη από την ολίσθηση ενός κινητήρα κλάσεις Β. Επίσης, η ροπή ανατροπής είναι 200% - 300% της ροπής κατά την πλήρη φόρτιση. Ενώ η ροπή εκκίνησης στους μεγάλους κινητήρες είναι τουλάχιστον ίση με την ονομαστική ροπή και στους μικρούς κινητήρες είναι ίση ή μεγαλύτερη από το 200% της ονομαστικής ροπής τους. Το μεγαλύτερο πρόβλημα αυτής της κλάσης σχεδίασης αποτελεί το ιδιαίτερο υψηλό κρουστικό ρεύμα κατά την εκκίνηση, φτάνοντας δηλαδή το 500% - 800% του ονομαστικού ρεύματος. Σε αυτούς του τύπου κινητήρες με μέγεθος πάνω των 7.5 hr χρησιμοποιείται κάποια μέθοδος μείωσης της τάσης κατά την εκκίνηση έτσι ώστε το σύστημα ισχύος στο οποίο συνδέεται να προστατεύεται από μεγάλες πτώσης τάσης. Αυτού του τύπου κινητήρες αποτελούσαν καθιερωμένη σχεδίαση για εφαρμογές κάτω από 7.5 hr και πάνω από 200 hr. Σήμερα όμως έχουν αντικατασταθεί από τους κινητήρες κλάσεις Β. Οι βασικές εφαρμογές αυτών των κινητήρων ήταν η οδήγηση ανεμιστήρων, φυσερών, αντλιών τόνων και άλλων εργαλειομηχανών.

Κλάση σχεδίασης Β.

Αυτοί του τύπου κινητήρες έχουν κανονική ροπή εκκίνησης, μικρότερο ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση. Η ροπή εκκίνησης που παράγει είναι ίδια με τις μηχανές κλάσης Α και το ρεύμα εκκίνησης είναι περίπου 25% μικρότερο. Έτσι με τους κινητήρες κλάσης Β μπορούμε να έχουμε άμεση τροφοδότηση από το δίκτυο για μηχανές μεγαλύτερης ισχύος σε σχέση με του κινητήρες κλάσης Α. Το ρεύμα εκκίνησης μειώνεται αυξάνοντας την αντίδραση σκέδασης, ενώ η ροπή εκκίνησης διατηρείται με χρήση δρομέα διπλού κλωβού ή βαθέων αυλάκων. Ακόμα η ολίσθηση και η απόδοση πλήρους φορτίου είναι καλές και παρόμοιες με τους κινητήρες κλάσης Α. Ωστόσο, η μεγαλύτερη αντίδραση μειώνει ελαφρά το συντελεστή ισχύος καθώς και τη μέγιστη ροπή (συνήθως μόνο λίγο πάνω από το 200% της ροπής πλήρους φορτίου είναι εφικτή). Αυτού του τύπου κινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως σε συστήματα σταθερής ταχύτητας όπου η ροπή εκκινήσεως δεν είναι απαραίτητα μεγάλη, δηλαδή σε αεριστήρες, φυσητήρες, αντλίες και εργαλειομηχανές.

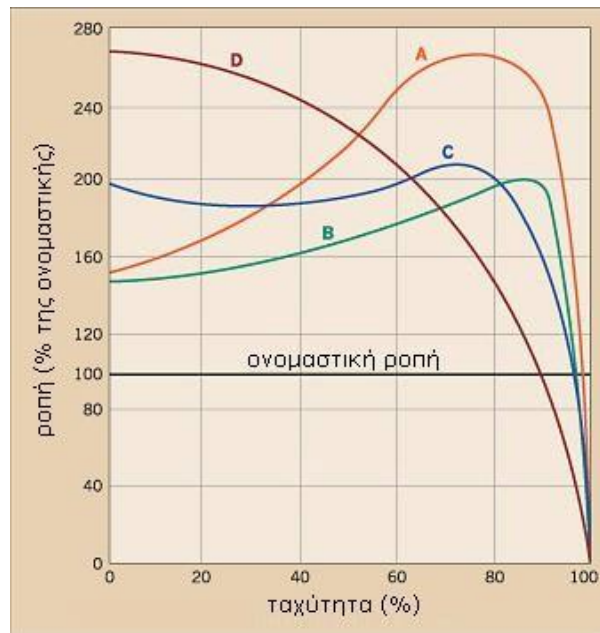
Κλάση σχεδίασης C.

Οι κινητήρες κλάσεως C παρουσιάζουν στην εκκίνηση μεγάλη ροπή και χαμηλό ρεύμα. Αυτού του τύπου κινητήρες έχουν δρομέα διπλού κλωβού με αντίσταση μεγαλύτερη από αυτή των κινητήρων της κλάσης B. Αυτό έχει ως συνέπεια υψηλότερη ροπή εκκίνησης με χαμηλότερα ρεύματα εκκίνησης αλλά στις ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας χαμηλότερη απόδοση και υψηλότερη ολίσθηση απ' ότι στις κλάσεις A και B. Βασικότερες εφαρμογές είναι οι συμπιεστές και οι ταινιόδρομοι.

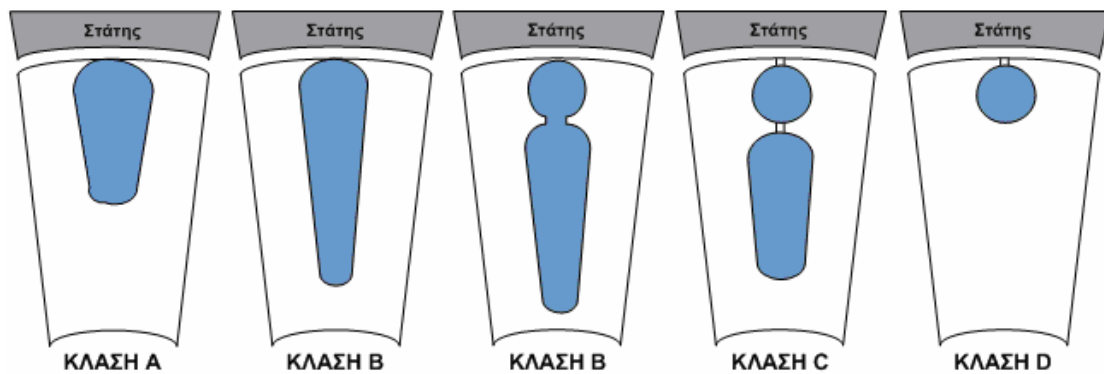
Κλάση σχεδίασης D.

Τέλος, αυτοί οι κινητήρες έχουν μικρό ρεύμα εκκίνησης και πολύ μεγάλη ροπή εκκίνησης δηλαδή 275% παραπάνω της ονομαστικής ροπής, αλλά και υψηλή ολίσθηση όταν λειτουργούν με πλήρες φορτίο. Στην ουσία είναι σαν του κινητήρες κλάσης A που διαθέτουν όμως ράβδους μικρότερης διατομής κατασκευασμένοι από υλικό μεγαλύτερης αντίστασης. Αυτή η μεγάλη αντίσταση στο δρομέα μετακινεί τη μέγιστη ροπή σε μια πολύ μικρή ταχύτητα. Ακόμα είναι δυνατόν να έχουμε μέγιστη ροπή στη μηδενική ταχύτητα (ολίσθηση 100%). Στους κινητήρες αυτούς στην πλήρη φόρτιση η ολίσθηση είναι μεγάλη εξαιτίας της μεγάλης αντίστασης δρομέα. Η τιμή της ολίσθησης είναι 7% αλλά φτάνει και στο 17% η και πιο πάνω. Οι κινητήρες αυτοί βρίσκουν εφαρμογές στην επιτάχυνση φορτίων με μεγάλη αδράνεια, π.χ. σε ιδιαίτερα μεγάλους σφόνδylους που χρησιμοποιούνται σε διατρητικές πρέσες ή ψαλίδια. Ο κινητήρας σε αυτές τις εφαρμογές επιταχύνει βαθμιαία το σφόνδυλο ως τη μέγιστη ταχύτητά του, όπου ο σφόνδυλος αναλαμβάνει την οδήγηση της διατρητικής μηχανής, ενώ στη συνέχεια ο κινητήρας επιταχύνει ξανά το σφόνδυλο μέχρι την επόμενη ενέργειά του.

Στο παρακάτω σχήματα βλέπουμε τις χαρακτηριστικές ροπής – στροφών των πιο πάνω κλάσεων κινητήρων καθώς και τις διαφοροποιήσεις στον κλωβό του δρομέα για την επίτευξη των χαρακτηριστικών κάθε κλάσης. Στον Πίνακα 1.1. φαίνονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά κάθε κλάσης.



Σχήμα 1.13. Χαρακτηριστικές ροπής ταχύτητας κινητήρων κλάσης A, B, C και D κατά NEMA.



Σχήμα 1.14. Τύποι αυλάκων δρομέα κλωβού ανά κατασκευαστική κλάση.

Κλάση	Ροπή εκκίνησης	Ρεύμα εκκίνησης	Ολίσθηση	Χρήσεις
A	Κανονική	Κανονική	Κανονική	Ανεμιστήρες αντλίες(φορτία μικρής αδράνειας που ξεκινάνε και σταματάνε συχνά)
B	Κανονική	Χαμηλή	Κανονική	Μεγάλοι ανεμιστήρες και αντλίες (φορτία με σημαντική αδράνεια)
C	Υψηλή	Χαμηλή	Κανονική	Συμπιεστές, ιμάντες μεταφοράς
D	Υψηλή	Χαμηλή	Υψηλή	Πρέσες, μηχανικές διατήρησες (εφαρμογές υψηλές αδράνειας)

Πινάκας 1.1. Χαρακτηριστικά κινητήρων ανά κατασκευαστική κλάση.

1.9 Έλεγχος ταχύτητας στους επαγωγικούς κινητήρες

Μέχρι την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος, οι επαγωγικοί κινητήρες δεν ήταν γενικά καλή επιλογή για εφαρμογές μεταβλητής ταχύτητας. Το εύρος λειτουργίας ενός τυπικού επαγωγικού κινητήρα περιορίζεται κάτω από 5% για την ολίσθηση και η μεταβολή της ταχύτητας πέρα απ' αυτό το εύρος είναι σχεδόν ανάλογη του φορτίου που εφαρμόζεται στον άξονα του κινητήρα. Ακόμα και αν η ολίσθηση γινόταν η μεγαλύτερη δυνατή, η απόδοση του κινητήρα θα ήταν ακόμα πιο μικρή, επειδή οι απώλειες χαλκού στο δρομέα είναι ανάλογες με την ολίσθηση.

Στην πραγματικότητα η ρύθμιση της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων γίνεται με δύο τρόπους. Στην πρώτη τεχνική μεταβάλλοντας τη σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα, δηλαδή την ταχύτητα περιστροφής των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα, ταυτόχρονα αλλάζει και η ταχύτητα περιστροφής του άξονα αφού η ταχύτητα του παραμένει πάντα κοντά με αυτή της σύγχρονης. Στην άλλη τεχνική μεταβάλλεται η ολίσθηση του κινητήρα για ένα δεδομένο φορτίο. Και οι δυο μέθοδοι παρουσιάζονται παρακάτω πιο λεπτομερώς.

Η σύγχρονη ταχύτητα του επαγωγικού κινητήρα δίνεται από τη σχέση:

$$N_{sync} = 120 \frac{f_e}{p}$$

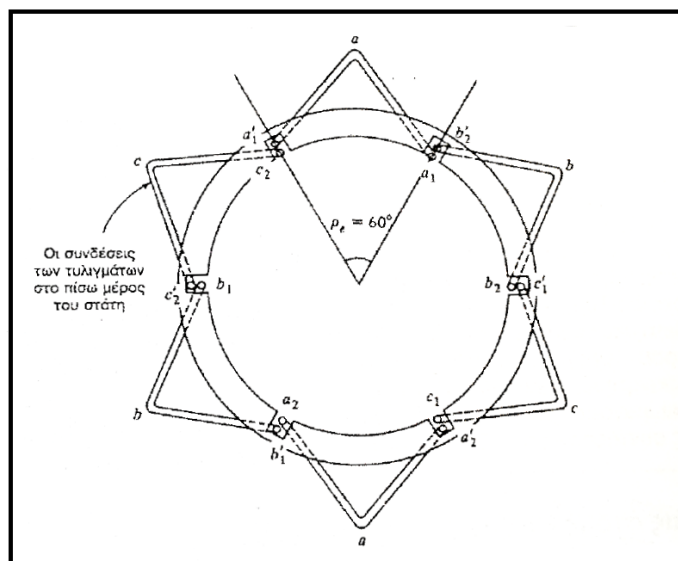
Από τη σχέση της σύγχρονης ταχύτητας παρατηρείται ότι η μεταβολή της γίνεται με δυο τρόπους: πρώτον με την ρύθμιση της ηλεκτρικής ισχύος και δεύτερον μεταβάλλοντας τον αριθμό των πόλων της μηχανής. Για τον έλεγχο της ολίσθησης αυξομειώνουμε την τιμή της αντίστασης του δρομέα ή την τιμή της τάσης εισόδου στον κινητήρα. Όλες αυτές η τεχνικές περιγράφονται πιο κάτω.

1.9.1 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή του αριθμού των πόλων

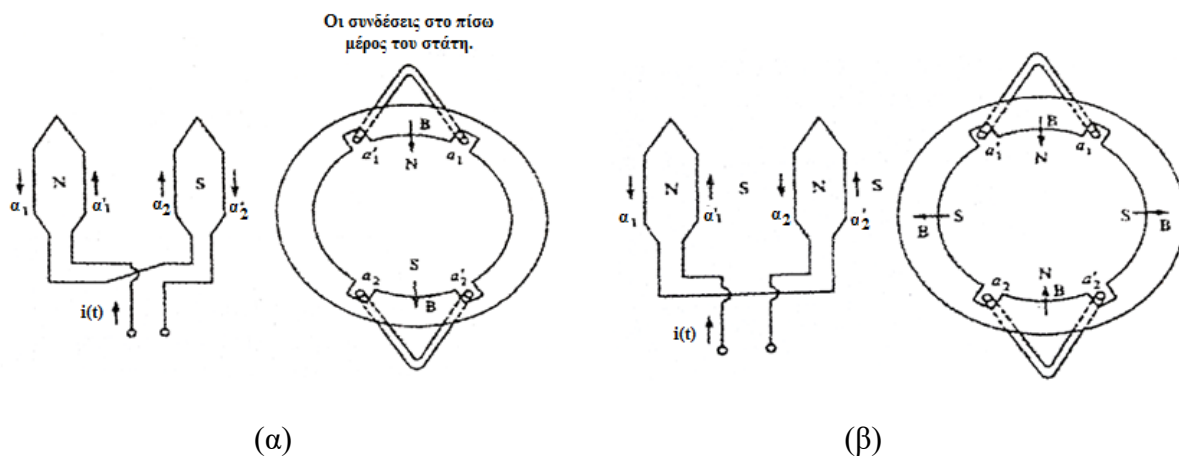
Για την αλλαγή του αριθμού των πόλων ενός επαγωγικού κινητήρα υπάρχουν τρεις μέθοδοι :

1. Η μέθοδος των διαδοχικών πόλων
2. Πολλαπλά τυλίγματα στο στάτη
3. Διαμόρφωση πλάτους του πόλου (PAM)

Η μέθοδος των διαδοχικών πόλων (consequent poles) αναπτύχθηκε το 1897 και είναι η πιο παλιά μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας. Αναφέρετε στο γεγονός ότι ο αριθμός των πόλων στο τύλιγμα του στάτη μπορεί να μεταβληθεί εύκολα μ' ένα παράγοντα 2 προς 1 με κάποιες απλές αλλαγές στις συνδέσεις των συστάδων. Στο σχήμα 1.15. παρουσιάζετε ένας απλός στάτης επαγωγικού κινητήρα δύο πόλων κατάλληλος για αλλαγή των πόλων. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι ξεχωριστές συστάδες παρουσιάζουν πολύ μικρό βήμα (60ο ως 90ο). Ενώ στο σχήμα 1.16. παρουσιάζεται η φάση α του τυλίγματος ώστε να δοθεί περισσότερη έμφαση σε κάποιες λεπτομέρειες.



Σχήμα 1.15. Το τύλιγμα του στάτη ενός διπολικού κινητήρα οπύ θα πραγματοποιηθεί αλλαγή του αριθμού των πόλων.



Σχήμα 1.16. (α) Παρουσιάζεται τύλιγμα στάτη με δύο πόλους όπου η μία συστάδα αποτελεί τον ένα πόλο και η άλλη το δεύτερο. (β) Κατά την αντιστροφή της σύνδεσης της μιας συστάδας, τότε και οι δυο συστάδες υλοποιούν βόρειους πόλους ενώ η μαγνητική ροή επιστρέφει στο στάτη από τα σημεία που βρίσκονται ανάμεσα στις συστάδες. Οι νότιοι πόλοι ονομάζονται διαδοχικοί πόλοι και το τύλιγμα στο στάτη είναι πια τετραπολικό.

Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 1.16.(α) παρουσιάζονται τα ρεύματα στη φάση α του τυλίγματος για κάποια χρονική στιγμή της κανονικής λειτουργίας. Επίσης παρουσιάζονται και οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου που εξέρχονται από το στάτη στην επάνω ομάδα φάσης (βόρειος πόλος) και εισέρχονται στο στάτη στην κάτω ομάδα φάσης (νότιος πόλος). Δημιουργώντας έτσι δύο πόλους στο τύλιγμα του στάτη.

Στο Σχήμα 1.16.(β) αντιστρέφοντας την κατεύθυνση του ρεύματος στην κάτω ομάδα φάσης του στάτη, οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου τότε θα εξέρχονται και από τις δυο ομάδες φάσης δηλαδή από την πάνω και την κάτω ομάδα φάσης, έτσι και οι δυο ομάδες φάσης θα παράγουν βόρειο μαγνητικό πόλο. Ενώ οι νότιοι μαγνητικοί πόλοι δημιουργούνται επειδή η μαγνητική ροή επιστέφει πίσω στο στάτη ανάμεσα από τις δύο ομάδες φάσης. Με αυτό τον τρόπο ο στάτης διαθέτει πια τον διπλάσιο σε αριθμό μαγνητικούς πόλους. Τέτοιοι κινητήρες έχουν δρομέα τύπου βραχυκυκλωμένου κλωβού, επειδή όσοι μαγνητικοί πόλοι δημιουργούνται στο στάτη τόσοι επάγονται και στο δρομέα, προσαρμόζοντας έτσι στον αριθμό των πόλων που μεταβάλλονται.

Ο τρόπος που αναδιοργανώνονται τα τυλίγματα του στάτη κατά την μεταβολή της συνδεσμολογίας τους μπορεί να αλλάξει τη μέγιστη ροπή του κινητήρα έτσι ώστε να διπλασιαστεί (συνδεσμολογία σταθερής ισχύος εξόδου), να μειωθεί στο μισό (συνδεσμολογία ροπής με το νόμο του τετραγώνου) ή και ακόμα να παραμείνει η ίδια (συνδεσμολογία σταθερής ροπής).

Η συγκεκριμένη μέθοδος με τους δύο διαδοχικούς πόλους έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα, οι ταχύτητες θα πρέπει να έχουν λόγο 2 προς 1. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να ξεπεραστεί με την εισαγωγή πολλαπλών τυλιγμάτων στο στάτη (multiple stator windings), όπου το καθένα έχει διαφορετικό αριθμό πόλων και η ενεργοποίησή τους γίνεται ξεχωριστά κάθε φορά. Για παράδειγμα ένας κινητήρας μπορεί να έχει δύο ομάδες τυλιγμάτων στο στάτη με δύο και έξι πόλους αντίστοιχα. Με αυτό τον τρόπο η σύγχρονη ταχύτητα σ' ένα σύστημα ισχύος των 60HZ μπορεί να μεταβάλλεται και να παίρνει τιμές από 1200 rpm ως 1800 rpm, συνδέοντας απλά την μια ή την άλλη ομάδα τυλιγμάτων. Το κόστος όμως σε τέτοιους κινητήρες είναι υψηλό, ως αποτέλεσμα τα πολλαπλά τυλίγματα στο στάτη να χρησιμοποιούνται μόνο όταν είναι απολύτως απαραίτητα.

Ο συνδυασμός αυτών των δυο μεθόδων μπορεί να μας δώσει ένα κινητήρα τεσσάρων ταχυτήτων. Δηλαδή μπορεί να κατασκευαστεί ένα κινητήρας με δύο τυλίγματα τεσσάρων και έξι πόλων αντίστοιχα που όταν λειτουργεί στα 60HZ μπορεί και περιστρέφεται με ταχύτητες 600, 900, 1200 και 1800 rpm.

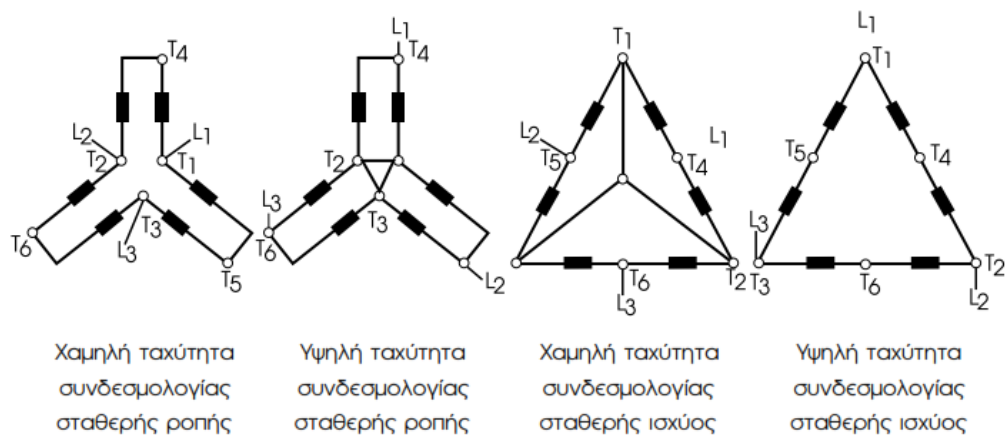
Το 1957 ο G.H.Rawcliffe του πανεπιστημίου του Bristol της Αγγλίας ανέπτυξε μια καινούρια τεχνική για την μεταβολή του αριθμού των πόλων, την διαμόρφωση πλάτους του πόλου (pole amplitude modulation - PAM). Με αυτή τη νέα μέθοδο παράγονται πολλαπλοί πόλοι με το ίδιο τύλιγμα του στάτη, ενώ οι αριθμοί των πόλων είναι με λόγο διαφορετικό από 2 προς 1. Η αλλαγή του αριθμού των πόλων στη

μέθοδο PAM γίνεται όπως και στη μέθοδο των διαδοχικών πόλων, δηλαδή σε αυτή την περίπτωση με την μεταβολή των συνδέσεων σε έξι άκρα.

Για την κατασκευή λοιπόν ενός κινητήρα που να λειτουργεί σε δύο ταχύτητες κοντινές μεταξύ τους, συγκρίνοντας τη μέθοδο των πολλαπλών τυλιγμάτων με αυτή της διαμόρφωσης πλάτους του πόλου (PAM), η μέθοδος PAM είναι η πιο οικονομική με κόστος ίσο με τα τρία τέταρτα του κόστους των δύο ξεχωριστών τυλιγμάτων.

Πόλοι	Η σύγχρονη ταχύτητα r/min	
	Στα 50 Hz	Στα 60 Hz
2:8	3000/750	3600/900
4:6	1500/1000	1800/1200
4:10	1500/600	1800/720
6:8	1000/750	1200/900
6:10	1000/600	1200/720
8:10	750/600	900/720
8:12	750/500	900/600
10:12	600/500	720/600

Πινάκας 1.2. Οι τυπικοί λόγοι των πόλων που επιτυγχάνονται με τη μέθοδο PAM και οι αντίστοιχοι λόγοι σύγχρονων ταχυτήτων.



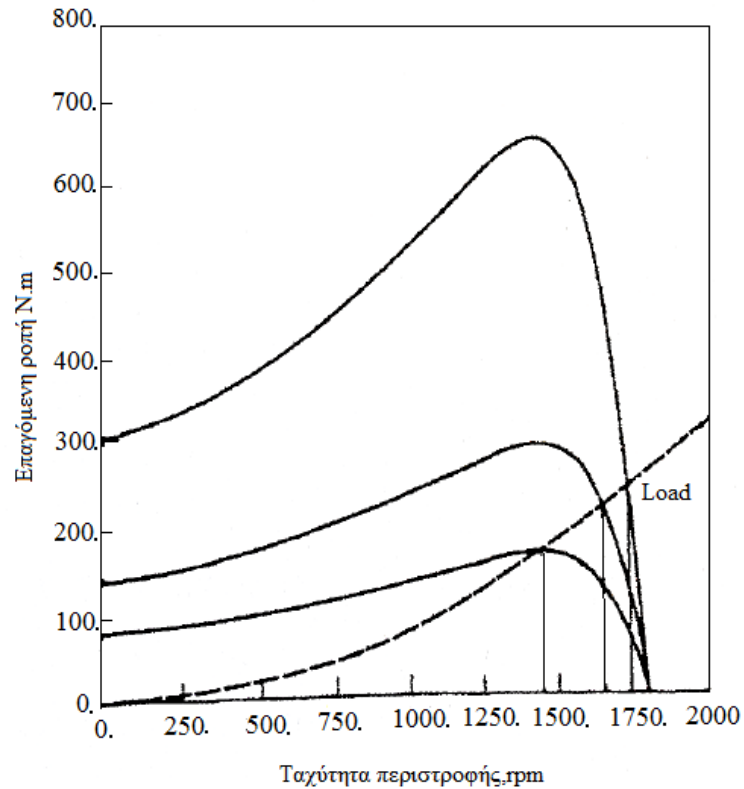
Σχήμα 1.17. Διάφορες συνδεσμολογίες ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.

1.9.2 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της συχνότητας του δικτύου

Η τροφοδοσία ενός ασύγχρονου κινητήρα με τάση μεταβλητής συχνότητας έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή του σύγχρονου αριθμού στροφών. Επίσης το σημείο λειτουργίας του κινητήρα στην καμπύλη ροπής ταχύτητας μεταβάλλεται και αυτό, με αποτέλεσμα την ελέγξιμη μεταβολή των στροφών του. Η σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα όταν λειτουργεί στις ονομαστικές συνθήκες είναι γνωστή και ως βασική ταχύτητα (base speed). Με αυτή την τεχνική η ταχύτητα του κινητήρα μπορεί να ρυθμίζεται πάνω και κάτω από τη βασική ταχύτητα, έχοντας έτσι ένα μεγάλο εύρος τιμών που ξεκινά από το 5% της βασικής ταχύτητας και φθάνει σε τιμές διπλάσιες της βασικής. Όμως για την ασφαλή λειτουργία του κινητήρα πρέπει να καθοριστούν κάποια όρια για την τάση και τη ροπή κατά τη μεταβολή της ταχύτητάς του. Όταν η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα είναι μικρότερη της βασικής, τότε για την ασφαλή λειτουργία του θα πρέπει να περιορίζεται η τάση που εφαρμόζεται στο στάτη του κινητήρα. Η τάση που εφαρμόζεται στο στάτη του κινητήρα πρέπει να μειώνεται γραμμικά με τη μείωση της συχνότητας, διαφορετικά ο χάλυβας του στάτη μπορεί οδηγηθεί σε κορεσμό και το ρεύμα μαγνήτισης του κινητήρα να πάρει εξαιρετικά μεγάλες τιμές. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται υποβιβασμός (derating) της τάσης.

1.9.3 Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας

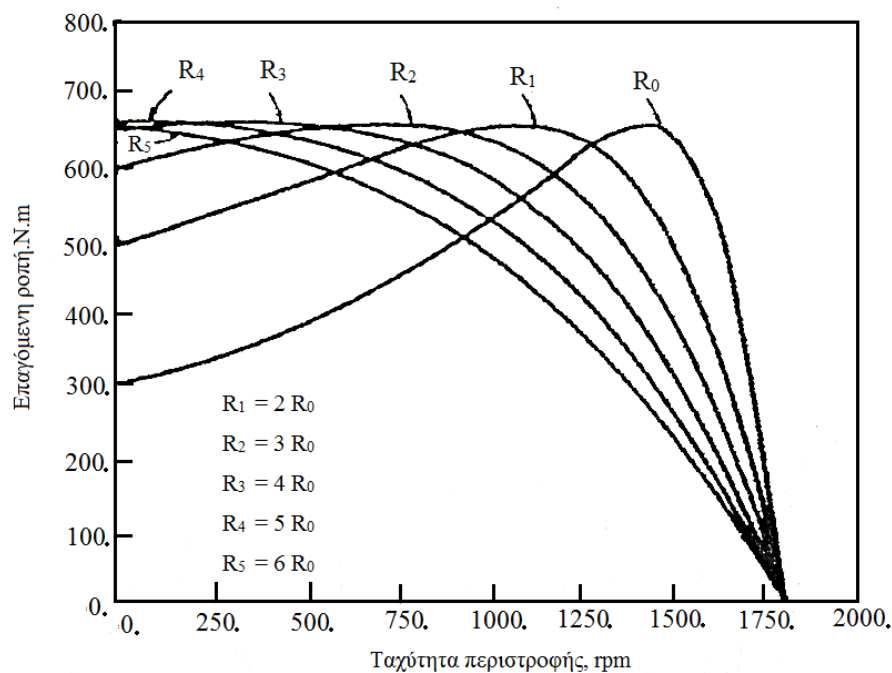
Επειδή η ροπή που αναπτύσσει ένας επαγωγικός κινητήρας εξαρτάται από το τετράγωνο της εφαρμοζόμενης τάσης. Όταν το φορτίο ενός κινητήρα έχει χαρακτηριστική ροπή-ταχύτητας όμοια με αυτή του παρακάτω σχήματος, τότε μεταβάλλοντας την τάση τροφοδοσίας του είναι δυνατό η ρύθμιση της ταχύτητας για ένα περιορισμένο εύρος τιμών. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται κυρίως σε μικρούς κινητήρες που κινούν ανεμιστήρες.



Σχήμα 1.18. Ρύθμιση της ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα με έλεγχο της τάσης εισόδου.

1.9.4 Έλεγχος της Ταχύτητας με Μεταβολή της Αντίστασης Δρομέα

Σε επαγωγικούς κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα η μεταβολή της χαρακτηριστικής ροπής -ταχύτητας, γίνεται επίσης εισάγοντας πρόσθετες αντιστάσεις στο κύκλωμα του δρομέα της μηχανής. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας που παράγονται. Η συγκεκριμένη τεχνική είναι αποτελεσματική μόνο σε φορτία που η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας που παράγουν είναι όμοια με αυτή του σχήματος, οπότε με την αυξομείωση της τιμής της αντίστασης του δρομέα μπορεί να μεταβληθεί η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Με την εισαγωγή όμως πρόσθετων αντιστάσεων στο δρομέα του επαγωγικού κινητήρα μειώνεται η απόδοση της μηχανής. Έτσι αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται μόνο για σύντομες περιόδους λόγω των προβλημάτων απόδοσης που δημιουργεί.



Σχήμα 1.19. Ρύθμιση της ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα με μεταβολή της αντίστασης του δρομέα.

1.10 Προστασία του Κινητήρα

Μια συσκευή οδήγησης επαγωγικού κινητήρα έχει ποικίλες ιδιότητες που προστατεύουν τον κινητήρα που συνδέεται σε αυτή. Μια τέτοια συσκευή μπορεί και ανιχνεύει τα ισχυρά μόνιμα ρεύματα σε περίπτωση υπερφόρτισης, τα ισχυρά στιγμιαία ρεύματα καθώς και τις καταστάσεις υπερτάσεων και μειωμένης τάσης. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις για την προστασία του κινητήρα, η συσκευή οδήγησης διακόπτει τη λειτουργία του.

Σήμερα οι συσκευές οδήγησης είναι τόσο ευέλικτες και αξιόπιστες που αντικαθιστούν κινητήρες συνεχούς ρεύματος, σε πολλές εφαρμογές που απαιτείται μεγάλο εύρος στη μεταβολή της ταχύτητας.

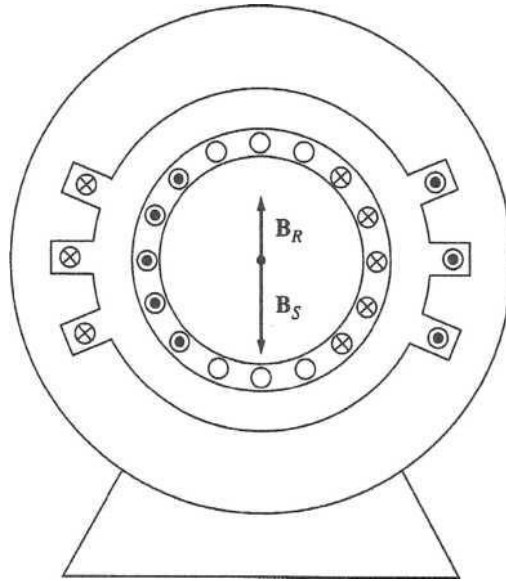
Κεφάλαιο 2: Ασύγχρονοι μονοφασικοί επαγωγικοί κινητήρες.

2.1 Εισαγωγή.

Ο ασύγχρονος μονοφασικός κινητήρας συνήθως κατασκευάζεται σε κλάσμα της ισχύος του ενός KW (fractional KW range). Παρόλο που οι επιδόσεις τους υστερούν συγκριτικά με τους αντίστοιχους τριφασικούς κινητήρες της ίδιας ισχύος, βρίσκουν πολλές εφαρμογές σε οικιακές συσκευές καθώς και σε βιομηχανικές εφαρμογές. Κάποια παραδείγματα εφαρμογών είναι ψυγεία, πλυντήρια, συστήματα κλιματισμού, συστήματα εξαερισμού, αντλίες και εργαλειομηχανές. Στις περισσότερες εφαρμογές τους αυτοί οι κινητήρες λειτουργούν στην ονομαστική τους ταχύτητα, ενώ όταν χρειάζεται κάποιος έλεγχος της ταχύτητας, αυτός υλοποιείται διακριτά, σε δύο ή τρεις βαθμίδες. Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος έφερε την κατασκευή ρυθμιζόμενων ηλεκτρικών ταχύτητας μεγάλης αξιοπιστίας και χαμηλού κόστους. Τροφοδοτώντας το μονοφασικό κινητήρα μέσω ενός τέτοιου ελεγκτή μπορεί να μην οδηγήσει σε αύξηση της απόδοσής του, αλλά η ολική απόδοση του συστήματος μπορεί να ωφεληθεί δραματικά. Έτσι, σε ένα σύστημα κλιματισμού με ένα κλασικό θερμοστάτη στο συμπιεστή, που προκαλεί τη λειτουργία του ή μη, ο ανεπαρκής έλεγχος του μπορεί να απαλειφθεί αντικαθιστώντας τον με έναν ελεγκτή που προσαρμόζει την ταχύτητα του κινητήρα στην πραγματική απαίτηση για ψύξη, με αποτέλεσμα την εξασφάλιση σταθερής θερμοκρασίας και την εξοικονόμηση ενέργειας.

2.2 Αρχή λειτουργίας ασύγχρονου μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα.

Όπως όλοι οι επαγωγικοί κινητήρες έτσι και ο μονοφασικός κινητήρας αποτελείται και αυτός από δυο μέρη, ένα ακίνητο μέρος το στάτη και ένα περιστρεφόμενο το δρομέα. Ο πυρήνας του στάτη είναι κατασκευασμένος από ελάσματα σιδήρου, μέσα στον οποίο βρίσκεται μονοφασικό τύλιγμα, και ο δρομέας του είναι τύπου βραχυκυκλωμένου κλωβού, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από μια σειρά αγώγιμων ράβδων τοποθετημένοι σε αυλάκια της επιφάνειας του δρομέα και βραχυκυκλωμένοι στα δύο τους άκρα. Επειδή στο τύλιγμα του στάτη υφίσταται μόνο μια φάση, δεν δημιουργείται στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής μεταξύ στάτη και δρομέα. Στην ουσία πάλλεται αποκτώντας αρχικά μεγάλη και κατόπιν μικρή τιμή και ως αποτέλεσμα παρουσιάζει μηδενική ροπή εκκίνησης. Αυτό το γεγονός παρατηρείται καλύτερα εξετάζοντας τον κινητήρα την στιγμή που είναι ακινητοποιημένος. Η μαγνητική ροή του στάτη της μηχανής αρχικά αυξάνεται και κατόπιν μειώνεται. Στην συνέχεια λόγω της μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής στο στάτη της μηχανής έχουμε αναπτυσσόμενη επαγόμενη τάση στους ράβδους του δρομέα και επειδή οι ράβδοι είναι βραχυκυκλωμένοι, ο δρομέας διαρρέεται από ρεύμα. Αλλά εξαιτίας του ευθυγραμμισμένου πεδίου του στάτη με το μαγνητικό πεδίο που παράγεται δεν δημιουργείται κάποια συνισταμένη ροπή στο δρομέα.



Σχήμα 2.1. Ο μονοφασικός επαγωγικός κινητήρας στις συνθήκες εκκίνησης.

Η παρακάτω σχέση μας δίνει την αναπτυσσόμενη ροπή:

$$\begin{aligned}
 |\vec{\tau}_{ind}| &= |K \vec{B}_R \times \vec{B}_S| \\
 &= K B_R B_S \sin \gamma \\
 &= K B_R B_S \sin 180^\circ = 0
 \end{aligned}$$

Όμως αν ο κινητήρας αρχίσει και περιστρέφεται, τότε θα έχουμε παραγωγή επαγόμενη ροπής στο εσωτερικό του. Σύμφωνα με τη θεωρία των δύο αντίθετα στρεφόμενων πεδίων στους μονοφασικούς επαγωγικούς κινητήρες ένα μαγνητικό πεδίο που πάλλεται αλλά δεν περιστρέφεται, μπορεί να αναλυθεί σε δύο στρεφόμενα πεδία, που έχουν το ίδιο πλάτος και στρέφονται με αντίθετη φορά. Ο κινητήρας στο κάθε μαγνητικό πεδίο ανταποκρίνεται ξεχωριστά, επομένως η συνισταμένη ροπή της μηχανής προκύπτει από το άθροισμα των ροπών που οφείλονται στο κάθε πεδίο.

Στην συνέχεια βλέπουμε πως αυτό το παλλόμενο μαγνητικό πεδίο χωρίζεται σε δύο μαγνητικά πεδία τα οποία είναι ίσα μεταξύ τους αλλά περιστρέφονται με αντίθετη φορά. Καθώς και τη σχέση που μας δίνει τη μαγνητική επαγωγή αυτού του πεδίου

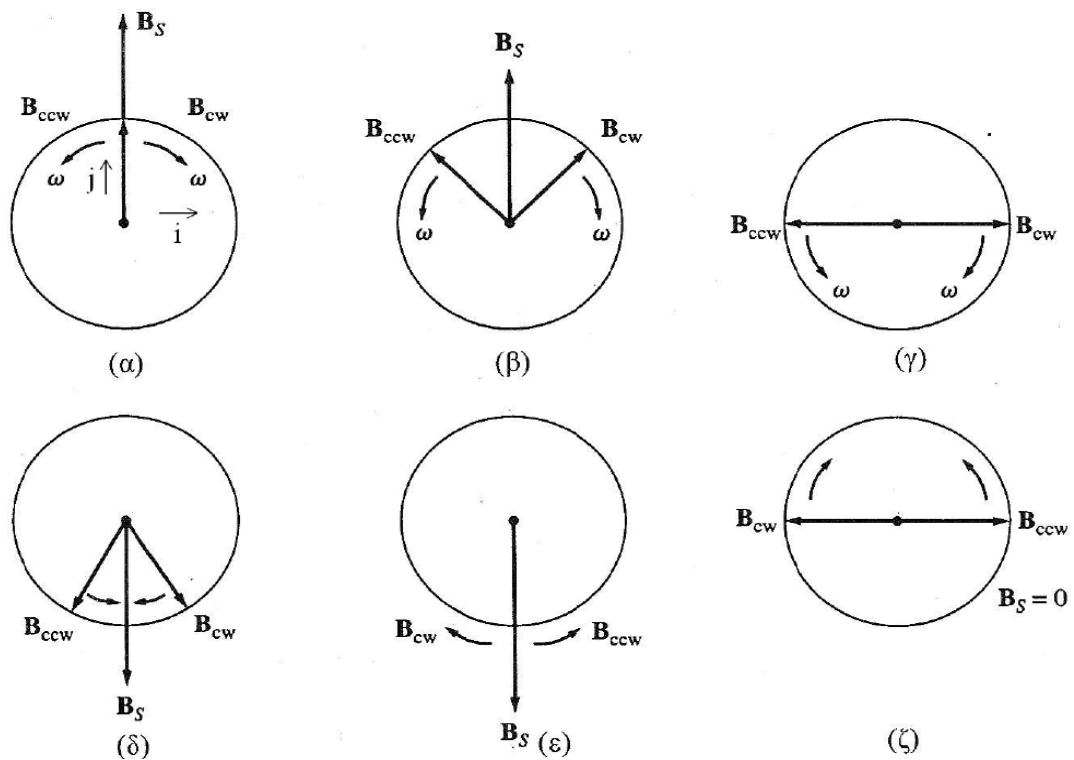
$$\vec{B}_S(t) = (B_{max} \cos \omega t) \hat{j}$$

Ενώ το μαγνητικό πεδίο που περιστρέφεται ωρολογιακά εκφράζεται ως εξής :

$$\vec{B}_{cw}(t) = \left(\frac{1}{2}B_{max} \cos \omega t\right)j - \left(\frac{1}{2}B_{max} \sin \omega t\right)i$$

Τέλος, το μαγνητικό πεδίο που περιστρέφεται ανθρωλογιακά εκφράζεται ως εξής :

$$\vec{B}_{ccw}(t) = \left(\frac{1}{2}B_{max} \cos \omega t\right)j + \left(\frac{1}{2}B_{max} \sin \omega t\right)i$$

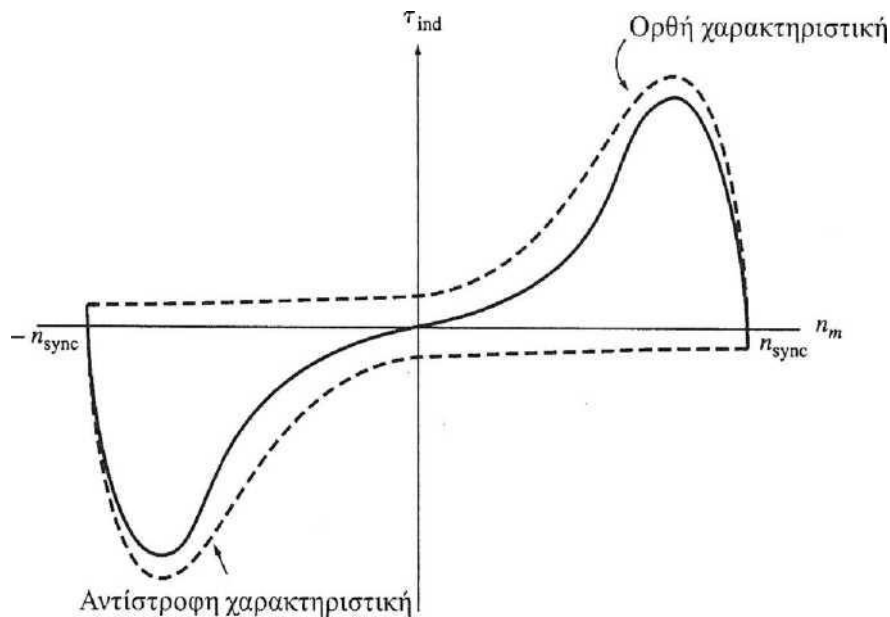


Σχήμα 2.2. Ανάλυση του παλλόμενου μαγνητικού πεδίου σε δύο μαγνητικά πεδία ίσου μέτρου που περιστρέφονται με αντίθετη φορά. Σημειώνεται ότι σε κάθε χρονική στιγμή το διανυσματικό άθροισμα των δύο μαγνητικών πεδίων βρίσκεται στον κατακόρυφο άξονα.

Παρατηρούμε ότι το άθροισμα των ωρολογιακά και του ανθωρολογιακά περιστρεφόμενων πεδίων ισούται με το μαγνητικό πεδίο B_s το οποίο πάλλεται αλλά δεν περιστρέφεται.

$$B_s(t) = B_{CW}(t) + B_{CCW}(t)$$

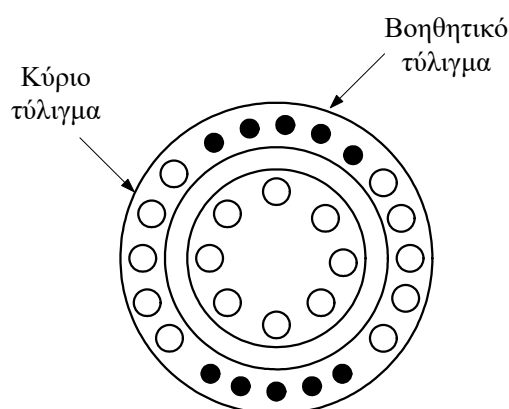
Όπως είδαμε ο μονοφασικός επαγωγικός κινητήρας οδηγείται από τα δύο μαγνητικά πεδία που υφίστανται στο εσωτερικό του, άρα και η συνισταμένη επαγόμενη ροπή του κινητήρα προκύπτει από την διαφορά των δύο χαρακτηριστικών ροπής ταχύτητας, όπως βλέπουμε στο παρακάτω σχήμα. Επίσης, στη μέση συνισταμένη ροπή του παρακάτω σχήματος προστίθενται κάποιες παλμικές ροπές με συχνότητα διπλάσια από τη συχνότητα του στάτη. Οι παλμοί ροπής δημιουργούνται δύο φορές σε κάθε περίοδο, όταν δηλαδή το ορθό και το αντίστροφο μαγνητικό πεδίο διασταυρώνονται. Αυτοί οι παλμοί δεν παράγουν κάποια μέση ροπή αλλά αυξάνουν τις δονήσεις κάνοντας τους μονοφασικούς κινητήρες πιο θορυβώδεις από τους αντίστοιχους τριφασικούς κινητήρες του ίδιου μεγέθους.



Σχήμα 2.3. Η χαρακτηριστική ροπής ταχύτητας ενός μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα.

2.3 Τεχνικές εκκίνησης και λειτουργίας μονοφασικών επαγωγικών κινητήρων.

Όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα, το τύλιγμα του τυμπάνου επειδή είναι μονοφασικό δεν έχει την ικανότητα να δημιουργήσει στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο και κατά συνέπεια ροπή εκκίνησης. Ποιο αναλυτικά τα ρεύματα που παράγονται λόγω επαγωγής στον ακίνητο δρομέα της μηχανής δημιουργούν ένα μαγνητικό πεδίο συγγραμμικό με εκείνο του στάτη. Εξαιτίας λοιπόν αυτών των συγγραμμικών πεδίων, δεν αναπτύσσεται κάποια ηλεκτρική ροπή ικανή για να στρέψει των δρομέα. Για να λυθεί λοιπόν αυτό το πρόβλημα τοποθετείται ένα επιπλέον τύλιγμα στο στάτη το οποίο λέγεται βοηθητικό τύλιγμα ή τύλιγμα εκκίνησης (auxiliary winding). Ο μαγνητικός άξονας αυτού του τυλίγματος, είναι 90 ηλεκτρικές μοίρες μετατοπισμένος στο χώρο σε σχέση με το μαγνητικό άξονα του κύριου τυλίγματος (main winding) του στάτη.



Σχήμα 2.4. Τομή μονοφασικού ασύγχρονου κινητήρα. Κύριο και βοηθητικό τύλιγμα.

Οι ωμικές αντιστάσεις καθώς και οι επαγωγικές αντιδράσεις των δύο τυλιγμάτων επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε τα ρεύματα να μοιάζουν με εκείνα μιας διφασικής μηχανής (παρότι η τάση τροφοδοσίας σε αυτά είναι κοινή). Αυτό γίνεται επειδή αυτά τα δύο τυλίγματα που οι μαγνητικοί τους άξονες διαφέρουν κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες και διαρρέονται από ημιτονικά ρεύματα ίδιας συχνότητας αλλά με μια φασική απόκλιση 90° είναι ικανά για την ανάπτυξη στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Επομένως έχουμε την δημιουργία εξ' επαγωγής στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου στο τύλιγμα του δρομέα με πόλους ίδιους με το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Ενώ από την αλληλεπίδραση αυτών των δυο πεδίων, δηλαδή του στάτη και του δρομέα, αναπτύσσεται μέση μη μηδενική ροπή εκκίνησης και κανονικής λειτουργίας.

Πέντε είναι οι πιο συνηθισμένοι τρόποι εκκίνησης και λειτουργίας των μονοφασικών επαγωγικών κινητήρων που χρησιμοποιούνται, διαφοροποιούνται ως προς τον τρόπο που δημιουργείται η χρονική διαφορά φάσης μεταξύ των ρευμάτων του κύριου και του βοηθητικού τυλίγματος του στάτη αλλά και στο κόστος. Οι πέντε βασικές τεχνικές εκκίνησης είναι οι εξής:

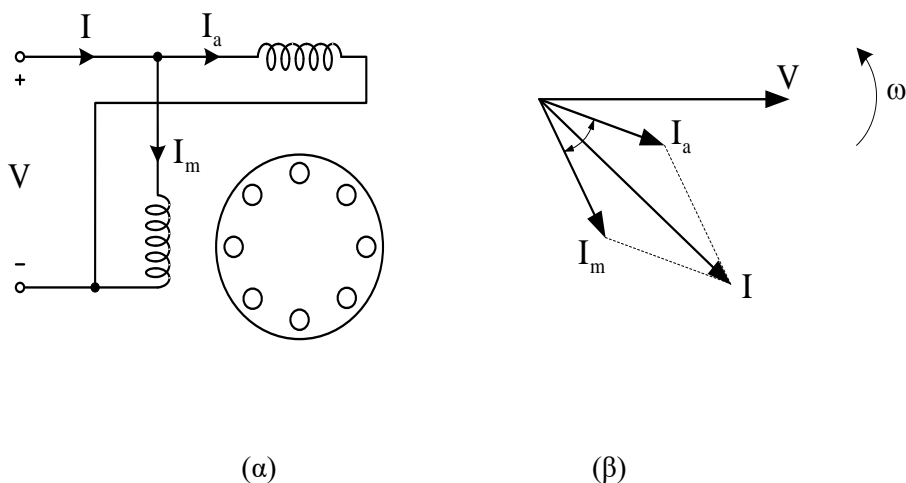
1. Με χρήση του βοηθητικού τυλίγματος
2. Με χρήση πυκνωτή εκκίνησης
3. Με χρήση πυκνωτή λειτουργίας
4. Με χρήση πυκνωτή εκκίνησης και λειτουργίας
5. Με χρήση βοηθητικούς πόλους στο στάτη

Απώτερος σκοπός αυτών των τεχνικών είναι να δυναμώσουν το ένα από τα δυο στρεφόμενα πεδία του κινητήρα, έτσι ώστε να δοθεί σ' αυτόν μια αρχική ώθηση προς τη μια ή την άλλη κατεύθυνση.

2.3.1 Εκκίνηση με χρήση του βοηθητικού τυλίγματος.

Αυτή η τεχνική εκκίνησης χρησιμοποιεί αποκλειστικά και μόνο το βοηθητικό τύλιγμα για την δημιουργία της χρονικής διαφοράς φάσης μεταξύ των ρευμάτων του κύριου και του βοηθητικού τυλίγματος του στάτη. Ποιο συγκεκριμένα το βοηθητικό τύλιγμα κατασκευάζεται έτσι ώστε να αποσυνδέεται από το κύκλωμα, σε μια προκαθορισμένη ταχύτητα περιστροφής, παρεμβάλλοντας ένα φυγοκεντρικό διακόπτη. Επίσης, το βοηθητικό τύλιγμα επιλέγεται έτσι ώστε ο λόγος αντίστασης/ αντίδρασης του να είναι μεγαλύτερος από το κυρίως τύλιγμα, με σκοπό το ρεύμα του βοηθητικού τυλίγματος να προπορεύεται αυτού του κυρίου τυλίγματος. Αυτό επιτυγχάνεται επιλέγοντας αγωγούς μικρότερης διατομής και με μικρότερο αριθμό σπειρών στο βοηθητικό τύλιγμα. Μπορούμε να επιλέξουμε λεπτότερο αγωγό στο βοηθητικό τύλιγμα επειδή άπαξ ο δρομέας αρχίσει να περιστρέφεται, η παρουσία του βοηθητικού τυλίγματος δεν είναι πλέον απαραίτητη και επομένως δεν προορίζεται για την ανάληψη όλου του ρεύματος.

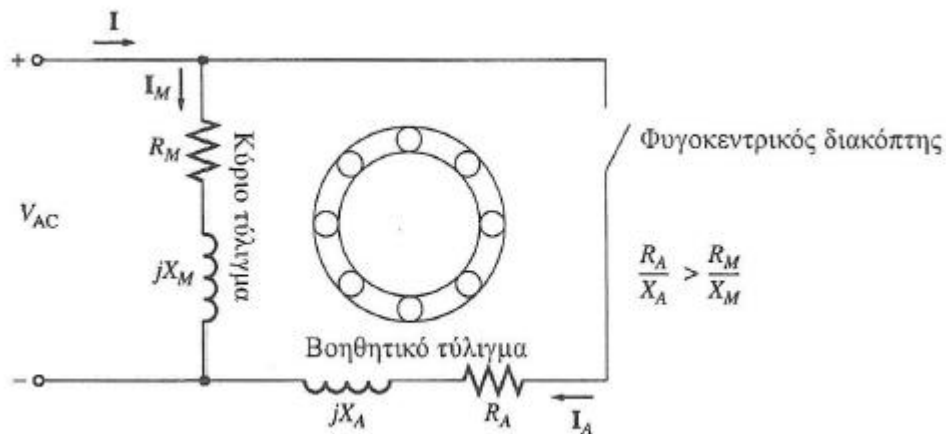
Η συνδεσμολογία των δύο τυλιγμάτων καθώς επίσης και η προκαλούμενη χρονική διαφορά φάσης μεταξύ των δύο ρευμάτων, δείχνεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5. (α) Συνδεσμολογία τυλιγμάτων στάτη , (β) Χρονική απόκλιση ρευμάτων.

Όπως αναφέραμε και πιο πάνω, ο δρομέας όταν ξεκινήσει και περιστρέφεται μετά από λίγο το βοηθητικό τύλιγμα δεν είναι πλέον απαραίτητο. Αυτό ισχύει γιατί το στάσιμο στο χώρο αλλά χρονικά μεταβαλλόμενο με ημιτονικό ρυθμό μαγνητικό πεδίο του κύριου τυλιγματος μπορεί να θεωρηθεί ως αποτέλεσμα δύο στρεφόμενων μαγνητικών πεδίων με ίσες και αντίθετες ταχύτητες (ίσες σε μέγεθος με τη σύγχρονη ταχύτητα). Στο κύριο τύλιγμα η συνιστώσα που θα υπερισχύσει από τις δυο, είναι αυτή που στρέφεται με την ίδια φορά περιστροφής με τον άξονα του δρομέα (όπως και το επαγόμενο μαγνητικό πεδίο στο δρομέα), έτσι λοιπόν συντηρείται η κίνηση.

Έτσι, όταν ο δρομέας του κινητήρα αποκτήσει ταχύτητα που πλησιάζει σχεδόν το 75% της σύγχρονης ταχύτητας, τότε η ροπή που θα παραχθεί από τη δράση του κύριου τυλιγματος θα είναι περίπου ίδια σε μέγεθος στην περίπτωση που το βοηθητικό τύλιγμα είναι αποσυνδεδεμένο. Άρα το βοηθητικό κύκλωμα δεν είναι απαραίτητο για την λειτουργία του συστήματος όταν οι στροφές του κινητήρα πλησιάσουν τις αντίστοιχες ονομαστικές. Παρεμβάλλοντας λοιπόν ένα φυγοκεντρικό διακόπτη (centrifugal switch) ή ένα ρελέ υπερέντασης (overcurrent relay) πραγματοποιείται η αποσύνδεσή του βοηθητικού τυλιγματος από το υπόλοιπο κύκλωμα.

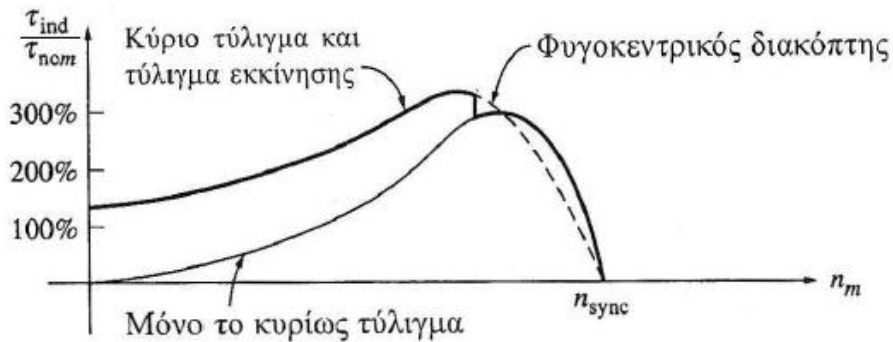


Σχήμα 2.6. Αποσύνδεση του βοηθητικού τυλίγματος μετά την εκκίνηση.

Στην περίπτωση του φυγοκεντρικού διακόπτη ο οποίος προσαρμόζεται στον άξονα του δρομέα του κινητήρα, με την φυγοκεντρική δύναμη που αναπτύσσεται κατά την περιστροφή ένα ελατήριο πιέζει μια ηλεκτρική επαφή η οποία βγάζει εκτός το βοηθητικό τύλιγμα περίπου στο 80% της σύγχρονης ταχύτητας.

Ενώ όταν χρησιμοποιούμε ρελέ υπερέντασης, η διαδικασία αποκοπής του βοηθητικού τυλίγματος γίνεται ως εξής. Το πηνίο του ρελέ είναι συνδεδεμένο σε σειρά με το κύριο τύλιγμα και το βοηθητικό τύλιγμα τροφοδοτείται μέσω μια κανονικά ανοιχτής (normal open) επαφής του ρελέ. Στην εκκίνηση του κινητήρα το ρεύμα που απορροφά το κύριο τύλιγμα είναι 5-6 φορές μεγαλύτερο από το ρεύμα κανονικής λειτουργίας το οποίο θέτει και σε λειτουργία το ρελέ υπερέντασης (βοηθητικό τύλιγμα εντός λειτουργίας). Ο δρομέας καθώς υπερταχύνεται το απορροφούμενο ρεύμα μειώνεται σταδιακά. Έτσι όταν το ρεύμα πια μειωθεί σε κάποια συγκεκριμένη τιμή (η ταχύτητα του δρομέα είναι κοντά στη σύγχρονη) τότε έχουμε αποδιέγερση του ρελέ και ως συνέπεια αποσύνδεση του βοηθητικού τυλίγματος.

Η χαρακτηριστική ροπής στροφών για τους μονοφασικούς κινητήρες που χρησιμοποιούν αυτό το είδος εκκίνησης θα έχει την μορφή του παρακάτω σχήματος.



Σχήμα 2.7. Χαρακτηριστική ροπής-στροφών, κινητήρα με βοηθητικό τύλιγμα.

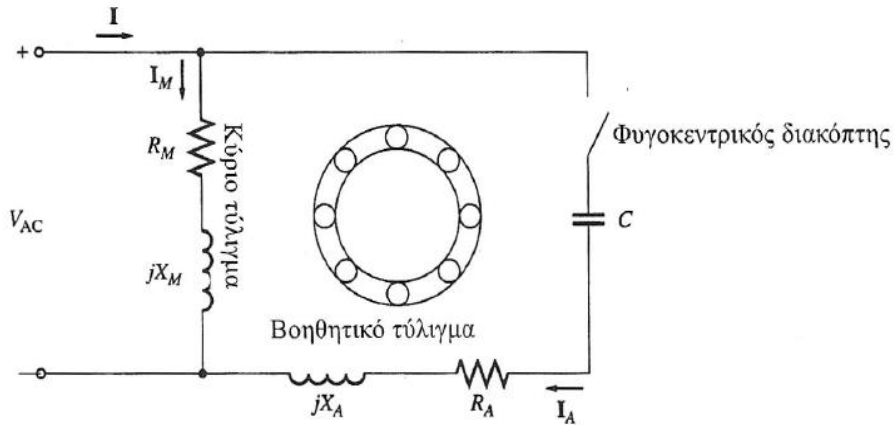
Σε αυτό το σχήμα παρουσιάζονται δυο χαρακτηριστικές, η διακεκομμένη χαρακτηριστική η οποία φαίνεται να έχει μηδενική ροπή εκκίνησης, αντιστοιχεί στη δράση μόνο του κύριου τυλίγματος, και η συνεχής χαρακτηριστική προκύπτει από την συνδυασμένη δράση του κύριου και του βοηθητικού τυλίγματος.

Η ροπή εκκίνησης στη συγκεκριμένη μέθοδο, είναι συνήθως στο 150-200% της ροπής πλήρους φορτίου. Ένα βασικό μειονέκτημα αυτής της εφαρμογής είναι οι αρμονικές ροπές (παλλόμενες ροπές), οι οποίες προκαλούνται επειδή η χρονική φασική απόκλιση των ρευμάτων μεταξύ κύριου και βοηθητικού τυλίγματος είναι μικρότερη των 90° .

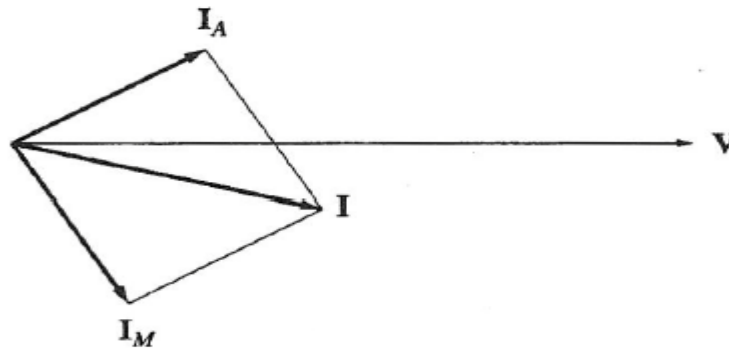
Έτσι οι κινητήρες με διαχωρισμένα τυλίγματα εξαιτίας της μέτριας ροπής εκκίνησης αλλά και του αρκετά μικρού ρεύματος εκκίνησης, χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές που δεν απαιτούν πολύ υψηλές ροπές εκκίνησης, όπως οι ανεμιστήρες, οι φυσητήρες και οι φυγοκεντρικές αντλίες. Ενώ ακόμα διατίθενται και σε μικρά μεγέθη (κλάσμα του ίππου), που είναι και οικονομικοί.

2.3.2 Εκκίνηση με χρήση πυκνωτή εκκίνησης.

Όταν σε εφαρμογές η ροπή εκκίνησης που προσφέρεται από ένα κινητήρα με διαχωρισμένα τυλίγματα δεν είναι επαρκής για την εκκίνηση του φορτίου που συνδέεται στον άξονα του κινητήρα, τότε σε σειρά με το βοηθητικό τύλιγμα τοποθετείται ένας πυκνωτής, ο οποίος αυξάνει την αρχική ροπή εκκίνησης του κινητήρα. Σε αυτή τη μέθοδο εκκίνησης χρησιμοποιείται μόνο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής οποίος είναι συνδεδεμένος μέσω ενός φυγοκεντρικού διακόπτη σε σειρά με το βοηθητικό τύλιγμα όπως αναφέραμε και πιο πάνω.



(α)

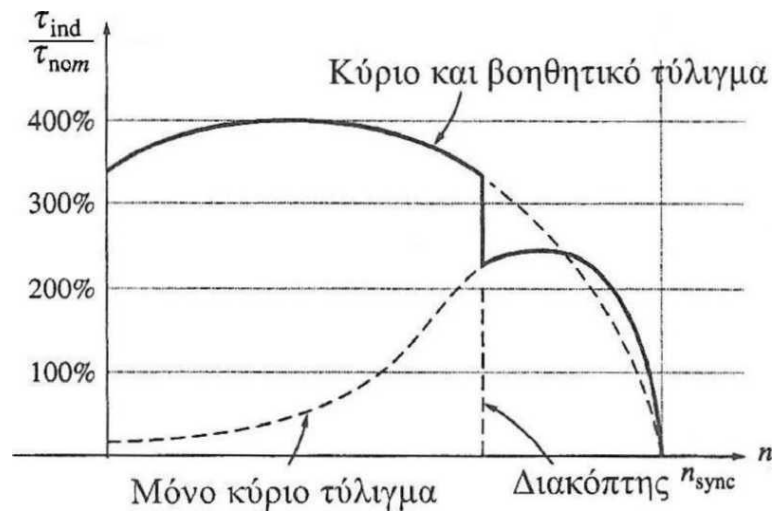


(β)

Σχήμα 2.8. (α) Ένας επαγωγικός κινητήρας με πυκνωτή εκκίνησης (β) Οι φάσεις των ρευμάτων κατά την εκκίνηση του κινητήρα.

Η χωρητικότητα του πυκνωτή μπορεί να μεταβάλει την μαγνητεγερτική δύναμη του ρεύματος εκκίνησης του βοηθητικού τυλίγματος, έτσι ώστε να είναι ίση με τη μαγνητεγερτική δύναμη που παρουσιάζει το ρεύμα του κύριου τυλίγματος (εξισορρόπηση ρευμάτων). Επίσης το ρεύμα του βοηθητικού τυλίγματος μπορεί να γίνει τέτοιο ώστε να προηγείται, σε φάση του ρεύματος στο κύριο τύλιγμα, κατά 90° . Αυτή η διαφορά φάσης στο ρεύμα δημιουργεί μονοφασικό ομογενές και στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στο στάτη, με αποτέλεσμα ο κινητήρας να συμπεριφέρεται όπως θα συμπεριφερόταν ένας τριφασικός κινητήρας που τροφοδοτείται από μία τριφασική πηγή ισχύος.

Η συγκεκριμένη διάταξη προσφέρει ροπή εκκίνησης περίπου στο 300-400% της ροπής πλήρους φορτίου. Ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής είναι υγρού τύπου, σχεδιασμένος για χρήση εναλλασσομένου ρεύματος (όχι βέβαια για μόνιμη λειτουργία αλλά για πεπερασμένο αριθμό περιόδων της τάσεως εισόδου). Μετά την αποσύνδεση του βοηθητικού τυλίγματος, η λειτουργία του κινητήρα γίνεται μόνο με το κυρίως τύλιγμα.

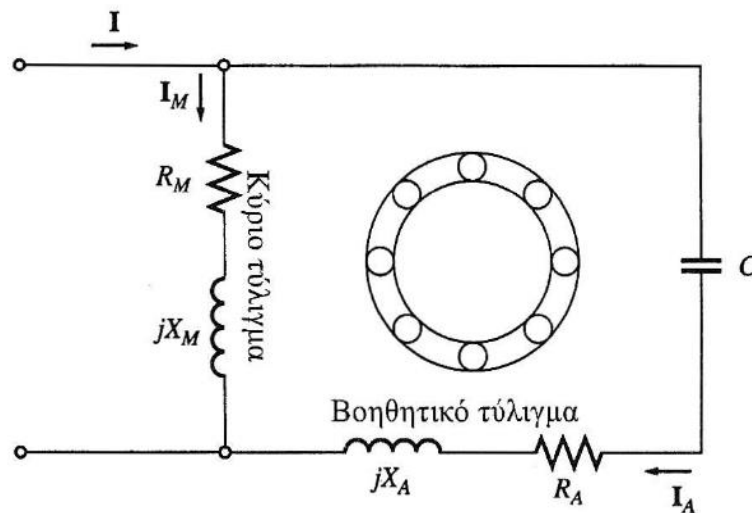


Σχήμα 2.9. Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας κινητήρα με πυκνωτή εκκίνησης.

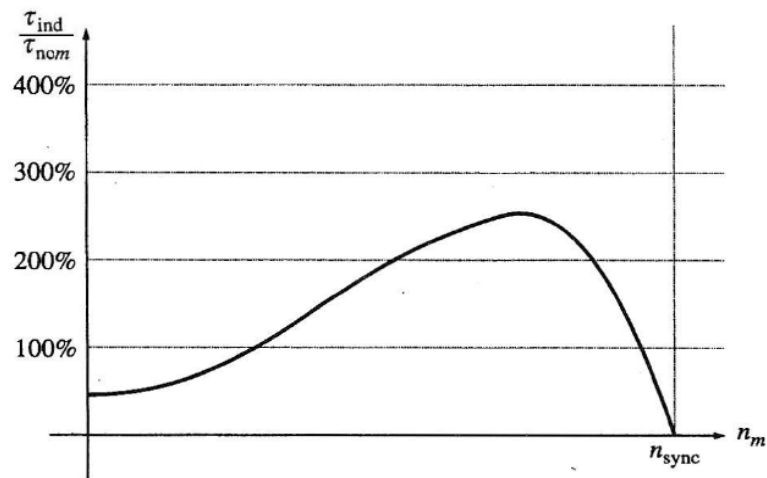
Λόγω της μεγάλης ροπής εκκίνησης αυτοί οι κινητήρες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως αεροσυμπιεστές, αντλίες, κλιματιστικά και άλλα τμήματα συσκευών που πρέπει να ξεκινούν υπό φορτίο. Ενώ για να αλλάξουμε την φορά περιστροφής του κινητήρα θα πρέπει να αντιστραφεί η πολικότητα ενός εκ των δύο τυλιγμάτων του στάτη, δηλαδή του κύριου ή του βοηθητικού τυλιγματος. Αυτό ισχύει βέβαια για όλες τις μεθόδους εκκίνησης.

2.3.3. Εκκίνηση με χρήση πυκνωτή μόνιμης λειτουργίας.

Στη συγκεκριμένη μέθοδο δεν απαιτείται η χρήση φυγοκεντρικού διακόπτη ή άλλου μέσου για την αποσύνδεσή του βοηθητικού τυλιγματος, δηλαδή το βοηθητικό τύλιγμα συνδέεται σε σειρά με ένα μικρότερο πυκνωτή και παραμένει στο κύκλωμα του κινητήρα ακόμα και μετά τη λήξη της φάσης της εκκίνησης.



(α)



(β)

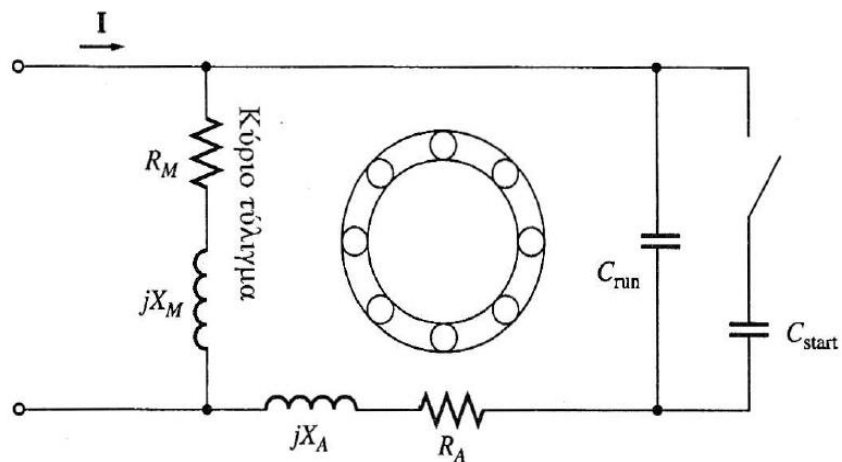
Σχήμα 2.10. (α) Επαγωγικός κινητήρας μόνιμου πυκνωτή, (β) Η χαρακτηριστική ροπή ταχύτητας.

Επιλέγοντας κατάλληλα τη τιμή της χωρητικότητας, τότε ο πυκνωτής ο οποίος χάρτου ή λαδιού κατάλληλος για χρήση εναλλασσομένου ρεύματος, προσδίδει στον κινητήρα ένα τελείως ομογενές στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο για ένα συγκεκριμένο φορτίο, με αποτέλεσμα αυτός να συμπεριφέρεται όπως ακριβώς ένας τριφασικός επαγωγικός κινητήρας με το ίδιο φορτίο.

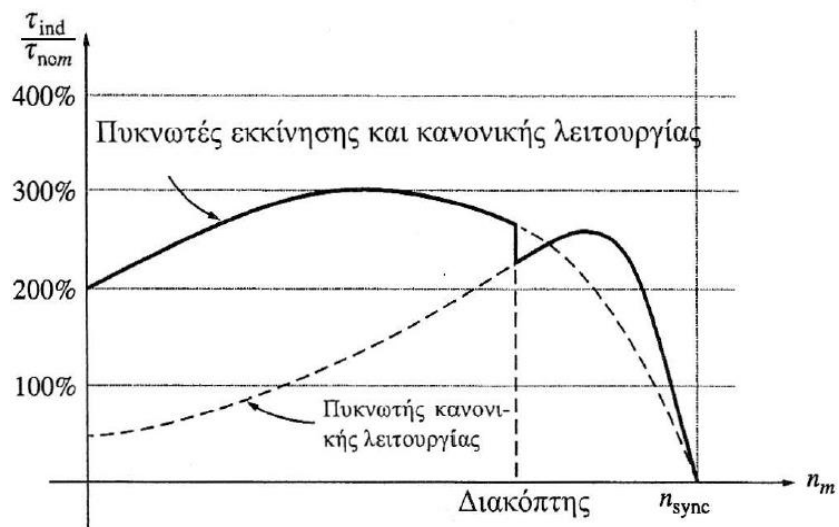
Οι ροπή εκκίνησης των συγκεκριμένων κινητήρων είναι μικρότερη από τους κινητήρες με πυκνωτή εκκίνησης. Αυτό συμβαίνει επειδή ο πυκνωτής θα πρέπει να είναι ικανός να εξισορροπεί τα ρεύματα στο κύριο και στο βοηθητικό τύλιγμα, στις συνθήκες κανονικής φόρτισης. Εφόσον το ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα είναι μεγαλύτερο απ' αυτό της κανονικής φόρτισης, ο πυκνωτής που μπορεί και εξισορροπεί τα ρεύματα στην κανονική φόρτιση δεν τα εξισορροπεί και στις συνθήκες εκκίνησης.

2.3.4. Εκκίνηση με χρήση δύο πυκνωτών (εκκίνησης και μόνιμης λειτουργίας).

Όταν σε εφαρμογές απαιτείται η μεγαλύτερη δυνατή ροπή εκκίνησης και οι καλύτερες συνθήκες κανονικής λειτουργίας, τότε παρεμβάλλεται παράλληλα με τον προηγούμενο ακόμα ένας πυκνωτής. Ο συγκεκριμένος πυκνωτής (ηλεκτρολυτικού τύπου) είναι μεγαλύτερης χωρητικότητας ενώ παραμένει στο κύκλωμα μόνο κατά την εκκίνηση. Αυτοί οι κινητήρες που έχουν δυο πυκνωτές ονομάζονται κινητήρες με πυκνωτή εκκίνησης και πυκνωτή λειτουργίας.



(α)



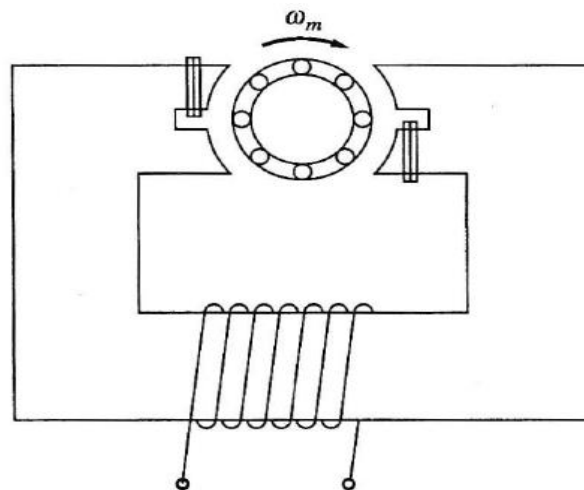
(β)

Σχήμα 2.11. (α) Επαγωγικός κινητήρας με πυκνωτή εκκίνησης και λειτουργίας, (β) Η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας αυτού του κινητήρα.

Έτσι ο πυκνωτής εκκίνησης είναι παρών στο κύκλωμα μόνο κατά την εκκίνηση εξασφαλίζοντας πολύ μεγάλες ροπές κατά την εκκίνηση αλλά και εξισορρόπηση των ρευμάτων του κύριου και του βοηθητικού τυλίγματος. Αποσυνδέεται από το βοηθητικό τύλιγμα μέσω ενός φυγοκεντρικού διακόπτη ο οποίος ανοίγει περίπου στο 75% της ονομαστικής ταχύτητας, και παραμένει πια ο πυκνωτής λειτουργίας ο οποίος είναι χάρτου ή λαδιού κατάλληλος για χρήση εναλλασσομένου ρεύματος. Ο πυκνωτής λειτουργίας παίρνει τιμές περίπου 10% με 30% της τιμής του πυκνωτή εκκίνησης (κυμαίνεται μεταξύ 15μf με 50μf), ώστε να εξισορροπεί τα ρεύματα στη λειτουργία με κανονικά φορτία και με σκοπό ο κινητήρας να λειτουργεί με μεγάλη απόδοση, με μεγάλη ροπή και με μεγάλο συντελεστή ισχύος.

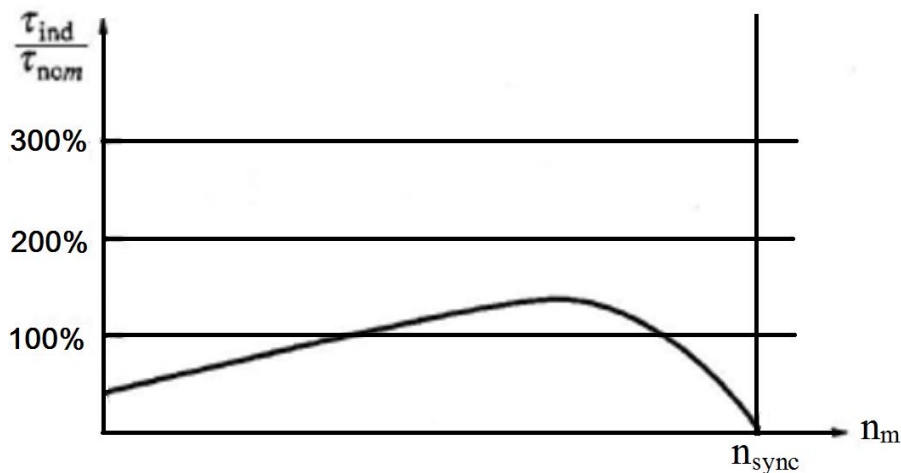
2.3.5. Κινητήρες με βοηθητικούς πόλους.

Οι κινητήρες με βοηθητικούς πόλους έχουν μόνο κύριο τύλιγμα. Ενώ το βοηθητικό τύλιγμα έχει αντικατασταθεί από διακεκριμένους πόλους, και το ένα τμήμα τους αποτελείται από ένα βραχυκυκλωμένο πηνίο που ονομάζεται βοηθητικό πηνίο.



Το τύλιγμα του στάτη

(α)



(β)

Σχήμα 2.12. (α) Βασική δομή επαγωγικού κινητήρα με βοηθητικούς πόλους, (β) Η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του κινητήρα.

Το κύριο τύλιγμα επάγει μια χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή στους πόλους. Η μεταβολή της μαγνητικής ροής των πόλων δημιουργεί επαγόμενες τάσεις και ρεύματα που αντιτίθενται στην αρχική μεταβολή της ροής. Αυτό έχει ως συνέπεια την καθυστέρηση της μεταβολής της ροής κάτω από τα καλυμμένα τμήματα των πόλων, δημιουργώντας μια μικρή διαφοροποίηση μεταξύ των δύο αντίθετα στρεφόμενων μαγνητικών πεδίων του στάτη. Η συνισταμένη περιστροφή θα έχει φορά από το ακάλυπτο προς το καλυμμένο τμήμα του πόλου.

Η ροπή που παράγεται από τους βοηθητικούς πόλους είναι η μικρότερη δυνατή που μπορούμε να πάρουμε, συγκριτικά με τις άλλες μεθόδους εκκίνησης. Επίσης και η απόδοσή τους είναι η πιο μικρή απ' όλες τις άλλες κατηγορίες μονοφασικών επαγωγικών κινητήρων, αντίθετα η ολίσθηση είναι η μεγαλύτερη. Κινητήρες που έχουν τέτοιους πόλους είναι πολύ μικροί (0,05 hp και κάτω) και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου η απαιτήσεις για υψηλή ροπή εκκίνησης είναι πολύ μικρές. Αυτοί οι κινητήρες όμως αποτελούν και την πιο οικονομική λύση όταν μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

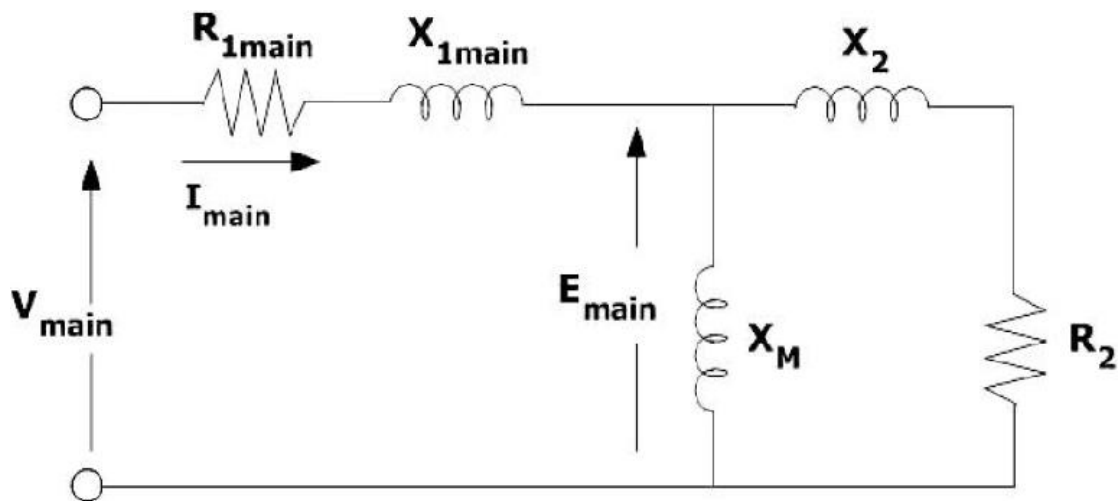
Ακόμα στους κινητήρες με βοηθητικούς πόλους ο τρόπος αντιστροφής της φοράς περιστροφής δεν είναι εύκολος επειδή η ροπή εκκίνησης προκαλείται με τη συμβολή του βοηθητικού πηνίου. Έτσι προκειμένου να αντιστραφεί η φορά περιστροφής του κινητήρα πρέπει να τοποθετηθούν δυο βοηθητικά πηνία σε κάθε πόλο, καθώς και η επιλεκτική βραχυκύκλωση του ενός ή του άλλου πηνίου.

2.4. Ισοδύναμο κύκλωμα μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα.

Όπως περιγράφηκε στην αρχή του κεφαλαίου, η δημιουργία της επαγόμενης ροπής σε ένα μονοφασικό επαγωγικό κινητήρα προέρχεται από το θεώρημα των δυο αντιθέτων στρεφόμενων πεδίων (Double Revolving Field Theory). Με βάση λοιπόν αυτού του θεωρήματος, αναπτύσσεται πρώτα το ισοδύναμο κύκλωμα μόνο του κύριου τυλίγματος ενός μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το βοηθητικό τύλιγμα, και στη συνέχεια το κύκλωμα του κινητήρα και με τα δυο τυλίγματα.

2.4.1 Ισοδύναμο κύκλωμα για λειτουργία του κινητήρα μόνο με το κύριο τύλιγμα.

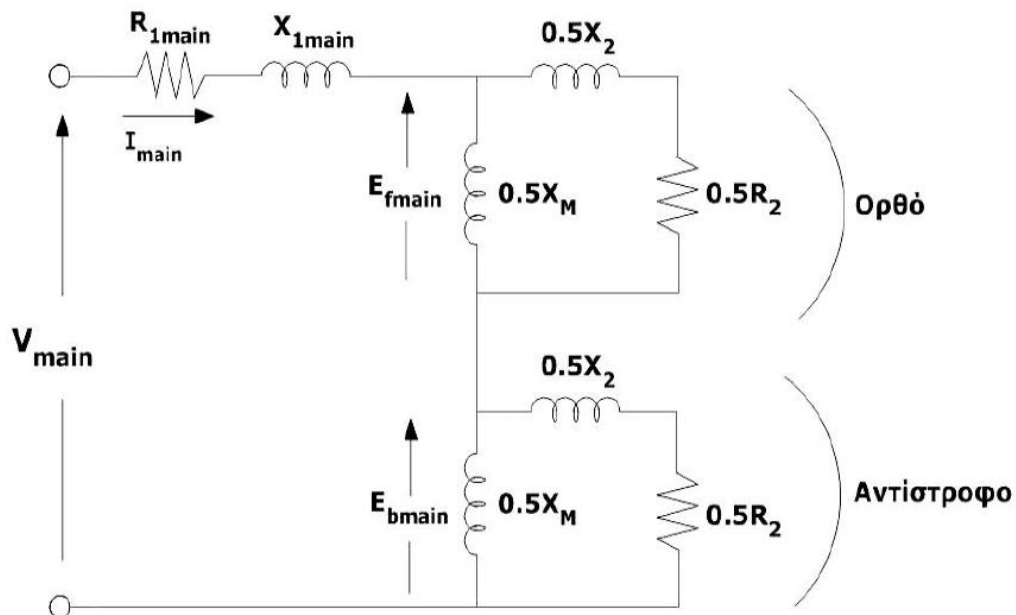
Πρώτα θα αναλυθεί το ισοδύναμο κύκλωμα ενός μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα που λειτουργεί με την παρουσία μόνο του κύριου τυλίγματος. Είναι προτιμότερο η αρχή για την εξέταση του κυκλώματος, να γίνει την στιγμή που αυτός είναι ακινητοποιημένος. Ένα τέτοιος κινητήρας συμπεριφέρεται σαν ένας μονοφασικός μετασχηματιστής, ενώ το ισοδύναμο κύκλωμά του με το δευτερεύον τύλιγμά του εκτός, είναι ίδιο με αυτό του μετασχηματιστή.



Σχήμα 2.13. Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ακινητοποιημένου μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα ($s=1$).

Το $R_{i\text{main}}$ και $X_{i\text{main}}$ είναι η αντίσταση και η αντίδραση σκέδασης του κυρίως τυλίγματος στο στάτη. Η αντίδραση μαγνήτισης είναι το X_M , R_2 και X_2 είναι οι τιμές της αντίστασης και της αντίδρασης σκέδασης του δρομέα, στο ανοιγμένο πρωτεύον.

Όπως αναφέρθηκε, η παλλόμενη μαγνητική ροή που αναπτύσσεται στο διάκενο του κινητήρα μπορεί να διαιρεθεί σε δύο ίσα και αντίθετα μαγνητικά πεδία. Αυτά τα μαγνητικά πεδία εξαιτίας του ίδιου μεγέθους, δημιουργούν και τα δυο τις ίδιες ωμικές και επαγωγικές πτώσεις τάσης στο δρομέα. Στο επόμενο ισοδύναμο κύκλωμα (σχήμα 2.14) γίνεται διαχωρισμός του ισοδύναμου κυκλώματος του δρομέα σε δύο τμήματα, όπου το καθένα περιγράφει τις επιδράσεις των πεδίων ορθού και αντίστροφου ξεχωριστά.



Σχήμα 2.14. Ισοδύναμο κύκλωμα, ενός ακινητοποιημένου μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα, στο οποίο τα αποτελέσματα του ορθού και του αντίστροφου μαγνητικού πεδίου χωρίζονται μεταξύ τους.

Για την περιστροφή του κινητήρα συνδέεται στο κύκλωμα του στάτη ένα βοηθητικό τύλιγμα, το οποίο απομακρύνεται την στιγμή που η ταχύτητα του δρομέα πλησιάζει αυτή της σύγχρονης. Γενικότερα, σε ένα επαγωγικό κινητήρα το ποσοστό της σχετικής κίνησης μεταξύ των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα, επηρεάζει την ενεργό τιμή της αντίστασης του δρομέα. Στο μονοφασικό κινητήρα όμως, τα δυο μαγνητικά πεδία που υφίστανται στο εσωτερικό του, έχουν διαφορετικό ποσοστό σχετικής κίνησης.

Στο ορθό μαγνητικό πεδίο ως ολίσθηση S ορίζετε, η ανά μονάδα (per-unit) διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από την ταχύτητα περιστροφής του ορθού μαγνητικού πεδίου. Έτσι η αντίσταση του δρομέα στο τμήμα του κυκλώματος που αντιστοιχεί στο ορθό μαγνητικό πεδίο είναι ίση με $0.5R_2/S$.

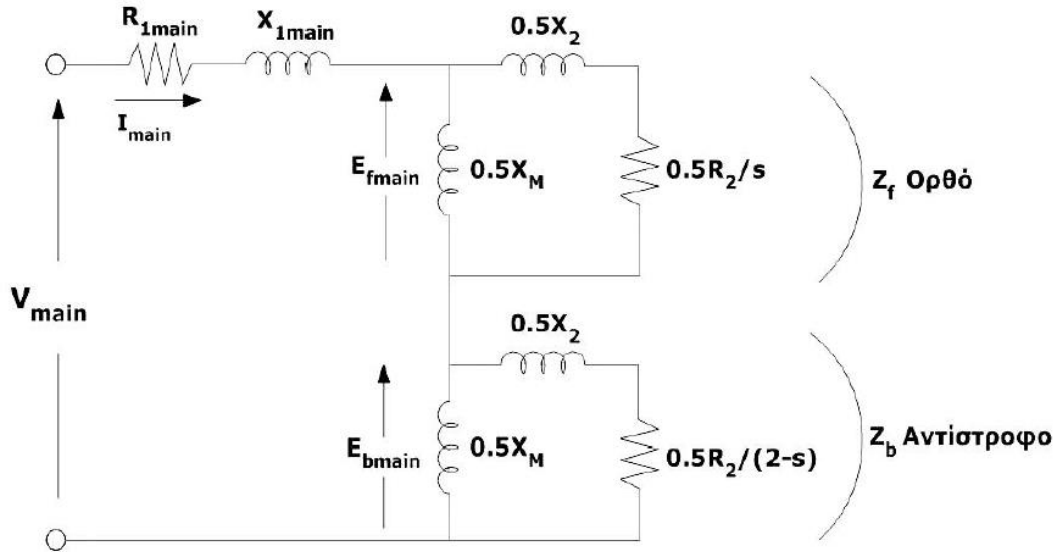
Το ορθό μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται με ταχύτητα n_{sync} και το αντίστροφο με ταχύτητα $-n_{sync}$. Επομένως ισχύει:

$$S = S_f = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} = 1 - \frac{n_m}{n_{sync}}$$

$$S_b = 1 - \frac{n_m}{-n_{sync}} = 1 + \frac{n_m}{n_{sync}}$$

$$S_b = 1 + (1 - s_f) = 2 - s$$

Άρα προκύπτει ότι $2 - s$ είναι συνολική ανά μονάδα διαφορά της ταχύτητας μεταξύ δρομέα και αντίστροφου μαγνητικού πεδίου. Επίσης, $0.5R_2/(2 - s)$ είναι η ενεργός αντίσταση του δρομέα, στο τμήμα του κυκλώματος που αντιστοιχεί στο αντίστροφο μαγνητικό πεδίο. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα για το μονοφασικό ασύγχρονο κινητήρα.



Σχήμα 2.15. Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα που περιστρέφεται με ενεργοποιημένο μόνο το κύριο τύλιγμά του.

Προκειμένου να απλοποιηθούν οι υπολογισμοί ορίζονται οι σύνθετες αντιστάσεις Z_f , Z_b . Z_f είναι η σύνθετη αντίσταση που αντιπροσωπεύει όλα τα ηλεκτρικά στοιχεία του δρομέα στο ορθό μαγνητικό πεδίο και Z_b αντίστοιχα είναι η σύνθετη αντίσταση για όλα τα ηλεκτρικά στοιχεία του δρομέα στο αντίστροφο μαγνητικό πεδίο. Αυτές οι σύνθετες αντιστάσεις δίνονται από τις σχέσεις :

$$Z_f = R_f + jX_f$$

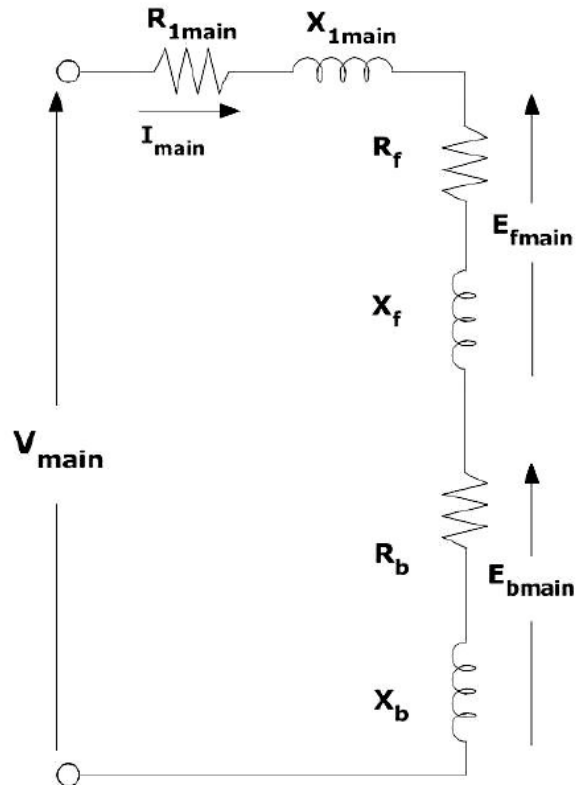
$$R_f = \frac{R_2 X_M^2}{2s \left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_2 + X_M)^2}$$

$$X_f = \frac{X_M \left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + X_2 (X_2 + X_M)}{2 \left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_2 + X_M)^2}$$

$$Z_b = R_b + jX_b$$

$$R_b = \frac{R_2 X_M^2}{2(2-s) \left(\frac{R_2}{(2-s)} \right)^2 + (X_2 + X_M)^2}$$

$$X_b = \frac{X_M \left(\frac{R_2}{(2-s)} \right)^2 + X_2 (X_2 + X_M)}{2 \left(\frac{R_2}{(2-s)} \right)^2 + (X_2 + X_M)^2}$$



Σχήμα 2.16. Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα με την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση και αντίδραση του δρομέα, για το ορθό και το αντίστροφο μαγνητικό πεδίο.

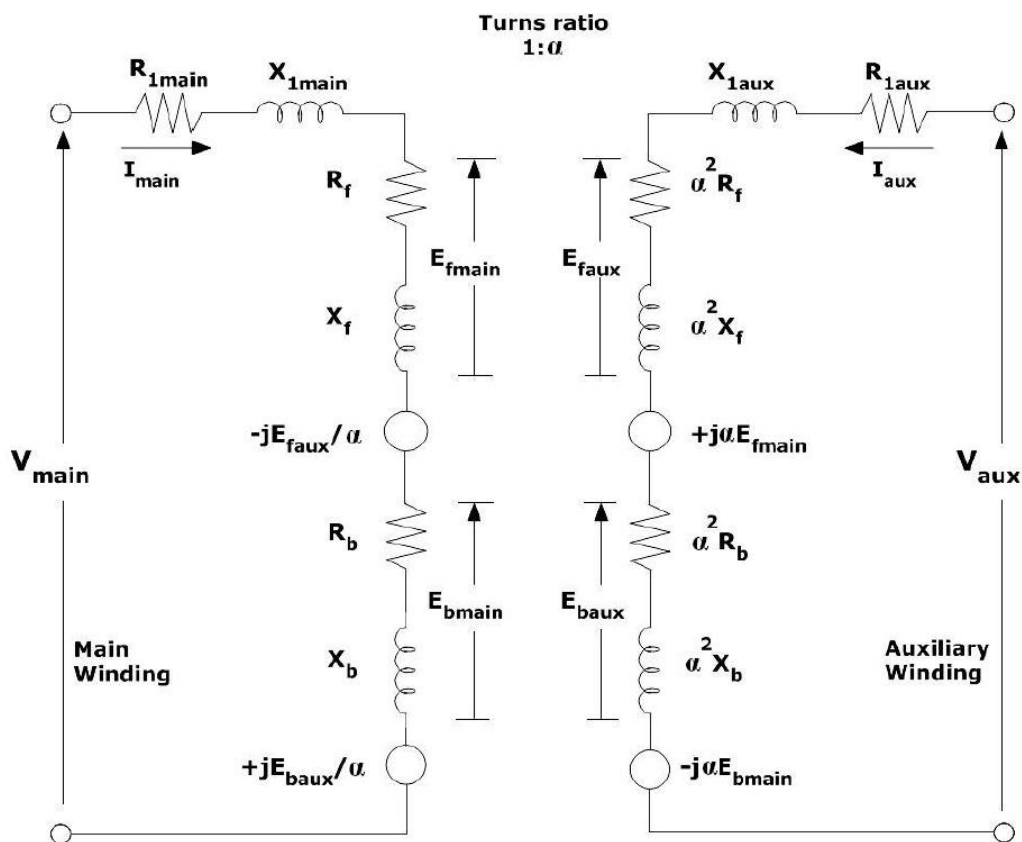
2.4.2 Ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα για λειτουργία με δυο τυλίγματα.

Σε αυτή την ενότητα αναπτύσσεται το ισοδύναμο κύκλωμα του μονοφασικού κινητήρα, όταν αυτός λειτουργεί με κύριο και βοηθητικό τύλιγμα. Στην ουσία τώρα ο μονοφασικός κινητήρας λειτουργεί με δυο φάσεις.

Το βοηθητικό τύλιγμα όπως έχει ήδη αναφερθεί, έχει διαφορετικό αριθμό σπειρών από το κύριο τύλιγμα ενώ η τοποθέτησή του γίνεται κάθετα σε αυτό. Ο λόγος των σπειρών του βοηθητικού τυλίγματος προς το κύριο ορίζεται με την μεταβλητή $a = N_{aux}/N_{main}$. Τα ισοδύναμα κυκλώματα του κύριου και του βοηθητικού τυλίγματος είναι σχεδόν ίδια, με τη μόνη διαφορά ότι όλες οι αντιστάσεις και οι αντιδράσεις του βοηθητικού πολλαπλασιάζονται με a^2 ώστε να είναι ανηγμένες στο κύριο τύλιγμα. Επίσης, επειδή τα δυο τυλίγματα λειτουργούν ταυτόχρονα, τότε σε κάθε τύλιγμα εκτός από τις επαγόμενες τάσεις που δημιουργούνται από τα δυο μαγνητικά πεδία ορθό και αντίστροφο (E_{fmain} και E_{bmain} για το κύριο, E_{faux} και E_{baux} για το βοηθητικό), θα δημιουργούνται και επαγόμενες τάσεις από το ορθό και αντίστροφο πεδίο εξαιτίας του άλλου τυλίγματος.

Το κύριο τυλίγμα επειδή είναι χωρικά τοποθετημένο κατά 90° ηλεκτρικές μοίρες από το βοηθητικό, η επαγόμενη τάση από το ορθό μαγνητικό πεδίο στο κύριο τυλίγμα θα καθυστερεί κατά 90° μοίρες σε φάση από την τάση που επάγει το ίδιο πεδίο στο βοηθητικό τυλίγμα. Επιπλέον, εξαιτίας της αναλογίας των σπειρών μεταξύ του κύριου και του βοηθητικού τυλίγματος που είναι 1 προς a , προκύπτει ότι το εύρος της τάσης του κύριου τυλίγματος είναι $1/a$ φορές από την τάση του βοηθητικού.

Συμπεραίνουμε από τα παραπάνω, ότι η επαγόμενη τάση του κύριου τυλίγματος που παράγεται από το ορθό μαγνητικό πεδίο του βοηθητικού είναι: $-jE_{faux}/a$. Με την ίδια λογική προκύπτει και η τάση που επάγεται στο κύριο τυλίγμα από το αντίστροφο μαγνητικό πεδίο του βοηθητικού, το ίδιο ισχύει και για τις αντίστοιχες τάσεις που επάγονται στο βοηθητικό. Στο επόμενο ηλεκτρικό ισοδύναμο του μονοφασικού κινητήρα παρουσιάζονται τα δύο τυλίγματα, με όλες τις επαγόμενες τάσεις.



Σχήμα 2.17. Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα, όταν λειτουργούν και τα δύο τυλίγματα.

2.5. Έλεγχος της ταχύτητας των μονοφασικών επαγωγικών κινητήρων.

Ο έλεγχος της ταχύτητάς των μονοφασικών κινητήρων γίνεται όπως και στους πολυφασικούς επαγωγικούς κινητήρες. Για ένα μονοφασικό κινητήρα με βραχυκυκλωμένο δρομέα οι τεχνικές για τον έλεγχο της ταχύτητάς του είναι οι εξής :

1. Μεταβολή της συχνότητας στο στάτη.
2. Μεταβολή του αριθμού των πόλων.
3. Μεταβολή της τάσης εισόδου VT.

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος για τον έλεγχο της ταχύτητα περιστροφής κινητήρων με μεγάλη ολίσθηση είναι η ρύθμιση της τάσης εισόδου του. Η μεταβολή της τάσης που εφαρμόζεται σ' έναν κινητήρα μπορεί να γίνει μ' έναν από τους τρεις παρακάτω τρόπους:

1. Ο αυτομετασχηματιστής είναι ικανός για την συνεχή ρύθμιση της τάσης γραμμής. Επειδή όμως είναι και η πιο δαπανηρή μέθοδος για τον έλεγχο της ταχύτητας, χρησιμοποιείται μόνο όταν είναι αναγκαία ομαλή ρύθμιση της ταχύτητας.

2. Ένας άλλος τρόπος για τον έλεγχο της ταχύτητας είναι ένα κύκλωμα με SCR ή με TRIAC όπου με έλεγχο φάσης μειώνεται η ενεργός τιμή της τάσης που εφαρμόζεται στον κινητήρα. Αυτή η τεχνική τεμαχίζει την εναλλασσόμενη κυματομορφή με αποτέλεσμα την αύξηση του θορύβου και των δονήσεων του κινητήρα. Στις μέρες μας επειδή οι ηλεκτρονικοί διακόπτες είναι πιο φτηνή από τους αυτομετασχηματιστές χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο.

3. Μια άλλη μέθοδος για τον έλεγχο της τάσης που εφαρμόζεται στο κινητήρα είναι η εισαγωγή μιας αντίστασης σε σειρά στο κύκλωμα του στάτη. Είναι η πιο οικονομική μέθοδος από όλες τη άλλες, αλλά έχει το μειονέκτημα, ότι ένα σημαντικό μέρος της ισχύς χάνεται στην αντίσταση προκαλώντας μείωση της συνολικής απόδοσης κατά τη μετατροπή της ισχύος. Επίσης οι κινητήρες που έχουν μεγάλη ολίσθηση όπως αυτοί που έχουν βοηθητικούς πόλους, υπάρχει μια επιπλέον μέθοδος για την ρύθμιση της ταχύτητας. Στην θέση του αυτομετασχηματιστή που εφαρμόζεται στο στάτη του κινητήρα για την μεταβολή της τάσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ίδιο τύλιγμα του στάτη ως αυτομετασχηματιστής.

2.6 Χωρητικότητα πυκνωτών μονοφασικών ασύγχρονων κινητήρων.

Στους μονοφασικούς κινητήρες η τιμή της χωρητικότητας των πυκνωτών εκκινήσεως και λειτουργίας, μπορεί να καθοριστεί με καλή προσέγγιση από τους παρακάτω τύπους.

Για των πυκνωτή εκκινήσεως ισχύει:

$$C = \frac{3.180 I}{v} \times \frac{1}{2}$$

Για των πυκνωτή λειτουργίας ισχύει:

$$C = \frac{3.180 I}{v} \times \frac{1}{4}$$

Όπου:

C είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή σε μF

I είναι η ένταση (εκκίνησης ή λειτουργίας) σε A (αμπέρ).

v η τάση τροφοδοσίας του πυκνωτή σε V (βόλτ).

Κεφάλαιο 3 : Τυλίγματα στάτη Ε.Ρ.

3.1 Συγκρότηση των τυλιγμάτων του στάτη.

Το τύλιγμα του στάτη στους επαγωγικούς κινητήρες αποτελείται από μάτσα χάλκινου σύρματος ή από χάλκινες μπάρες, τοποθετημένα πάντα σε αυλάκια, κοντά στην εσωτερική επιφάνεια του στάτη.

3.2 Χρησιμοποίηση των τυλιγμάτων με μάτσα και μπάρες.

Τυλίγματα που αποτελούνται από μάτσα χάλκινου σύρματος χρησιμοποιούνται σε κινητήρες μικρής ισχύς, αλλά μπορούν επίσης να υιοθετηθούν και σε κινητήρες με μεγάλη ισχύ και μεγάλη τάση. Τα τυλίγματα των κινητήρων μικρής ισχύος έχουν διάμετρο σύρματος που σπάνια ξεπερνάει τα 3 mm. Για μεγαλύτερη διατομή χαλκού συνήθως προτιμάται η παράλληλη σύνδεση 2 ή περισσότερων συρμάτων. Ενώ τυλίγματα που είναι με μπάρες χρησιμοποιούνται σε μηχανές μεγάλης ισχύς και χαμηλής τάσης, δηλαδή σε υψηλές εντάσεις δεν ενδείκνυται η χρήση στρόφυλου σύρματος. Συγκεκριμένα όταν έχουμε μεγάλη ένταση δεν ενδείκνυται η χρήση μεγάλων μπαρών εξαιτίας των παρασιτικών ρευμάτων που εμφανίζονται, αλλά αγωγοί με ορθογωνική διατομή μονωμένοι μεταξύ τους και συνδεδεμένοι παράλληλα.

3.3 Τιμή της Η.Ε.Δ.

Στους επαγωγικούς κινητήρες Ε.Ρ. είναι απαραίτητη η συνεργασία πολλών αγωγών συνδεδεμένοι σε σειρά, έτσι ώστε η Η.Ε.Δ που παράγεται να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην πράξη. Το μέγεθος της Η.Ε.Δ επηρεάζεται από το πλήθος των αγωγών που είναι συνδεδεμένοι σε σειρά, καθώς και από τη φάση των στοιχειωδών Η.Ε.Δ. .

Δύο αγωγοί συνδεδεμένοι σε σειρά έχουν Η.Ε.Δ. διπλάσια από εκείνη που έχει ένας, με την προϋπόθεση πάντα η στοιχειώδεις Η.Ε.Δ. των δύο αγωγών να είναι σε φάση, με άλλα λόγια όταν οι δύο αγωγοί είναι σε απόσταση ενός πολικού βήματος δηλαδή 180° ηλεκτρικές μοίρες. Όταν όμως η στοιχειώδεις Η.Ε.Δ. δεν είναι σε φάση, η Η.Ε.Δ. που παράγεται είναι μικρότερη. Επίσης καθώς μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ δύο αγωγών, η Η.Ε.Δ. γίνεται ακόμα μικρότερη.

Η Η.Ε.Δ. μπορεί να πάρει επίσης αρκετά χαμηλές τιμές όταν δύο αγωγοί πλησιάζουν πολύ κοντά, γιατί οι στοιχειώδεις Η.Ε.Δ. είναι σχεδόν σε αντίφαση.

Η τιμή της Η.Ε.Δ. που επάγεται σε κάθε φάση του στάτη δίνεται από τη σχέση:

$$E = 41,11K_{\tau}fN\Phi_{\delta} \text{ [V]}$$

Όπου :

f είναι η συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας

N είναι ο αριθμός σπειρών για κάθε φάση

Φ_{δ} είναι η ροή σε Weber στο διάκενο

K_{τ} είναι ο συντελεστής τυλιγμάτων

3.4 Είδη τυλιγμάτων.

Για την κατασκευή των μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος υπάρχουν τρία είδη τυλιγμάτων, αυτά είναι:

- 1) τυλίγματα με ένα μάτσο / αυλάκι
- 2) τυλίγματα με δύο μάτσα / αυλάκι
- 3) τυλίγματα με ένα και δύο μάτσα / αυλάκι.

Τα τυλίγματα με ένα μάτσο / αυλάκι ονομάζονται και τυλίγματα με μια στρώση. Τα τυλίγματα με δύο μάτσα ανά αυλάκι ονομάζονται και τυλίγματα με δύο στρώσεις και τέλος με ένα και δύο μάτσα / αυλάκι ονομάζονται μικτά τυλίγματα.

Μπορεί να υπάρχουν μονοφασικά διφασικά ή και τριφασικά τυλίγματα. Τα τριφασικά τυλίγματα είναι τα ποιο διαδεδομένα, ενώ μπορούν να θεωρηθούν ότι προκύπτουν από τρία μονοφασικά τυλίγματα τα οποία είναι μετατοπισμένα κατά 120° ηλεκτρικές μοίρες.

3.5 Γεωμετρικές ηλεκτρικές μοίρες.

Στις διπολικές μηχανές εναλλασσομένου ρεύματος επάγεται σε κάθε εργαζόμενο αγωγό του κινητήρα Η.Ε.Δ., η οποία συμπληρώνει μια ολόκληρη περίοδο, όταν ο αγωγός περνώντας μπροστά από ένα βόρειο και ένα νότιο πόλο, ξαναβρεθεί πάλι μπροστά στον επόμενο βόρειο πόλο.

Στις πολυπολικές μηχανές όμως η Η.Ε.Δ. που επάγεται στους αγωγούς, συμπληρώνει μια περίοδο όταν ο αγωγός διαγράψει ένα ορισμένο τόξο που αντιστοιχεί σε ορισμένη γεωμετρική γωνία, η τιμή αυτής της γεωμετρικής γωνίας εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων του απαγωγέα. Η σχέση μεταξύ γεωμετρικών και ηλεκτρικών γωνιών είναι:

Γεωμετρική γωνία = ηλεκτρική γωνία / ζεύγη πόλων.

3.6 Τύποι των τυλιγμάτων του στάτη.

Τα τυλίγματα των ασύγχρονων κινητήρων διακρίνονται σε τρία συστήματα:

- 1) ομόκεντρο
- 2) βροχοειδές ή "στεφάνης"
- 3) κυματοειδές

Τα τρία συστήματα διακρίνονται σε δύο τύπους:

- α) με πόλους ομώνυμους
- β) με πόλους εναλλάξ

Και οι δυο τύποι των τυλιγμάτων μπορούν να χωριστούν ανάλογα με το πλάτος που έχει το μάτσο, δηλαδή ανάλογα με την απόσταση των μεταξύ ενεργών πλευρών τους σε:

- α) τυλίγματα με βήμα ακέραιο
- β) τυλίγματα με βήμα σμικρυμένο.

Ένα ομόκεντρο τύλιγμα κανονικά γίνεται σε δύο επίπεδα, αλλά μπορεί επίσης να γίνει με μια τοποθέτηση των κεφαλών όμοια με εκείνη των τυλιγμάτων στεφάνης, το συγκεκριμένο τύλιγμα λέγεται πια τύλιγμα ομόκεντρο με στεφάνη. Όλα τα μάτσα στο τύλιγμα στεφάνης είναι ίσα, ενώ όταν έχουμε τύλιγμα ομόκεντρο με στεφάνη τότε τα μάτσα κάθε συγκροτήματος είναι διαφορετικού μεγέθους, το ίδιο ισχύει και για το ομόκεντρο με δύο επίπεδα. Το τύλιγμα στεφάνης συνήθως χρησιμοποιείται από τους τυλιχτές για την αντικατάσταση του ομόκεντρου με μια στρώση.

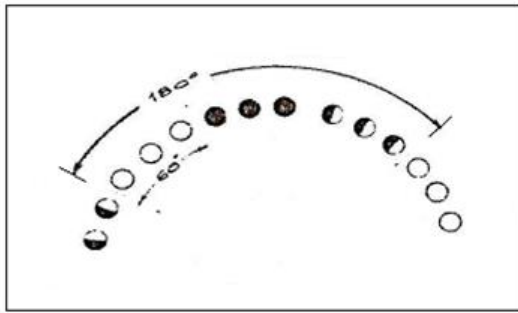
3.7 Τυλίγματα με βήμα ακέραιο και με βήμα σμικρυμένο.

Είναι δυνατόν τα τυλίγματα να χρησιμοποιηθούν με ένα ή και με δύο μάτσα ανά αυλάκι. Όταν έχουμε τυλίγματα με ένα μάτσο ανά αυλάκι τότε οι αγωγοί σε κάθε αυλάκι αποτελούν ένα στοιχείο, αντίθετα τυλίγματα με 2 μάτσα ανά αυλάκι οι αγωγοί κάθε αυλακιού αποτελούν 2 στοιχεία. Τα τυλίγματα που είναι με βήμα ακέραιο έχουν βήμα αυλακιών y_a ίσο με το πολικό βήμα y_π :

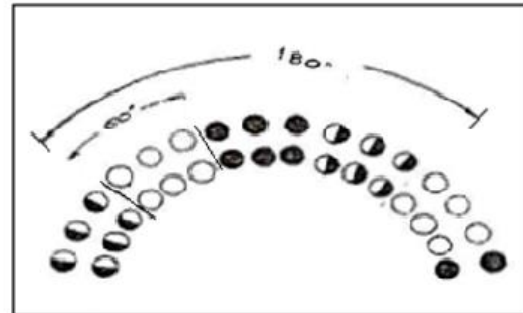
$$y_a = y_\pi = \frac{n_a}{2p}$$

Τυλίγματα που έχουν όμως βήμα σμικρυμένο, το βήμα των αυλακιών τους θα είναι μικρότερο του πολικού βήματος :

$$y_a < \frac{n_a}{2p}$$

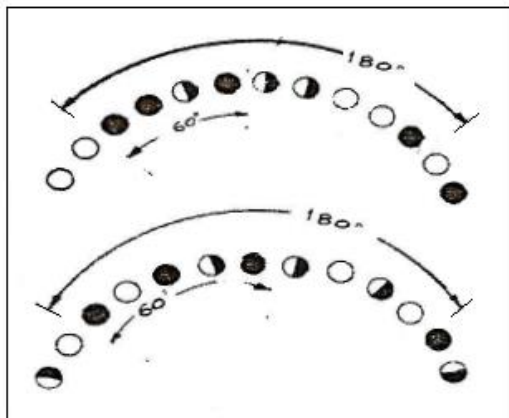


Σχήμα 3.1.

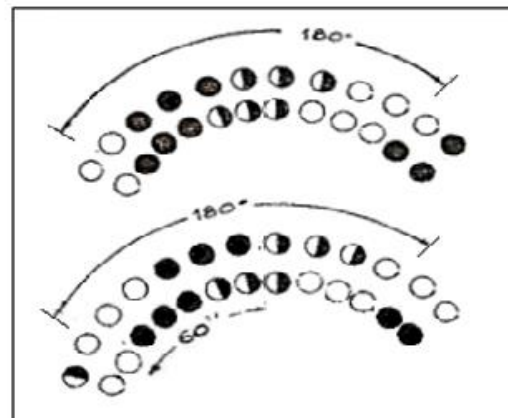


Σχήμα 3.2.

Σχήμα 3.1 και Σχήμα 3.2 οι φάσεις των τυλιγμάτων με βήμα ακέραιο καταλαμβάνουν το $1/3$ του πολικού βήματος, έτσι τα στοιχεία κάθε φάσης τοποθετούνται ομοιόμορφα κατά μήκος 60° ηλεκτρικών μοιρών.



Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.4.

Στα σχήματα 3.3 και 3.4 φαίνονται τυλίγματα με βήμα σμικρυνόμενο όπου η κάθε φάση τους καταλαμβάνουν στρώση πάντα μεγαλύτερη του $1/3$ του πολικού βήματος.

Τα τυλίγματα με ένα μάτσο ανά αυλάκι, έχουν βήμα ακέραιο όταν το βήμα τους είναι λίγο διαφορετικό από το πολικό βήμα γ_p , είναι αρκετό η κάθε φάση τους να καταλαμβάνει το $1/3$ του πολικού βήματος.

Τόσο τα τυλίγματα που είναι με μια στρώση όσο και εκείνα που είναι με δύο, είναι δυνατόν να υλοποιηθούν με βήμα ακέραιο και με βήμα κλασματικό. Στα τυλίγματα με 2 στρώσεις συνήθως χρησιμοποιείτε σμικρυνόμενο βήμα.

3.8 Πλεονεκτήματα των τυλιγμάτων με 2 στρώσεις και με βήμα σμικρυμένο.

Η σμίκρυνση του βήματος στα τυλίγματα με 2 στρώσεις προσφέρει μια μικρή οικονομία στο σύρμα, αυτό συμβαίνει επειδή οι κορυφές των μάτσων σε αυτήν την περίπτωση είναι μικρότερη. Επειδή η σμίκρυνση του βήματος, προκαλεί μείωση της Η.Ε.Δ. από E σε $E / \eta\mu(90^\circ \gamma_a/\gamma_\pi)$, το ξανατύλιγμα του κινητήρα πρέπει να συνοδεύεται με μια μικρή αύξηση του αριθμού των αγωγών ανά αυλάκι, δηλαδή από Ξ σε $\Xi / \eta\mu(90^\circ \gamma_a/\gamma_\pi)$.

Τα μάτσα των τυλιγμάτων που αποτελούνται από δυο στρώσεις έχουν τους μισούς αγωγούς εν συγκρίσει με τα τυλίγματα μιας στρώσεως. Η μόνωση ανάμεσα στις δυο στρώσεις είναι κατάλληλη για τη διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ των στρώσεων. Αυτή η διαφορά δυναμικού που δημιουργείται είναι ίση με την διαφορά δυναμικού που εφαρμόζεται στα άκρα της μηχανής, αυτό συμβαίνει αν τα δύο στοιχεία του αυλακιού ανήκουν σε διαφορετικές φάσεις.

Η κατάλληλη σμίκρυνση του βήματος μπορεί να φέρει επίσης μια μικρή μείωση του συντελεστή γεμίματος του αυλακιού, συγκριτικά με τα τυλίγματα μια στρώσεως. Ακόμα μικραίνει και το μήκος της μέσης σπείρας, έχοντας έτσι λιγότερες απώλειες χαλκού και κατά συνέπεια καλύτερη απόδοση στο κινητήρα. Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα όμως στη σμίκρυνση του βήματος είναι η δημιουργία πιο ομοιόμορφων πεδίων, μηδενίζοντας με αυτό τον τρόπο μερικές αρμονικές.

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των τυλιγμάτων με σμικρυμένο βήμα :

- 1) Καλύτερευση καμπύλης της Η.Ε.Δ. με μηδενισμό ή αποφυγή μερικών αρμονικών.
- 2) Δυνατότητα υιοθέτησης ενός κλασματικού αριθμού αυλακιών ανά πόλο και φάση.
- 3) Η σμίκρυνση των κεφαλών των μάτσων επιτρέπει μια μικρή οικονομία στο χαλκό, ειδικά για τυλίγματα με δυο πόλους.
- 4) Μείωση του συντελεστή του τυλίγματος και χειροτέρευση της χρησιμοποιήσεως του τυλίγματος, με επακόλουθο την αύξηση των αγωγών με την ίδια εφαρμοζόμενη τάση και ροή για κάθε πόλο, τόσο μεγάλη όσο πιο μεγάλος είναι ο συντελεστής της σμικρύνσεως.
- 5) Πιο χαμηλό συντελεστή γεμίματος αυλακιών, γιατί τα 2 στοιχεία του ίδιου αυλακιού αποτελούνται από διαφορετικές φάσεις και γι'αυτό η μόνωση πρέπει να είναι κατάλληλη για την τάση τροφοδοτήσεως.
- 6) Η σμίκρυνση του βήματος μεγάλης εντάσεως υιοθετείται στους διπολικούς κινητήρες.

3.9 Συντελεστής τυλίγματος, συντελεστής βήματος.

Ο συντελεστής τυλίγματος K_T δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$K_T = \frac{\eta\mu\left(q\frac{a}{2}\right)}{q\eta\mu\left(\frac{a}{2}\right)}$$

Όπου:

a είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών αυλακιών σε ηλεκτρικές μοίρες. (βλέπε σχήμα 3.5 και σχήμα 3.6).

q στα τριφασικά τυλίγματα είναι ο αριθμός των αυλακιών ανά πόλο και φάση και στα μονοφασικά τυλίγματα είναι ο αριθμός των αυλακιών ανά πόλο που καταλαμβάνει το τύλιγμα εργασίας.

Στα τυλίγματα που έχουν βήμα κλασματικό ο συντελεστής του τυλίγματος υπολογίζεται από το γινόμενο των δύο παρακάτω συντελεστών.

$$K_T = K_K K_B$$

όπου:

K_K είναι ο συντελεστής κατανομής

K_B είναι ο συντελεστής βήματος

Τυλίγματα που έχουν βήμα ακέραιο ο συντελεστής βήματος K_B ισούται με τη μονάδα, επομένως ο συντελεστής τυλίγματος K_T προκύπτει ότι είναι ίσος με το συντελεστή κατανομής K_K , ($K_T=K_K$). Ακόμα ο συντελεστής K_T είναι πάντα μικρότερος του συντελεστή κατανομής K_K στα τυλίγματα με κλασματικό βήμα.

Τα τυλίγματα με βήμα ακέραιο ονομάζονται και τυλίγματα με βήμα διαμετρικό, επειδή η απόσταση μεταξύ των πλευρών των μάτσων είναι 180° ηλεκτρικές μοίρες. Στα τυλίγματα αυτά επειδή οι Η.Ε.Δ. που επάγονται στις δυο πλευρές του μάτσου είναι συμφασικές, η τελική Η.Ε.Δ. που επάγεται σε κάθε μάτσο θα να είναι το αριθμητικό άθροισμα των 2 Η.Ε.Δ. που επάγονται στις 2 πλευρές του ίδιου μάτσου.

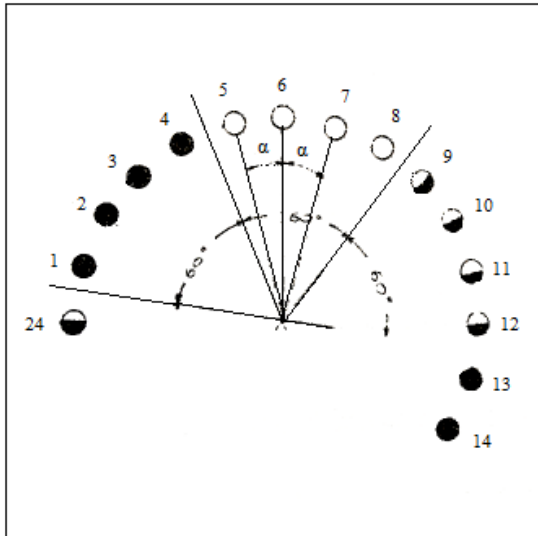
Από την άλλη στα τυλίγματα με σμικρυσμένο βήμα η μεταξύ απόσταση των πλευρών των μάτσων είναι μικρότερη των 180° ηλεκτρικών μοιρών. Άρα η Η.Ε.Δ. που επάγεται σε κάθε μάτσο είναι μικρότερη του αριθμητικού αθροίσματος. Η συγκεκριμένη μείωση εκφράζεται με το συντελεστή του βήματος K_B , ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$K_B = (\text{ΗΕΔ πραγματική ενός μάτσου} / \text{ΗΕΔ ενός μάτσου με βήμα διαμετρικό}).$$

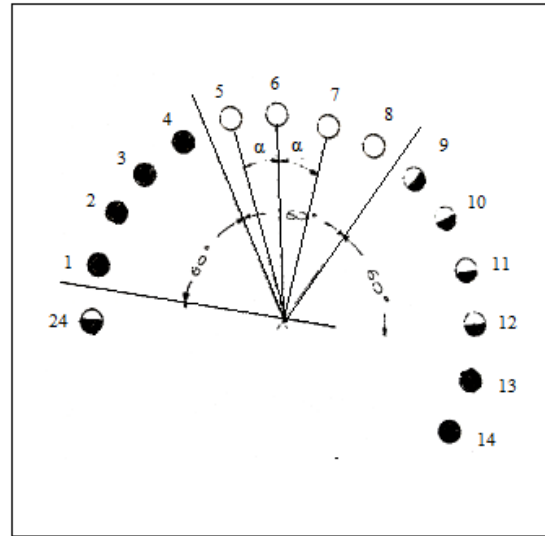
Για το συντελεστή του βήματος ισχύει:

$$K_{\beta} = \sigma \nu \frac{B}{2} = \eta \mu(90^{\circ} \frac{y_a}{y_{\pi}})$$

Το B είναι η γωνία του σμικρυνόμενου βήματος σε ηλεκτρικές μοίρες, και είναι η διαφορά μεταξύ του ακέραιου βήματος $y_{\pi}=180^{\circ}$ που εκφράζεται σε ηλεκτρικές μοίρες και του βήματος του τυλίγματος επίσης εκφρασμένο σε ηλεκτρικές μοίρες ($y_a \cdot a^{\circ}$), οπότε $B=180^{\circ} - y_a \cdot a^{\circ}$.



Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.6.

Στα σχήματα 3.5 και 3.6 φαίνεται η γωνία B του σμικρυνόμενου βήματος.

3.10 Συντελεστής κατανομής.

Ο υπολογισμός του συντελεστή κατανομής K_k με q ακέραιο γίνεται εφαρμόζοντας την γνωστή σχέση του συντελεστή του τυλίγματος :

$$K_k = \frac{\eta \mu(q \frac{a}{2})}{q \eta \mu(\frac{a}{2})}$$

όπου:

a είναι η ηλεκτρική γωνία που σχηματίζουν δυο διαδοχικά αυλάκια γωνία ηλεκτρική = γωνία γεωμετρική \times ζεύξη πόλων. Για τη γωνία a ισχύει:

$$a = P \left(\frac{360^{\circ}}{na} \right) = 2D \left(\frac{180^{\circ}}{na} \right) = \frac{180^{\circ}}{\frac{na}{2p}} = \frac{180^{\circ}}{3q}$$

Αν αντικατασταθεί το $a/2$ με τη σχέση $90^\circ / 3q$, τότε πια η σχέση του συντελεστή κατανομής παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$K_k = \frac{\eta\mu q \left(\frac{90^\circ}{3q} \right)}{q\eta\mu \left(\frac{90^\circ}{3q} \right)} = \frac{\eta\mu 30^\circ}{q\eta\mu \left(\frac{90^\circ}{3q} \right)} = \frac{0,5}{q\eta\mu \left(\frac{90^\circ}{3q} \right)}$$

3.11 Συντελεστής του μικρυμένου βήματος

Ο συντελεστής του μικρυμένου βήματος (γ_a / γ_π) δίνεται από την σχέση που συνδέει το βήμα του τυλίγματος με το ακέραιο (ή πολικό) βήμα .

Κεφάλαιο 4 : Μονοφασικά τυλίγματα.

4.1 Τύποι μονοφασικών τυλιγμάτων

Στους μονοφασικούς κινητήρες υπάρχουν 3 συστήματα τυλίγματος :

- 1) ομόκεντρο
- 2) βροχοειδές, συνήθως ονομάζεται «στεφάνης».
- 3) κυματοειδές.

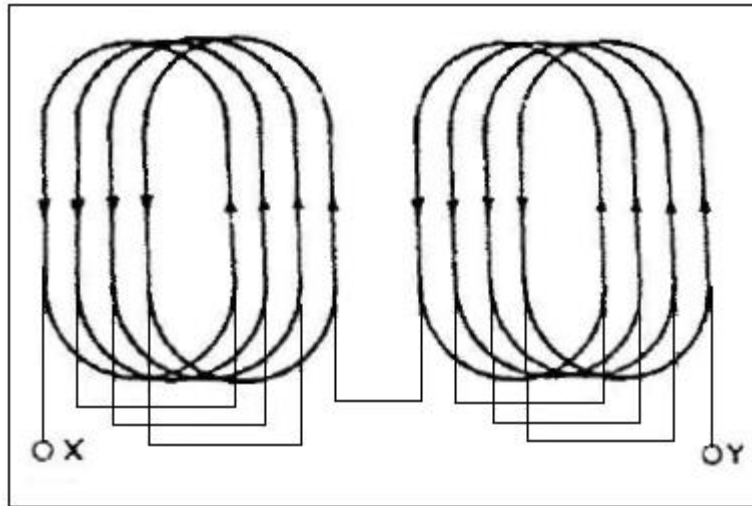
Τα 3 συστήματα τυλίγματος μπορούν διακριθούν σε δύο τύπους:

- α) με πόλους ομώνυμους ή τύπος Α
- β) με πόλους εναλλάξ ή τύπος Β

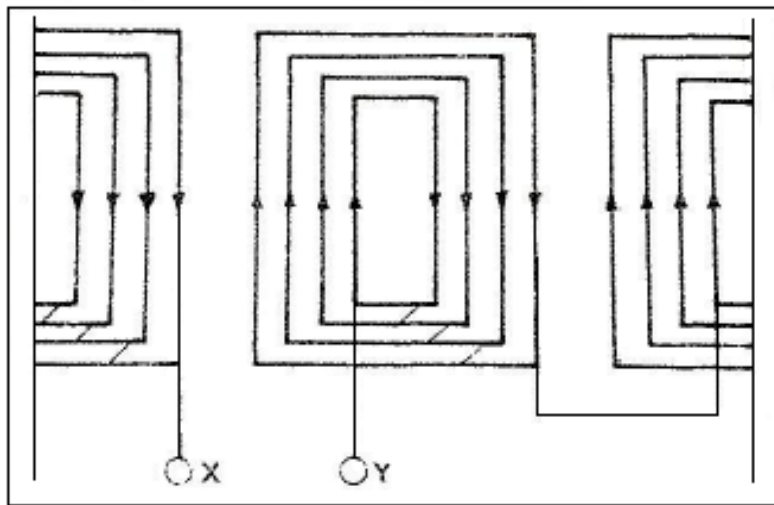
Τύπου Α είναι το τύλιγμα που ο αριθμός των συγκροτημάτων από μάτσα είναι ίσος με τον αριθμό των πόλων.

Οι αγωγοί μιας ζώνης, δηλαδή οι αγωγοί που αντιστοιχούν σε ένα πόλο των ομόκεντρων και βροχοειδών τυλιγμάτων με πόλους ομώνυμους, συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά με αγωγούς αντιδιαμετρικής ζώνης. Πιο συγκεκριμένα σε αυτά τα τυλίγματα ο 1^{ος} αγωγός ενός συγκροτήματος συνδέεται με τον 1^ο αγωγό ενός άλλου συγκροτήματος και στη συνέχεια με το 2^ο αγωγό του 2^{ου} συγκροτήματος κ.ο.κ, (Σχήμα 4.1), στα ομόκεντρα όμως ο 1^{ος} αγωγός συνδέεται με τον τελευταίο και ο 2^{ος} συνδέεται με τον προτελευταίο κ.ο.κ (Σχήμα 4.2).

Τα δύο συστήματα των τυλιγμάτων είναι ηλεκτρικά ισοδύναμα. Διαφέρουν όμως στον τρόπο μετωπικών συνδέσεων μεταξύ των ενεργών αγωγών.

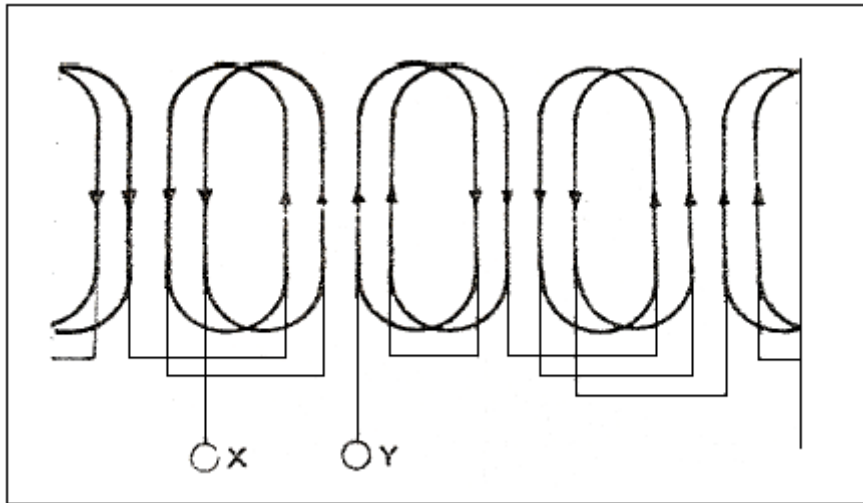


Σχήμα 4.1 Τα δύο συγκροτήματα από μάτσα είναι συνδεδεμένα σε σειρά αλλά θα μπορούσαν να συνδεθούν και παράλληλα.

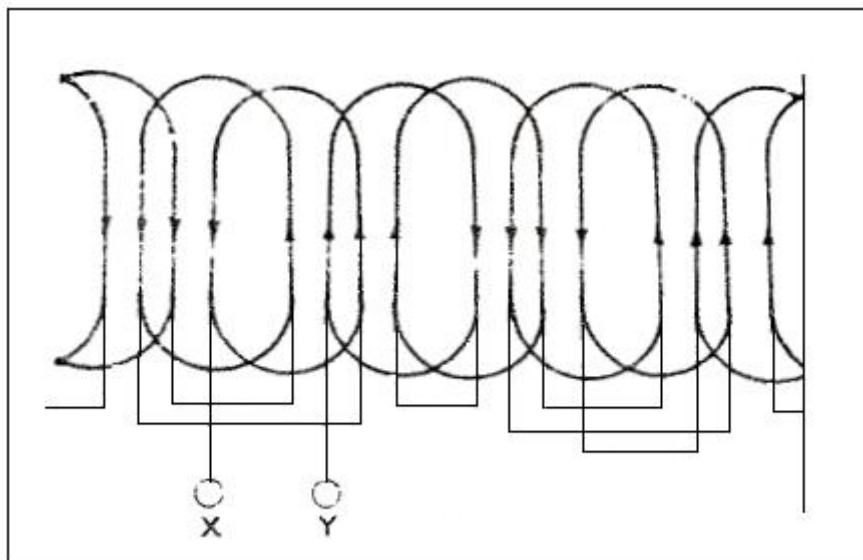


Σχήμα 4.2 Οι δύο τύποι των τυλιγμάτων, δηλαδή τα τυλίγματα με πόλους ομώνυμους και τα τυλίγματα με πόλους εναλλάξ είναι ηλεκτρικά ισοδύναμα.

Στα Σχήματα 4.3 και 4.4 φαίνονται τυλίγματα βροχοειδοί με πόλους εναλλάξ.

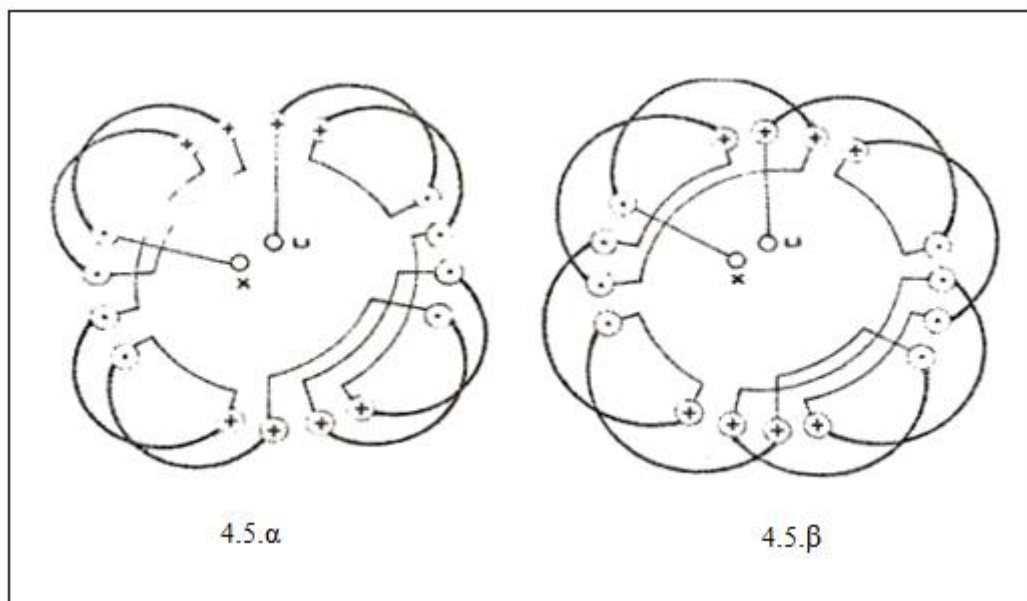


Σχήμα 4.3.

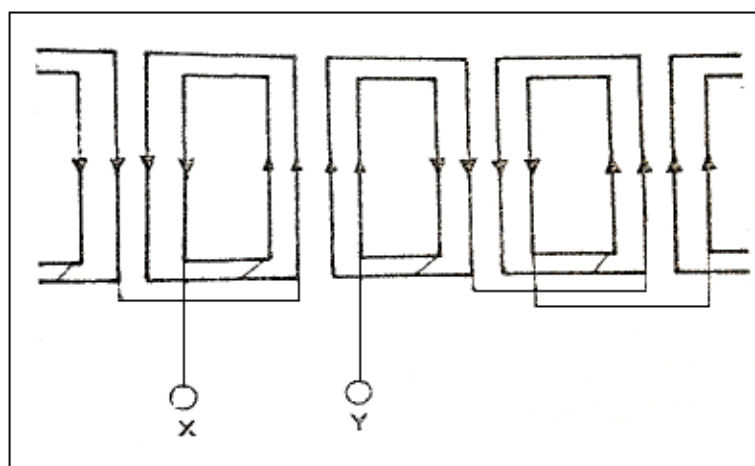


Σχήμα 4.4.

Στα Σχήματα 4.3 και 4.4 φαίνεται ότι τα συγκροτήματα των τυλιγμάτων που έχουν πόλους εναλλάξ διαρρέονται με ρεύματα που έχουν φορά αντίθετη και εναλλάξ, ενώ τα τυλίγματα που έχουν πόλους ομώνυμους θα διαρρέονται από ρεύματα που έχουν την ίδια φορά.



Στα Σχήματα 4.5.α. και 4.5.β. φαίνεται η κυκλική μορφή των τυλιγμάτων για το Σχήμα 4.3 και Σχήμα 4.4 αντίστοιχα .



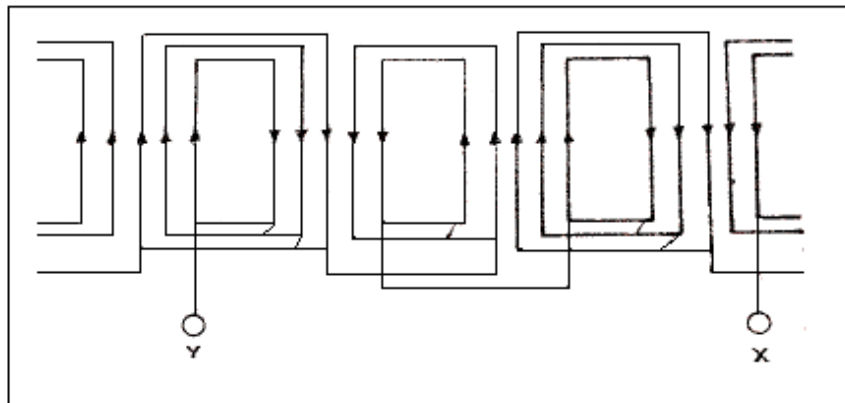
Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται ένα τύλιγμα ομόκεντρο με πόλους εναλλάξ.

Από τα προηγούμενα σχήματα προκύπτει :

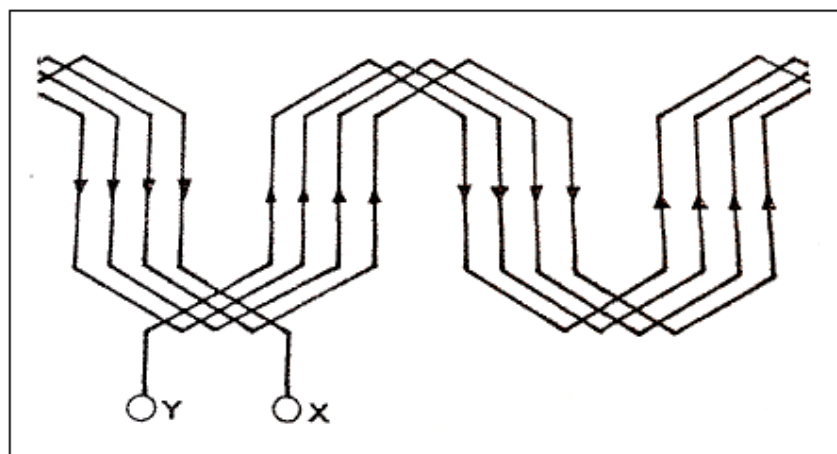
α) τα μάτσα των βροχοειδών τυλιγμάτων έχουν το ίδιο βήμα

β) κάθε συγκρότημα των ομόκεντρων τυλιγμάτων αποτελείται από μάτσα με διαφορετικό βήμα .

Όταν ο αριθμός των αυλακιών ανά πόλο είναι μονός το τύλιγμα με πόλους εναλλάξ αποτελείται από σύνθετα συγκροτήματα εναλλάξ με διαφορετικό αριθμό μάτσων. Βλέπε Σχήμα 4.7



Σχήμα 4.7. Τύλιγμα με πόλους εναλλάξ.



Σχήμα 4.8. Κυματοειδές τύλιγμα με πόλους ομώνυμους.

Στο κυματοειδές τύλιγμα με πόλους ομώνυμους η σύνδεση των αγωγών γίνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8.

4.2 Συστήματα συνδέσεων

Τα συγκροτήματα από μάτσα μπορούν να συνδεθούν:

- 1) σειρά
- 2) παράλληλα
- 3) μεικτά (σειρά – παράλληλα).

Ο τύπος της συνδέσεως εξαρτάται από την τάση που παράγουν οι γεννήτριες ή από την τάση τροφοδοτήσεως των κινητήρων.

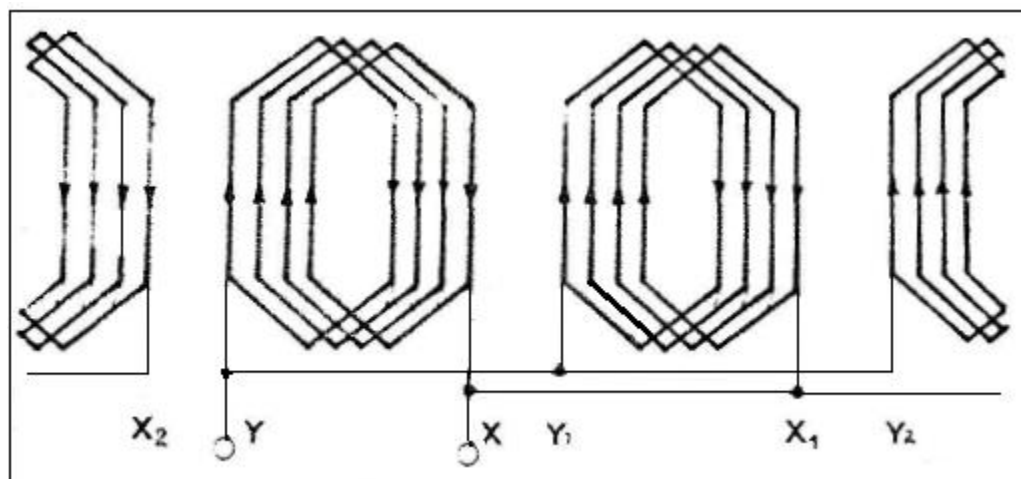
4.2.1 Σύνδεση σε σειρά

Όλα τα συγκροτήματα από μάτσα μπορούν να συνδεθούν σε σειρά. Κατά συνέπεια θα διαρρέονται από το ολικό ρεύμα της μηχανής.

Σπουδαία παρατήρηση: Τα μάτσα κάθε συγκροτήματος συνδέονται πάντα σε σειρά μεταξύ τους.

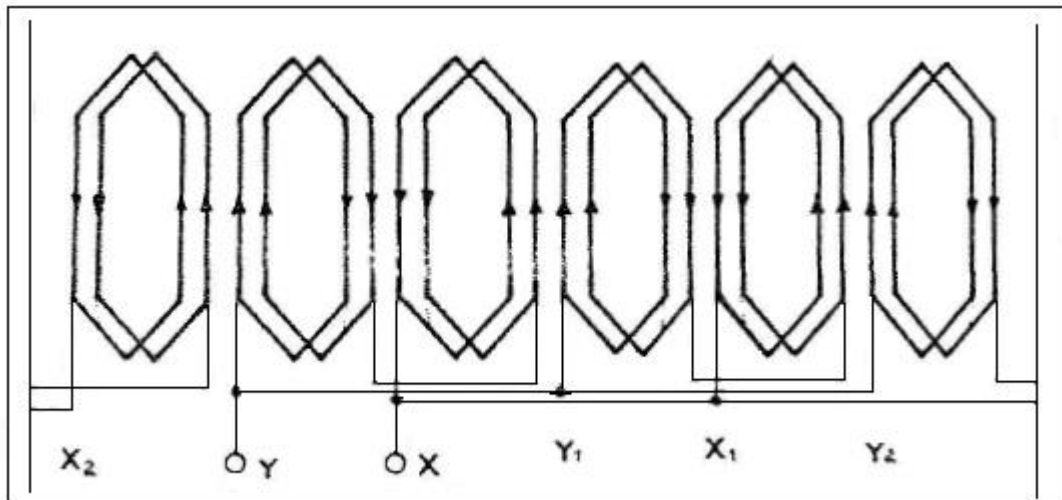
4.2.2 Σύνδεση παράλληλη

Στα τυλίγματα με πόλους ομώνυμους οι αρχές όλων των συγκροτημάτων συνδέονται μεταξύ τους καθώς επίσης και τα πέρατα όπως φαίνεται στο σχήμα 4.9



Σχήμα 4.9 Παράλληλη σύνδεση στα τυλίγματα με πόλους ομώνυμους.

Στα τυλίγματα με πόλους εναλλάξ συνδέονται σε σειρά δυο-δύο συγκροτήματα διαδοχικά και μετά κάθε ζεύγος συγκροτημάτων συνδέεται παράλληλα. Βλέπε Σχήμα 4.10



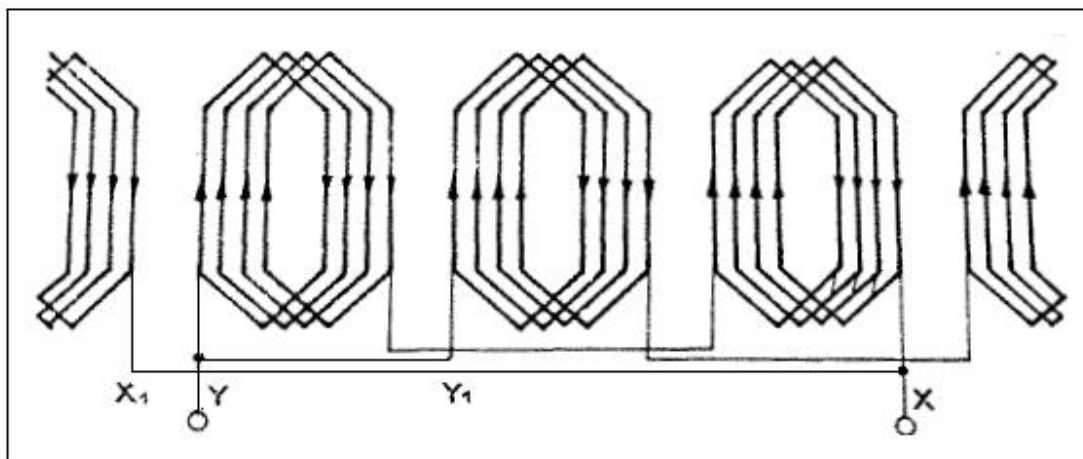
Σχήμα 4.10 Παράλληλη σύνδεση στα τυλίγματα με πόλους εναλλάξ.

Αυτό το σύστημα λέγεται παράλληλο εξωτερικό για να το διακρίνουμε από το παράλληλο εσωτερικό.

Σπουδαία παρατήρηση: Για να μπορέσουμε να πραγματοποιήσουμε παράλληλη εσωτερική σύνδεση πρέπει όλα τα συγκροτήματα να είναι αυστηρά ίδια, δηλαδή να έχουν τον ίδιο αριθμό σπειρών.

4.2.3 Σύνδεση μεικτή (σειράς – παράλληλη)

Η σύνδεση των συγκροτημάτων στη μεικτή συνδεσμολογία φαίνεται στο Σχήμα 4.11



Σχήμα 4.11 Μεικτή σύνδεση τυλιγμάτων.

4.3 Συντελεστής κατανομής K_K

Στα μονοφασικά τυλίγματα η έκφραση που δίνει την τιμή του συντελεστή κατανομής είναι η παρακάτω:

$$K_K = \frac{\eta\mu\alpha\left(\frac{90^\circ}{Q}\right)}{\alpha\eta\mu\left(\frac{90^\circ}{Q}\right)}$$

Όπου q = αριθμός αυλακιών που καταλαμβάνει το κύριο τυλίγμα ανά πόλο.

Q = αριθμός αυλακιών ανά πόλο.

Για μονοφασικά τυλίγματα που είναι κατανεμημένα στο 1/2 του πολικού βήματος ο συντελεστής κατανομής προκύπτει:

q	2	3	5	∞
K_K	0,924	0,910	0,904	0,901

Πίνακας 4.1 Συντελεστής κατανομής μονοφασικών τυλιγμάτων κατανεμημένα στο 1/2 του πολικού βήματος.

Συνήθως όμως το κύριο τυλίγμα των μονοφασικών κινητήρων είναι κατανεμημένο στα 2/3 του πολικού βήματος $q=(2/3) Q$ και σε αυτή την περίπτωση η σχέση που δίνει το συντελεστή κατανομής είναι:

$$K_K = \frac{0.866}{\alpha\eta\mu\left(\frac{90^\circ}{Q}\right)}$$

Το βοηθητικό τυλίγμα είναι κατανεμημένο συνήθως στο 1/3 του πολικού βήματος.

q	1	2	3	4	5	6-∞
K_K	1,00	0,966	0,960	0,958	0,956	0,956 - 0,955

Πίνακας 4.2 Συντελεστής κατανομής βοηθητικού τυλιγματος κατανεμημένο στο 1/3 του πολικού βήματος.

Οι τιμές του συντελεστή κατανομής K_K των μονοφασικών τυλιγμάτων που χρησιμοποιούνται περισσότερο φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Q	5	6	7	8	9	12	15	30
q	4	5	5	6	6	8	10	20
K_K	0,836	0,746	0,810	0,794	0,831	0,829	0,828	0,827

Πίνακας 4.3 Συντελεστής κατανομής μονοφασικών τυλιγμάτων που χρησιμοποιούνται περισσότερο

Κεφάλαιο 5: Μόνωση περιελίξεων.

5.1 Εισαγωγή.

Στις περιελίξεις των κινητήρων χρησιμοποιούνται μονωτικά υλικά που έχουν μηχανική, θερμική και διηλεκτρική αντοχή. Η μηχανική αντοχή είναι απαραίτητη για τις αντίστοιχες φορτίσεις στην κατασκευή της περιέλιξης, αλλά και σε περίπτωση κάποιου βραχυκυκλώματος, τα μεγάλα ρεύματα που υπάρχουν δημιουργούν μεγάλες δυνάμεις μεταξύ των αγωγών, ικανές να παραμορφώσουν και να καταστρέψουν κεφαλές κυρίως των περιελίξεων. Η θερμική αντοχή στα μονωτικά υλικά απαιτείται για την λειτουργία του κινητήρα, ενώ η διηλεκτρική αντοχή είναι απαραίτητη για δοκιμές στην περιέλιξη αλλά και για την λειτουργία της μηχανής. Επίσης, η μόνωση της περιέλιξης εκτός από διηλεκτρική αντοχή πρέπει να έχει και μεγάλη ωμική αντίσταση. Τέλος, τα μονωτικά πρέπει να είναι όσο τον δυνατόν γίνεται υγροσκοπικά και σε πολλές περιπτώσεις να αντέχουν σε λάδια.

Στον πίνακα 5.1. δίνονται οι επιτρεπόμενες τιμές της θερμοκρασίας για περιελίξεις μηχανών με ισχύ μικρότερη των 5000 kW.

Ξεπερνώντας την μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία ενός μονωτικού υλικού το μονωτικό αρχίζει να αλλοιώνεται.

Οι προδιαγραφές του μονωτικού υλικού προσδιορίζουν την επιτρεπτή ανύψωση θερμοκρασίας που δίνεται επίσης στο παρακάτω πίνακα. Η διαφορά της θερμοκρασίας ενός σημείου του τυλίγματος έναντι της θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου ορίζεται ως ανύψωση θερμοκρασίας σημείου. Η ανύψωση της θερμοκρασίας της περιέλιξης συνήθως βρίσκεται με τη μέθοδο της αντιστάσεως.

Κλάση μόνωσης	θ_{max} °C	$\Delta\theta_{max}$ (K)	$\Delta\theta_{max}$ (K)
A	105	65	60
E	120	80	75
B	130	90	80
F	155	115	100
H	180	140	125
I C άνω των	180		-

Πίνακας 5.1. Μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία μονωτικών υλικών .

Όπου : θ_{max} =Μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία.

$\Delta\theta_{max}$ = Μέγιστη επιτρεπτή ανύψωση θερμοκρασίας στο θερμότερο σημείο.

$\Delta\theta_{max}$ = Μέγιστη επιτρεπτή ανύψωση θερμοκρασίας με τη μέθοδο της αντίστασης.

Η θέρμανση επηρεάζει πολύ τη διάρκεια ζωής μια περιέλιξης. Τα σύγχρονα μονωτικά υλικά μπορεί να έχουν αυξήσει κατά πολύ τη διάρκεια ζωής τους, παρόλα αυτά όμως η μόνωση μαζί με την έδραση του άξονα είναι ακόμα το αδύνατο σημείο των ηλεκτρικών μηχανών.

5.2 Μονωτικά υλικά.

Τα κυριότερα μονωτικά υλικά που αποτελούνται από φυσικές και τεχνητές ύλες, οργανικές και ανόργανες παρουσιάζονται παρακάτω:

α) Η μαρμαρυγή (μίκια)

Έχει καλή θερμική, διηλεκτρική και χημική αντοχή. Από την επεξεργασία της προκύπτουν τα λεπτά λαμπυρίζοντα φύλλα-λέπια της μαρμαρυγής. Από τα φύλλα της μαρμαρυγής χρησιμοποιώντας συνδετικά υλικά παράγεται ο μηχανίτης σε μορφή πλάκας αλλά και το εύκαμπτο μικαφόλιο με φορέα από χαρτί ή ύφασμα από μετάξι ή υαλοβάμβακα.

Συνδετικά υλικά είναι φυσικές και τεχνητές ρητίνες.

β) Ο αμίαντος

Η θερμική αντοχή του αμιάντου είναι επίσης πολύ καλή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αλεσμένος και αναμειγμένος με τεχνητές ρητίνες ως υλικό πλήρωσης κενών χώρων σε περιελίξεις

γ) Το πρεσπάν

Το πρεσπάν παράγεται έχοντας μορφή πλακών ή ρολών από χαρτόνι αρίστης ποιότητας υπό μεγάλη πίεση. Βρίσκει εφαρμογή στους μετασχηματιστές και στις ηλεκτρικές μηχανές (μονωτικά αυλακιών και κεφαλών). Έχει καλή μηχανική, θερμική και ηλεκτρική αντοχή, αλλά είναι και πολύ υγροσκοπικό. Αυτό το μειονέκτημα μπορεί να αντιμετωπιστεί σε κάποιο ικανοποιητικό βαθμό, όχι όμως και τέλεια, εμποτίζοντάς το με βερνίκι.

δ) Τα ινώδη υλικά.

Τα ινώδη υλικά είναι το βαμβάκι, το λινό, το φυσικό και τεχνητό μετάξι. Τα συγκεκριμένα υλικά επειδή υγροσκοπικά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μονωτικά. Μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν ως φορείς διαφόρων βερνικιών.

ε) Ο υαλοβάμβακας.

Ο υαλοβάμβακας είναι γυαλί σε ινώδη μορφή, με πολύ καλές θερμικές αλλά και μέτριες μονωτικές ιδιότητες.

Με εύκαμπτες ίνες πάχους 4 έως 10 μm από υαλοβάμβακα υφαινούνται τα υφάσματα τα οποία είναι ο σημαντικότερος φορέας των σύγχρονων μονωτικών υλικών.

ζ) Τα ασφαλτικά υλικά.

Οι χημικές και διηλεκτρικές ιδιότητες τους είναι καλές, ενώ είναι και υγροσκοπικά. Τα ασφαλτικά υλικά όμως τα έχουν αντικαταστήσει ρητίνες επειδή έχουν καλύτερη θερμική και μηχανική αντοχή.

η) Οι φυσικές και τεχνητές ρητίνες.

Οι φυσικές αλλά κυρίως οι τεχνητές ρητίνες έχουν πολύ καλές μηχανικές θερμικές και μονωτικές ιδιότητες. Οι φυσικές ρητίνες που προέρχονται από τα βελονοειδή δένδρα έχουν αντικατασταθεί από τις τεχνητές ρητίνες (φαινολική ρητίνη, ακόρεστη πολυεστερική ρητίνη και κυρίως εποξειδική ρητίνη και σιλικόνες). Οι τεχνητές ρητίνες αποτέλεσαν επανάσταση στην τεχνολογία των μονωτικών υλικών, κυρίως στην περιέλιξη υψηλής τάσης.

θ) Τα πλαστικά φύλλα .

Είναι κατασκευασμένα από πολυαιθυλένιο-τερεφθάλιο με εμπορικά ονόματα Hostaphan. Mylar κ.λ.π. Οι μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες τους είναι πολύ καλές, και έχουν επίσης ανθεκτικότητα σε βακτηρίδια, υγρασία, θαλασσινό νερό και σε δύσκολες κλιματικές συνθήκες.

ι) Τα βερνίκια

Τα σημερινά βερνίκια παράγονται από τεχνητές ρητίνες και όχι από λάδια όπως πιο παλιά. Τα κυριότερα βερνίκια είναι αυτά από βακελίτη, φενολικής, αλκυδικής, μελανινικής, πολυεστερικής, εποξειδικής ρητίνης και ρητίνης σιλικόνης και πολυουρεθάνης. Αυτά που χρησιμοποιούνται περισσότερο στον εμποτισμό περιελίξεων είναι τα πολυεστερικά και τα εποξειδικά.

Τα βερνίκια εμπλουτίζουν την περιέλιξη με ένα φιλμ, γεμίζοντας κενούς χώρους που μπορεί να υπάρχουν μέσα σε αυλάκια και κεφαλές της περιέλιξης. Πρέπει να έχουν φυσικά πολύ καλές μηχανικές, θερμικές και μονωτικές ιδιότητες και επίσης να μην είναι υγροσκοπικά ή διαπερατά από νερό.

Μετά τον εμβαπτισμό της περιέλιξης με βερνίκι, ο κινητήρας στεγνώνει σε ειδικούς φούρνους για ώρες. Όλα τα βερνίκια εμποτισμού είναι θερμοσκληρυνόμενα. Επίσης υπάρχουν και τα βερνίκια αέρα (επιχρίσματα) που ξηραίνονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και χρησιμοποιούνται περισσότερο για επιδιορθώσεις ή για πρόσθετη μόνωση στις κεφαλές των περιελίξεων με επάλειψη.

Ο εμποτισμός της περιέλιξης του στάτη με βερνίκι, είναι πολύ σημαντική και απαραίτητη διαδικασία για την λειτουργία του κινητήρα. Το βερνίκι εκτός από την μόνωση συνεισφέρει επίσης και στην απαγωγή της θερμότητας του κινητήρα. Η θερμοκρασία περιέλιξης στους κινητήρες χαμηλής τάσης μειώνεται λόγω του εμποτισμού με βερνίκι κατά 5 K περίπου.

ια) Τα μονωτικά περισσότερων στρώσεων (sandwich).

Τα συγκεκριμένα κατασκευάζονται από μονωτικά υλικά με διαφορετικές ιδιότητες συνδυάζοντας τις καλύτερες από κάθε υλικό. Για παράδειγμα ένα λεπτό πρεσπάν είναι μηχανικά πιο ευαίσθητο από το Hostaphan αλλά έχει μεγαλύτερη θερμική αντοχή, επιπλέον το πρεσπάν απορροφά το βερνίκι ενώ το Hostaphan όχι. Αποτελούνται από δυο στρώσεις πρεσπάν κολλημένα πάνω σε Hostaphan ή ακόμα καλύτερα από τρεις στρώσεις Presspan- Hostaphan- Presspan σε ποικίλες παραλλαγές. Είναι τα σύγχρονα μονωτικά αυλακίων και διαχωριστικά μονωτικά κεφαλών των περιελίξεων.

ιβ) Οι μονωτικές ταινίες .

Είναι κατασκευασμένες από ύφασμα υαλοβάμβακα εμποτισμένο ή όχι, βρίσκουν εφαρμογή στο δέσιμο και στήριξη των κεφαλών των περιελίξεων.

5.3 Ιδιότητες μονωτικών υλικών.

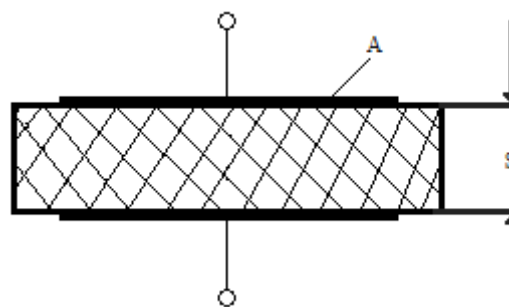
Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι ιδιότητες που πρέπει να έχουν τα μονωτικά υλικά ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς να παράγουν προβλήματα κατά την λειτουργία της μηχανής:

1. Πρέπει να έχουν μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση ή μικρή αγωγιμότητα.
2. Να έχουν μεγάλη διηλεκτρική αντοχή, για να μπορούν να αντιστέκονται στη διέλευση του ρεύματος μέσα από την ύλη τους, στις υψηλές αλλά και στις χαμηλές τάσεις.
3. Να παρουσιάζουν ομοιογένεια υλικού, δηλαδή να μην υπάρχουν φυσαλίδες αέρος ή υγρασίας μέσα στη μάζα των μονωτικών υλικών
4. Να έχουν μεγάλη μηχανική και θερμική αντοχή, για να μην σπάζουν εύκολα αλλά και για να αντιστέκονται στις ανυψώσεις της θερμοκρασίας και στις καιρικές μεταβολές.
5. Να μην είναι υγροσκοπικά, δηλαδή να μην απορροφούν υγρασία, η οποία θα είχε σαν αποτέλεσμα να φουσκώνουν τα μονωτικά υλικά και να μειώνεται με αυτό τον τρόπο η μονωτική τους ικανότητα.
6. Να μην προσβάλλονται από έλαια, σκόνη, οξέα και διαβρωτικούς ατμούς.

7. Να καταλαμβάνουν όσο το δυνατόν μικρότερο χώρο.
8. Να μην παρουσιάζουν μεγάλη απώλεια ισχύος ή να απορροφούν μικρή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή της θερμότητας.

5.4 Διηλεκτρική σταθερά και αντοχή ενός υλικού.

Ο πυκνωτής είναι ένα στοιχείο το οποίο αποτελείται από δυο αγωγικές πλάκες (οπλισμοί) που διαχωρίζονται από ένα μονωτικό υλικό (διηλεκτρικό). Όταν εφαρμόζεται τάση στους οπλισμούς, σχηματίζονται δυναμικές γραμμές ηλεκτρικού πεδίου στο διηλεκτρικό που υπάρχει ανάμεσα στους οπλισμούς. Η ηλεκτρική ροή που θα αναπτυχτεί είναι το μέτρο της χωρητικότητας που σχηματίζεται από τους οπλισμούς και το διηλεκτρικό. Στο σχήμα 5.1 φαίνεται ένα χωρητικό στοιχείο.



Σχήμα 5.1. Χωρητικό στοιχείο.

Όπου :

A= Περιοχή οπλισμών

S= Πάχος διηλεκτρικού

Όταν σε ένα πυκνωτή με διηλεκτρικό υλικό τον αέρα εφαρμοστεί τάση, τότε στις δυο πλάκες του πυκνωτή θα συγκεντρωθούν ίσα και αντίθετα ηλεκτρικά φορτία Q_a . Αν όμως στον ίδιο πυκνωτή κρατώντας την ίδια πηγή τάσης, αντικαταστήσουμε τον αέρα με κάποιο άλλο διηλεκτρικό υλικό, θα δούμε ότι το πεδίο μεταξύ των δυο οπλισμών δυναμώνει. Άρα αντικαθιστώντας τον αέρα με κάποιο άλλο διηλεκτρικό υλικό, συγκεντρώνονται ακόμα περισσότερα ίσα και αντίθετα φορτία Q_δ στις δυο πλάκες του πυκνωτή.

Ο λόγος Q_δ / Q_a μας δίνει την χαρακτηριστική σταθερά για κάθε μονωτικό υλικό η οποία ονομάζεται διηλεκτρική σταθερά και συμβολίζεται με το γράμμα ϵ .

Έτσι έχουμε :

$$\epsilon = \frac{\text{φορτίο } Q_\delta}{\text{φορτίο } Q_a}$$

Όταν τα διηλεκτρικά υλικά χρησιμοποιούνται σαν μονωτικά πρέπει να τηρούνται κάποιες απαιτήσεις για την ομαλή λειτουργία τους, όπως η μέγιστη τάση που μπορούν να αντέξουν. Από τη τάση παράγονται απώλειες στη διηλεκτρική δύναμη του μονωτικού και από την ηλεκτρική πίεση προκαλείται ανεπάρκεια στη κατάπτωση της τάσης και τη δίοδο του ρεύματος. Στα στερεά υλικά προκαλείται μια μόνιμη απώλεια ισχύος ενώ στα υγρά ή αέρια προκαλείται μόνο προσωρινή απώλεια ισχύος.

Ηλεκτρική εκκένωση λέγεται η εκφόρτιση που γίνεται μεταξύ δυο ηλεκτροδίων σε ένα αέριο ή υγρό ή πάνω από μια στερεά επιφάνεια στον αέρα. Η εκφόρτιση όμως που γίνεται μέσω ενός στερεού μονωτικού λέγεται διάτρηση.

Η διηλεκτρική αντοχή του υλικού είναι η μεγαλύτερη τάση που μπορεί να εφαρμοσθεί σε κάποιο διηλεκτρικό, χωρίς να γίνει διάτρηση υπό την μορφή ηλεκτρικού σπινθήρα. Τάση διασπάσεως είναι η μέγιστη τάση που θα προκαλέσει διάτρηση στο υλικό.

Αυτές οι δυο έννοιες βλέπουμε λοιπόν ότι είναι απαραίτητο να τηρούνται για την χρήση κάποιου υλικού ως διηλεκτρικό. Το είδος της εφαρμογής καθορίζει τις αντίστοιχες ιδιότητες στις οποίες πρέπει να ανταπεξέλθει το διηλεκτρικό έτσι ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις λειτουργίας της εφαρμογής. Στο επόμενο πινάκα δίνονται η διηλεκτρική σταθερά και αντοχή διαφόρων υλικών.

Υλικό	Διηλεκτρική σταθερά ϵ	Διηλεκτρική αντοχή K (Kv/mm)
Αέρας	1	2.14
Φίμπερ	4 - 6	7
Χαρτί	2 - 2.5	4
Παραφίνη	2 - 2.6	16
Καουτσούκ	2 - 3.5	10
Ξύλο	2 - 7.7	7
Μίκα	2.5 - 4.9	60
Βακελίτης	4.5 - 7.5	10
Γυαλί	5.1 - 9.9	10 - 20
Πορσελάνη	5.7 - 6.8	9 - 15
Μάρμαρο	6.15	2
Λάδι	2.2- 2.5	20
Εβονίτης	2 - 3	30
Χαλαζίας	3.7	40 - 80
Σέλλακ	2.7 - 3.7	35

Πίνακας 5.2. Διηλεκτρική σταθερά και αντοχή διαφόρων υλικών.

5.5 Αγωγοί τυλιγμάτων.

Στους ηλεκτρικούς κινητήρες η περιέλιξη των τυλιγμάτων τους πραγματοποιείται με αγωγούς κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής ή με γυμνή ορθογωνική μπάρα από χαλκό

Στις μηχανές μικρής ισχύος χρησιμοποιούνται κυρίως αγωγοί κυκλικής διατομής. Ενώ με τους αγωγούς ορθογωνικής διατομής επιταχύνεται καλύτερα ο συντελεστής εκμετάλλευσης χώρου και δημιουργούνται τυλίγματα μεγαλύτερης μηχανικής ισχύος.

Τα μεγέθη των αγωγών περιελίξεων χαρακτηρίζονται από το ευρωπαϊκό σύστημα, από τη διάμετρο του αγωγού σε δέκατα του χιλιοστού π.χ. : $14/10 = 1.4 \text{ mm}$. ενώ κατά το αμερικάνικο σύστημα A.W.G (American Wire Gage), από αριθμούς οι οποίοι μεταβάλλονται αντιστρόφως προς το μέγεθος του αγωγού δηλαδή ο μεγάλος αριθμός δείχνει αγωγό μικρού μεγέθους. Στον πίνακα 5.4. δίνονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των χάλκινων αγωγών περιέλιξης κυκλικής διατομής.

α) Είδη μονώσεων αγωγών περιελίξεων.

Η μόνωση που έχουν οι αγωγοί των περιελίξεων είναι μια στρώση βερνικιού εμαγιέ με ένα απλό βαμβακερό περίβλημα στις μηχανές μικρής ισχύος και ένα διπλό στις μηχανές μεγαλύτερης ισχύος. Οι μπάρες τυλίγονται με βαμβακερή ταινία πάχους 0.125 έως 0.175mm. Η μόνωση με απλή μεταξωτή ταινία χρησιμοποιείται στις μικρές μηχανές και στα σύρματα διαμέτρου μέχρι 15/10 του χιλιοστού.

β) Επιτρεπόμενη ένταση ενός αγωγού.

Η επιτρεπόμενη ένταση σχετίζεται με το μεγαλύτερο ρεύμα που μπορεί να διαρρέει συνεχώς ένα αγωγό χωρίς να καταστρέφεται όμως η μόνωση του. Η θερμική αντοχή της μόνωσης επηρεάζει την επιτρεπόμενη ένταση του αγωγού, δηλαδή αγωγός με μόνωση που αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες έχει επίσης μεγάλη επιτρεπόμενη ένταση.

γ) Συντελεστής θερμοκρασίας.

Είναι γνωστό ότι η αύξηση της θερμοκρασίας ενός αγωγού προκαλεί αύξηση της αντίστασης του. Ο συντελεστής θερμοκρασίας είναι αυτός ο αριθμός που φανερώνει πόσο αυξάνεται μια αντίσταση με τιμή 1 Ohm την στιγμή που αυξηθεί η θερμοκρασία της κατά 1°C. Οι τιμή που παίρνει ο συντελεστής θερμοκρασίας των υλικών είναι θετικός αριθμός εκτός του άνθρακα, του γυαλιού, των ηλεκτρολυτών και των μονωτικών υλικών. Στον πίνακα 5.3 παρουσιάζονται η ειδική αντίσταση και ο συντελεστής θερμοκρασίας αγωγών που χρησιμοποιούνται περισσότερο στις ηλεκτρικές μηχανές.

Η σχέση που συνδέει την αντίσταση ενός αγωγού με την αύξηση της θερμοκρασίας του έχει την παρακάτω μορφή :

$$R_{\theta} = R_0(1 + \alpha\theta)$$

Όπου α είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας του αγωγού, θ είναι η θερμοκρασία του και R_0 είναι η τιμή της αντίστασης του αγωγού στους 0°C .

Δηλαδή αυτή τη σχέση μπορεί να μας δώσει την τιμή της αντίστασης ενός αγωγού για παράδειγμα στους 8°C , αν γνωρίζουμε την ειδική R_0 του αγωγού και τον συντελεστή θερμοκρασίας του α .

Είδος αγωγού	Ειδική Αντίσταση Στους 0°C	Συντελεστής Θερμοκρασίας
Άργυρος	0.015	0.004
Χαλκός(σκληρός)	0.016-0.018	0.0043
Χαλκός(μαλακός)	0.0175	0.004
Αλουμίνιο	0.027	0.0037
Μπρούντζος	0.055	0.025

Πίνακας 5.3 Ειδική αντίσταση και συντελεστής θερμοκρασίας αγωγών.

Διάμετρος χαλκού σε mm	Διατομή χαλκού σε mm ²	Μέγιστη ένταση ρεύματος σε A		Αντίσταση 100 m σε Ωμ	Βάρος 1000 m σε g	Εμαγιέ	Αριθμός σπειρών ανά cm μήκους		Εμαγιέ	Αριθμός σπειρών ανά cm ²		Πλησιέστερη	
		μέχρι 50 W	άνω των 50 W				Βαμβακερό	Μεταξωτό		Βαμβακερό	Μεταξωτό	Αγγλ. S.W.G.	Αμερ. A.W.G.
0,05	0,002	0,003	0,005	9000	19	150	—	83	15000	—	4400	47	44
0,08	0,005	0,008	0,012	3500	48	105	—	66	7000	—	2800	44	40
0,10	0,008	0,012	0,020	2200	74	85	38	58	4800	1000	2250	42	38
0,13	0,013	0,020	0,032	1300	120	65	34	50	2800	800	1650	39	36
0,15	0,018	0,027	0,045	1000	165	55	32	45	2250	720	1400	38	34
0,20	0,031	0,047	0,077	560	290	45	27	37	1400	540	950	35	32
0,25	0,049	0,071	0,120	360	460	36	24	31	900	430	690	33	30
0,30	0,071	0,105	0,175	250	645	30,5	21,5	27	665	350	520	30	28
0,35	0,096	0,145	0,240	180	890	26	18	23,5	500	250	420	28	27
0,40	0,126	0,188	0,310	140	1160	23	16,5	21	390	210	330	27	26
0,45	0,159	0,240	0,400	110	1480	20	15	19	315	180	280	26	25
0,50	0,196	0,294	0,490	89	1830	18,5	14	17	252	160	230	25	24
0,60	0,283	0,425	0,708	63	2630	16	12	14,5	180	116	170	23	22
0,65	0,332	0,500	0,815	52	3000	14,5	11,5	13,5	160	> 106	150	22	21
0,70	0,385	0,575	0,960	46	3430	13,5	10,5	13	140	96	128	22	21
0,75	0,442	0,665	1,100	40	3950	12,5	10	12	120	85	114	21	20
0,80	0,503	0,795	1,325	35	4480	12	9,5	11,5	110	80	104	21	20
0,85	0,567	0,850	1,420	31	5070	11	9,3	10,5	100	73	94	20	19
0,90	0,639	0,950	1,585	28	5660	10,5	9	10	90	65	86	20	19
0,95	0,709	1,050	1,750	25	6340	10	8,5	9,5	83	59	78	19	18
1,00	0,785	1,180	1,960	23	7000	9	8	9	75	53	70	19	18
1,10	0,950	1,425	2,365	19	8460	9	7,5	8,5	61	44	57	18	17
1,20	1,131	1,700	2,840	15	10070	8	7	7,7	52	38	44	18	17
1,30	1,327	1,990	3,310	13	11810	7,3	6,5	7,2	43	32	39	17	16
1,40	1,539	2,305	3,850	11	13700	6,8	6,1	6,7	37	27	32	17	15
1,50	1,767	2,650	4,400	10	15730	6,4	5,7	6,3	31	23	27	16	15
1,60	2,011	3,020	5,025	9	17900	6	5,3	—	26	15	—	16	14
1,70	2,270	3,400	5,650	8	20200	5,6	5	—	20	13	—	16	14

Πίνακας 5.4 Στοιχεία χάλκινων συρμάτων περιελίξεων.

Κεφάλαιο 6: Μελέτη ασύγχρονου μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα με πυκνωτή λειτουργίας.

6.1 Υπολογισμός ειδικών μεγεθών του στάτη.

Ο κινητήρας τη εφαρμογής έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

1. Ισχύς εξόδου 1.50 hp / 1.1 KW.
2. Τάση τροφοδοσίας = 230V.
3. Συχνότητα τάσης τροφοδοσίας = 50 c/sec (Hz).
4. Στροφές: (α) σύγχρονες (n_s) = 3000 r.p.m
(β) ονομαστικές (n_r) = 2750 r.p.m .
5. Αριθμός πόλων στάτη = 2.
6. Αεριζόμενου τύπου με φτερωτή ανεμισμού διαμέτρου = 2 cm.
7. Βαθμός απόδοσης $h = 0.73$.
8. Συντελεστής ισχύος $\cos\varphi = 0.89$.
9. Η ισχύς και το μήκος του πυρήνα του κινητήρα υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$S_{out} = \frac{S_{in}}{ncos\varphi} = \frac{1100 W}{0.73 \times 0.89} = 1693 VA$$

$$S_{out} = 1.11 K_w \pi^2 \bar{B} ac D^2 L n$$

$$D^2 L = \frac{S_{out}}{1.11 K_w \pi^2 \bar{B} ac n}$$

$$\begin{aligned} D^2 L &= \frac{1693 \times 10^9 VA}{1.11 \times 0.96 \times \pi^2 \times 0.45 \frac{Wb}{m} \times 2300 \frac{\alpha\mu\pi/\gamma\omega\gamma\omicron\iota}{mm} \times 50} \\ &= 0.311 \times 10^6 mm^3. \end{aligned}$$

Όπου ο συντελεστής κατανομής των τυλιγμάτων επιλέγετε $K_w = 0.96$ από τον πίνακα 4.3, η μέση μαγνητική πυκνότητα του διακένου επιλέγετε $\bar{B} = 0.45 \text{ Wb/m}$, οι αμπεραγωγοί/mm είναι $a_c=23000$, και επειδή ο αριθμός των πόλων είναι 2, το n είναι 50.

Ο κινητήρας είναι μονοφασικός οπότε ισχύει:

$$D^2 L = 1.5 \times 0.311 \times 10^6 \text{ mm}^3 = 0.466 \times 10^6 \text{ mm}^3.$$

Για εσωτερική διάμετρος στάτη: $D = 74 \text{ mm}$.

Το μήκος πυρήνα του στάτη προκύπτει:

$$L = \frac{0.466 \cdot 10^6}{D^2} = \frac{0.466 \times 10^6 \text{ mm}^3}{74^2 \text{ mm}^2} = 85 \text{ mm}.$$

10. Πολικό βήμα:

$$y_a = \frac{\pi D}{2} = \frac{\pi \times 74 \text{ mm}}{2} = 116 \text{ mm}.$$

11. Φαινόμενη επιφάνεια διακένου μαγνητικού :

$$y_a L = 116 \text{ mm} \times 85 \text{ mm} = 9860 \text{ mm}^2.$$

12. Εύρεση του αριθμού των αυλακιών / πόλο:

$$Q_{\pi} = \frac{n}{2p} = \frac{24}{2} = 12 \text{ αυλάκια / πόλο}.$$

13. Ρεύμα τροφοδοσίας :

$$I = \frac{S_{out}}{v} = \frac{1693 \text{ VA}}{230 \text{ V}} = 7.3 \text{ A}.$$

14. Ο αγωγός του τυλίγματος στάτη επιλέγετε από τον πίνακα 5.4 : Αγωγός Νο 20 S.W.g.

Διάμετρος γυμνού αγωγού (χωρίς μόνωση) : 0.8mm.

Πάχος μόνωσης : 0.05 mm.

Διάμετρος αγωγού (με μόνωση) : 0.85 mm.

Τα 2/3 των αυλακιών του στάτη καταλαμβάνονται από το κύριο τύλιγμα και το 1/3 από το βοηθητικό τύλιγμα (τύλιγμα εκκίνησης).

15. Μαγνητική ροή στο διάκενο:

$$\varphi = y_a L \bar{B} = 116 \text{ mm} \times 85 \text{ mm} \times 0.45 \cdot 10^{-3} \text{ Wb/m} = 4.4 \times 10^{-3} \text{ Wb}.$$

16. Οι αγωγοί σε σειρά στο κύριο τυλίγμα υπολογίζονται από τον παρακάτω τύπο:

$$E = 4.44 \varphi f T K_T$$

$$T = \frac{230 V}{4.44 \times 4.4 \times 10^{-3} Wb \times 50 Hz \times 0.829}$$

Ο συντελεστής διανομής επιλέγετε: $K_T = 0.829$

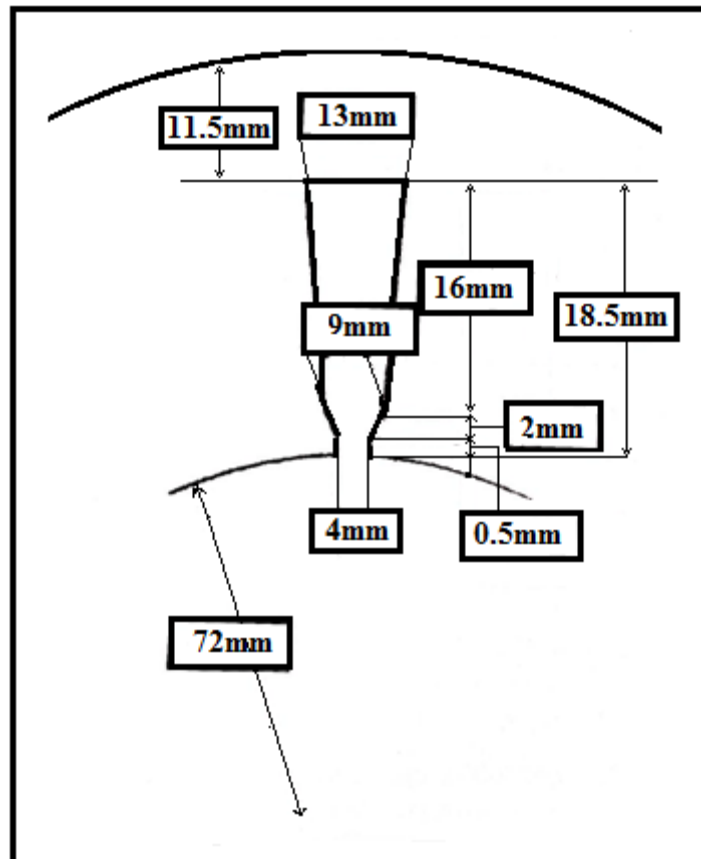
Οι αγωγοί είναι: $T = 280$

Επιλέγω λιγότερους αγωγούς: $T = 260$

17. Συνολικοί αγωγοί κύριου τυλίγματος είναι:

$$T_{K.T.} = T \times \text{ομάδες τυλιγμάτων} = 260 \times 2 = 520$$

18. Σχεδιασμός αυλακιού πυρήνα.



Σχήμα 6.1. Κάτοψη αυλακιού στάτη.

6.2. Το κύριο τύλιγμα.

1. Εύρεση του αριθμού των αυλακιών που καταλαμβάνει το κύριο τύλιγμα ανά πόλο:

$$Q_{K.T.} = Q_{\Pi} \frac{2}{3} = 12 \times \frac{2}{3} = 8 \text{ αυλάκια ανά πόλο}$$

2. Συντελεστής τυλίγματος από πίνακα 4.3: $K_T = 0,829$

3. Βήμα κύριου τυλίγματος : 1 - 6, 1 - 8, 1 - 10, 1 - 12

4. Αγωγοί ανά σπείρα θα είναι:

$$N_{KT} = \frac{T_{K.T.}}{\text{σπείρες } K.T.} = \frac{520}{8} = 65 \text{ αγωγοί ανά σπείρα}$$

5. Ο χώρος που καταλαμβάνει ο αγωγός διατομής 0.85mm στα αυλάκια του στάτη υπολογίζετε: $(\pi \times 0.85^2 \text{ mm}^2)/4 = 0.567 \text{ mm}^2$, $65 \times 0.567 \text{ mm}^2 = 36.855 \text{ mm}^2$ και $2 \times 36.855 \text{ mm}^2 = 73.7 \text{ mm}^2$.

6. Απαιτούμενη διατομή αυλακιού του στάτη:

$$[(13 \text{ mm} + 9 \text{ mm})/2] \times 10 = 110 \text{ mm}^2.$$

Άρα μας ικανοποιεί το αυλάκι.

7. Ωμική αντίσταση κύριου τυλίγματος στους 15°C:

$$R = \rho \frac{L}{S} = \rho \frac{N_{KT} L}{\frac{\pi d_{K.T.}^2}{4}} = \frac{4 \rho N_{KT} L}{\pi d_{K.T.}^2} = \frac{4 \times 0.017 \times 65 \times 85 \times 10^{-3}}{\pi \times 0.8^2} = 0.186 \Omega$$

Όπου: ρ είναι η ιδική αντίσταση χαλκού στους 15°C

d είναι η διάμετρος του αγωγού.

6.3. Το βοηθητικό τύλιγμα.

1. Υπολογισμός αγωγού βοηθητικού τυλίγματος:

$$105 \times \frac{\pi d_{B.T.}^2}{4} = 36.855 \text{ mm}^2$$

Άρα $d_{B.T.} = 0.67 \text{ mm}^2$

2. Εύρεση του αριθμού των αυλακιών που καταλαμβάνει το βοηθητικό τύλιγμα ανά πόλο:

$$Q_{B.T.} = Q_{\Pi} \times \frac{1}{3} = 12 \times \frac{1}{3} = 4 \text{ αυλάκια ανά πόλο}$$

Έχει 2 ομάδες τυλιγμάτων με δυο σπείρες, η κάθε μία με 105 αγωγούς.

3. Από πίνακα 5.4. επιλέγετε ο αγωγός του βοηθητικού τυλίγματος: No = 21 SWg

4. Διάμετρος γυμνού αγωγού (χωρίς μόνωση): 0.7mm

5. Πάχος μόνωσης : 0.05mm

6. Διάμετρος αγωγού με μόνωση: 0.75mm

7. Ο χώρος που καταλαμβάνουν οι αγωγοί στα αυλάκια του στάτη υπολογίζετε ως εξής:

$$(\pi \times 0.75^2)/4 = 0.4418mm^2, 105 \times 0.4418 = 46.389, \text{ και } 2 \times 46.389 = 92.77mm^2.$$

8. Ωμική αντίσταση στους 15 °C :

$$R = \rho \frac{L}{s} = \rho \frac{N_{BT} L}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4 \rho N_{BT} L}{\pi d^2} = \frac{4 \times 0.017 \times 105 \times 85 \times 10^{-3}}{\pi \times 0.695^2} = 0.399 \Omega$$

6.4 Ο δρομέας.

Ο δρομέας είναι βραχυκυκλωμένου κλωβού, ο οποίος αποτελείτε από συμπιεσμένα φύλα αλουμινίου.

1. Συνολικό μήκος δρομέα: 27.5 cm
2. Μήκος κλωβού: 8.3cm
3. Το πάχος κάθε φύλου αλουμινίου είναι: 1mm
4. Αριθμός φύλλων αλουμινίου: 83
5. Διάμετρος κλωβού: 7 cm

Ο δρομέας αποτελείτε δυο ρουλεμάν νο. 6204 που βρίσκετε στο πίσω μέρος του δρομέα (δηλαδή στη φτερωτή ανεμισμού) και νο. 6205 στο μπροστινό μέρος.

6.5 Ο πυκνωτής λειτουργίας.

Γνωρίζοντας τα βασικά χαρακτηριστικά του κινητήρα μπορούμε να υπολογίσουμε τον πυκνωτή λειτουργίας.

Η τάση τροφοδοσίας είναι: 230V

Το ρεύμα λειτουργίας (βρίσκετε από το πινακίδιο του κινητήρα): 8.1A

$$C = \frac{3.180 \text{ I}}{v} \times \frac{1}{4} = \frac{3.18 \times 8.1 \text{ A}}{230 \text{ V}} \times \frac{1}{4} = 27 \mu\text{f}$$

Επιλέγω πυκνωτή λειτουργίας $C = 30 \mu\text{f}$

6.6 Υπολογισμός ολίσθησης.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \Rightarrow s = \frac{3000 \text{ r.p.m.} - 2750 \text{ r.p.m.}}{3000 \text{ r.p.m.}} = 0.0833$$

Άρα η ολίσθηση είναι:

$$s = 8.3\%$$

Κεφάλαιο 7 : Περιέλιξη μονοφασικού κινητήρα

7.1 Ο κινητήρας της εφαρμογής.

Ο κινητήρας στον οποίο θα πραγματοποιηθεί αλλαγή των τυλιγμάτων του είναι της εταιρίας E.L.D. romano d'ezzelino και έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά.

Τύπος	ME90S2
Ισχύς	1.1 KW/1.5HP
Στροφές	2780
Συχνότητα	50 Hz
Σπείρες κύριου τυλίγματος	520
Σπείρες βοηθητικού τυλίγματος	420
Τάση	220/230 V
Ένταση εκκίνησης	8.1 A
Συντελεστής ισχύος	0.89
Πυκνωτής λειτουργίας	30 μ f
IP	54
IM	B3
Is.cl	F
Βάρος	11kg

Πινάκας 7.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα με πυκνωτή λειτουργίας.



Εικόνα 7.1. Ο κινητήρας της εφαρμογής.

Η αποσυναρμολόγηση του κινητήρα γίνεται σημαδεύοντας με πόντα δύο σημεία που συμπίπτουν στο κάλυμμα και στον κορμό της μηχανής, για να μας βοηθήσουν μετά στη συναρμολόγηση της μηχανής. Ακόμα, για να μη γίνει σφάλμα, χρησιμοποιούμε διαφορετικά σημάδια σε κάθε πλευρά της μηχανής, για παράδειγμα μια «πονταρισιά» στα σημεία επαφής της μιας πλευράς και δύο «πονταρισιές» στην άλλη πλευρά. Μετά αφαιρούμε τα παξιμάδια και τους συνδετικούς κοχλίες και διαχωρίζουμε τα ακραία καλύμματα από τον κορμό χρησιμοποιώντας σιδερένιο σφυρί με ξύλινο τάκο. Όταν αποχωρισθούν τα καλύμματα από τον κορμό της μηχανής, το τύμπανο θα έλθει σε επαφή με το στάτη.



Εικόνα 7.2. Το πινακίδιο του κινητήρα εφαρμογής.

7.2 Αφαίρεση τυλιγμάτων στάτη.

Πριν αφαιρεθούν τα τυλίγματα βρίσκουμε αρχικά τα ζεύγη των πόλων που σχηματίζονται καθώς και τις σπείρες των κύριων και βοηθητικών τυλιγμάτων. Το κύριο τύλιγμα αποτελείται από δυο ομάδες τυλιγμάτων με τέσσερις σπείρες το

καθένα, βήματος 1-6/1-8/1-10/1-12 και το βοηθητικό αποτελείται και αυτό από δυο ομάδες με δυο σπείρες το καθένα έχοντας βήμα 1-10/1-12.

Τα τεχνικά στοιχεία που πρέπει να κρατήσουμε από την παλιά περιέλιξη φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

Βήμα κύριας	1-6/1-8/1-10/1-12
Σύρματα ανά σπείρα στη κύρια	65/65/65/65
Βήμα βοηθητικής	1-10/1-12
Σύρματα ανά σπείρα στη βοηθητική	105/105
Διατομή σύρματος κύριας	0.85
Διατομή σύρματος βοηθητικής	0.75
Ζεύγη πόλων κύριας και βοηθητικής	1
Αριθμός αυλακιών	24

Πινάκας 7.2. Τεχνικά στοιχεία παλιάς περιέλιξης.

Ο πιο εύκολος τρόπος για να απομακρυνθεί η παλιά περιέλιξη είναι κόβοντας αρχικά τα άκρα των σπειρών των τυλιγμάτων από την μία πλευρά του στάτη, ενώ στη συνέχεια από την άλλη πλευρά τραβάμε με πένσα την κάθε σπείρα ξεχωριστά. Στην περίπτωση που είναι δύσκολο να ξηλωθούν τα τυλίγματα, χρησιμοποιούμε φλόγα οξυγόνου ή καμινέτου για να τα θερμάνουμε.



Εικόνα 7.3. Η πλευρά του στάτη με τα κομμένα τυλίγματα



Εικόνα 7.4. Το ξήλωμα των σπειρών του στάτη

Στη συνέχεια αφού ξηλωθούν τα τυλίγματα μετράμε πόσα σύρματα περιέχει κάθε σπείρα. Το κύριο τύλιγμα έχει 65 σύρματα ανά σπείρα (δηλαδή ανά αυλάκι), διατομής 0.85 mm και το βοηθητικό έχει 105 σύρματα ανά σπείρα, διατομής 0.75 mm. Η διατομή των συρμάτων μετρήθηκε με μικρόμετρο.

Τέλος, ακολουθεί ο καθαρισμός του πυρήνα από τα κατεστραμμένα μονωτικά χαρτιά και ο έλεγχος του πυρήνα για τυχόν βραχυκυκλωμένα δυναμοελάσματα που θα μπορούσαν να προκαλέσουν ανάπτυξη δινορρευμάτων, και κατά συνέπεια αύξηση της θερμοκρασίας του πυρήνα λόγω απωλειών.



Εικόνα 7.5. Ο πυρήνας του κινητήρα καθαρισμένος από σύρματα και μονωτικά υλικά

7.3 Η μόνωση του κινητήρα.

Σε αυτό το στάδιο επενδύουμε τα αυλάκια (οδοντώσεις) του πυρήνα με λωρίδα λεπτού μονωτικού χαρτιού τύπου sandwich, πάχους 2.5mm και πλάτους 26 mm (το πάχος των μονωτικών επιλέγεται από το διαθέσιμο χώρο των οδοντώσεων), ώστε να καλυφθεί όλη η εσωτερική επιφάνεια του αυλακιού. Κάθε μονωτική λωρίδα που κόβουμε πρέπει να είναι λίγο μεγαλύτερη σε μήκος (περίπου 15 mm) από αυτό των αυλακιών του κινητήρα, έτσι ώστε διπλώνοντας τις δύο άκρες τους ισομερώς προς τα

πίσω, να ασφαλίζουν ακριβώς με στο λούκι του πυρήνα. Στο συγκεκριμένο κινητήρα που τα αυλάκια του έχουν μήκος είναι 83 mm, τα μονωτικά του θα πρέπει να έχουν μήκος 100 mm. Ακόμα, για την καλύτερη εφαρμογή του μονωτικού στο αυλάκι, τσακίζουμε το μονωτικό δίνοντάς του το σχήμα του εσωτερικού του αυλακιού, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 7.6. Τα μονωτικά χαρτιά

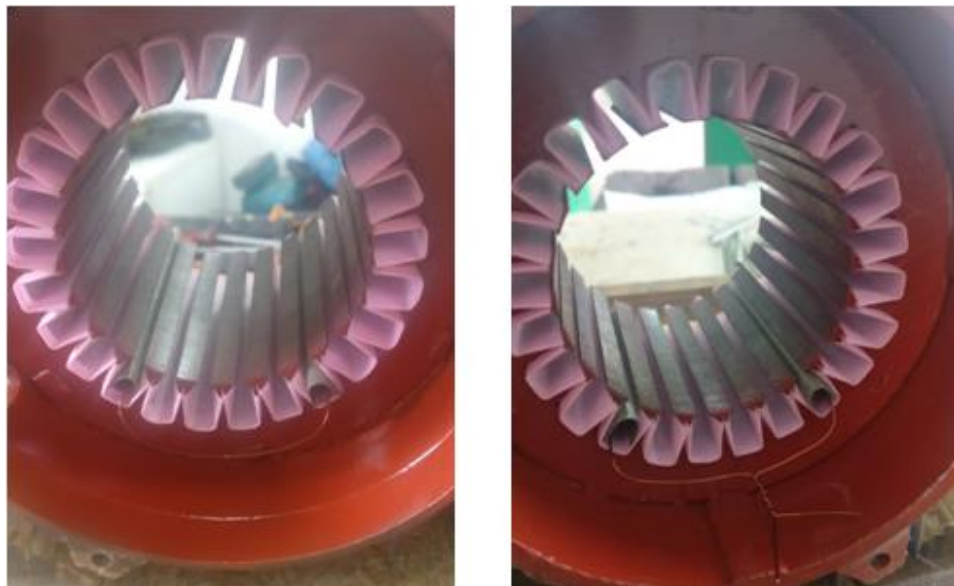


Εικόνα 7.7. Ο πυρήνας μονωμένος

7.4 Η διαμόρφωση των τυλιγμάτων του μονοφασικού κινητήρα.

Όλα τα τυλίγματα του κινητήρα διαμορφώνονται χρησιμοποιώντας ειδικά καλούπια περιέλιξης. Το μέγεθος της ομάδας των τυλιγμάτων του κύριου τυλιγματος καθορίζεται σχηματίζοντας με ένα απλό σύρμα μια σπείρα βήματος 1-6 μέσα στις οδοντώσεις του πυρήνα, αφήνοντας αρκετό χώρο (τζόγο) από τις δύο μεριές

προκειμένου να τοποθετηθεί χωρίς δυσκολία (βλέπε εικόνα 7.8). Στη συνέχεια τοποθετώντας τη σπείρα στο μικρότερο λούκι των καλουπιών και τεντώνοντάς τη πάνω στη μηχανή περιέλιξης (βλέπε εικόνα 7.9), βρίσκεται και η τελική απόσταση μεταξύ των δυο καλουπιών.



Εικόνα 7.8. Η απλή σπείρα σύρματος και από τις δυο πλευρές του κινητήρα.



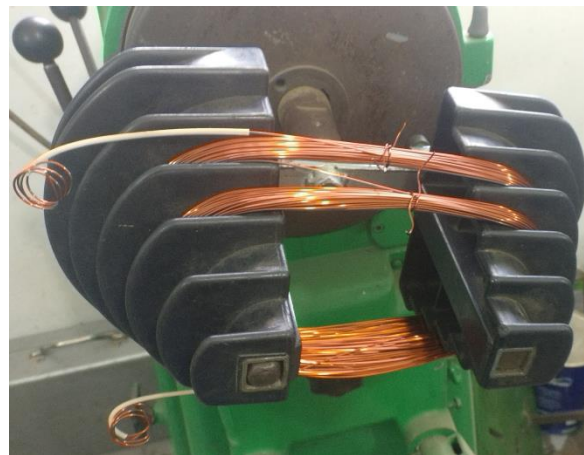
Εικόνα 7.9. Η απλή σπείρα σύρματος τοποθετημένη στα καλούπια περιέλιξης

Έχοντας ήδη βρει την τελική απόσταση μεταξύ των δύο καλουπιών ξεκινάμε από το μικρότερο λούκι να τυλίγουμε το σύρμα. Αφού περιτυλιχθεί ο απαραίτητος αριθμός των συρμάτων (65 σύρματα ανά σπείρα για αυτόν το κινητήρα), σχηματίζεται η μικρότερη σε βήμα σπείρα (1-6) της ομάδας. Με αυτό το τρόπο χρησιμοποιώντας και τα επόμενα τρία λούκια ολοκληρώνεται η μια από τις δυο ομάδες τυλιγμάτων του κύριου τυλίγματος.



Εικόνα 7.10. Κύριο τύλιγμα του μονοφασικού κινητήρα.

Το βοηθητικό τύλιγμα του κινητήρα που αποτελείται και αυτό από δυο ομάδες, με δυο σπείρες ανά ομάδα βήματος 1-10 και 1-12, κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας μόνο το τρίτο και τέταρτο λούκι των καλουπιών εξαιτίας του βήματός τους. Ακόμα, για τον συγκεκριμένο κινητήρα χρειάζεται να μικρύνουμε μερικά χιλιοστά την απόσταση μεταξύ των καλουπιών, προκειμένου το πλάτος του βοηθητικού τυλίγματος να λίγο μικρότερο από αυτό του κυρίου τυλίγματος.



Εικόνα 7.11. Βοηθητικό τύλιγμα του μονοφασικού κινητήρα

Το μηχάνημα περιελίξεως αποτελείται από τα εξής: 1) Βάση. 2) Ηλεκτρικό κινητήρα. 3) Μειωτήρα στροφών. 4) Χειροστρόφαλο, που βρίσκεται στον άξονα εξόδου και ελέγχει τις τελευταίες λίγες σπείρες της ομάδας επάνω στην κινητή κεφαλή. 5) Μετρητή σπειρών. 6) Θέση υποδοχής καλουπιών περιελίξης για τη διαμόρφωση της μορφής της ομάδας και 7) Ποδομοχλό για την κίνηση του κινητήρα.

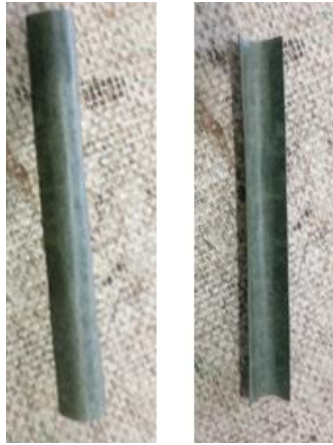


Εικόνα 7.12 Το μηχάνημα περιελίξεως.

7.5 Η περιέλιξη του μονοφασικού κινητήρα.

Το κύριο τύλιγμα τοποθετείται στον πυρήνα αρχίζοντας από τη μικρότερη σπείρα της ομάδας και από οποιαδήποτε οδόντωση θέλουμε (όταν όλες οι οδοντώσεις του πυρήνα είναι ίδιες). Κρατώντας την λοιπόν παράλληλα πάνω από τις οδοντώσεις, ξεκινάμε από το άκρο της σπείρας τοποθετώντας σταδιακά τα σύρματα της ένα προς ένα ή 2 ή 3 μαζί, ανάλογα πάντα με την ευχέρεια του χώρου της οδοντώσεως. Όταν όλα τα σύρματα μπουν μέσα στην οδόντωση του πυρήνα, η σπείρα θα σφηνωθεί μόνιμα στη θέση της με μονωτικό υλικό, σε σχήμα κατάλληλα διαμορφωμένο για τις οδοντώσεις του πυρήνα, στη συγκεκριμένη περίπτωση με πρεσπάρ που έχει πάχος 0.40 mm, μήκος 96 mm και πλάτος 19 mm (βλέπε εικόνα 7.13). Η άλλη πλευρά της σπείρας τοποθετείται και αυτή με το ίδιο τρόπο, πέντε λούκια πιο μακριά.

Οι επόμενες σπείρες βήματος 1-8, 1-10 και 1-12 εισάγονται στις αμέσως επόμενες οδοντώσεις, συμπληρώνοντας έτσι την ομάδα των τυλιγμάτων. Τέλος, οι σπείρες της ομάδας δένονται όλες μαζί με ιδικό σπάγκο μεγάλης θερμικής και μηχανικής αντοχής.



Εικόνα 7.13. Το πρεσπάν που χρησιμοποιείται ως σφήνα στις οδοντώσεις του πυρήνα.



Εικόνα 7.14. Η τοποθέτηση της πρώτης ομάδας του κύριου τυλίγματος.

Το δεύτερο μισό του κύριου τυλίγματος θα τοποθετηθεί στις ακριβώς απέναντι οδοντώσεις όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες.



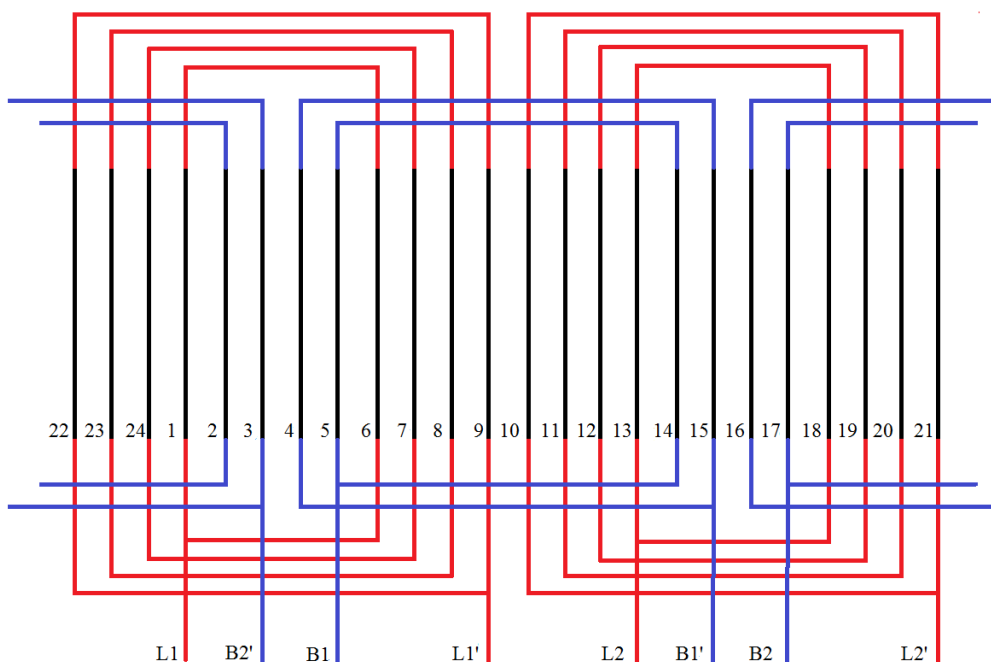
Εικόνα 7.15. Το κύριο τύλιγμα ολοκληρωμένο.

Επειδή ο κινητήρας μας είναι διπολικός, οι σπείρες του βοηθητικού τυλίγματος εισάγονται με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε ο κάθε πόλος του βοηθητικού τυλίγματος να απέχει 90° από τον αντίστοιχο πόλο του κύριου τυλίγματος.



Εικόνα 7.16. Η τοποθέτηση του βοηθητικού τυλίγματος.

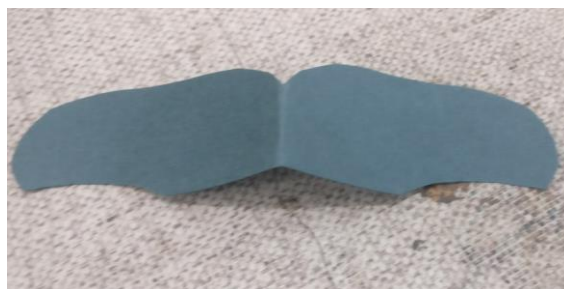
Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το ανοιγμένο τύλιγμα του στάτη, με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται το κύριο τύλιγμα και με μπλε το βοηθητικό. Τα άκρα των κύριων τυλιγμάτων συμβολίζονται με τα γράμματα $L1, L1'$ και $L2, L2'$, και των βοηθητικών με τα γράμματα $B1, B1'$ και $B2, B2'$.



Σχήμα 7.17. Το ανάπτυγμα μονοφασικού ομοκεντρικού διπολικού τυλίγματος με 24 οδοντώσεις.

7.6. Οι εσωτερικές συνδέσεις των τυλιγμάτων.

Πριν προχωρήσουμε στην συνδεσμολογία, πραγματοποιείται διαχωρισμός των κύριων και βοηθητικών τυλιγμάτων με πρεσπάν πάχους mm. Το μονωτικό υλικό κόβεται πρώτα, έτσι ώστε να έχει ίδιο σχήμα με τα δυο μισά μαξιλαράκια του βοηθητικού τυλίγματος (βλέπε Εικ. 7.18) και τοποθετείται ενδιάμεσα στα δυο τυλίγματα (ξεκινώντας από την πλευρά του στάτη όπου δεν υπάρχουν άκρα), προσφέροντας ηλεκτρική μόνωση.



Εικόνα 7.18. Το διαχωριστικό μονωτικό.



Εικόνα 7.19. Η τοποθέτηση των διαχωριστικών.

Το επόμενο βήμα μετά την εισαγωγή των διαχωριστικών μονωτικών, είναι το ενιαίο δέσιμο όλων των ομάδων του στάτη με τον ίδιο σπάγκο που χρησιμοποιήθηκε και προηγουμένως.



Εικόνα 7.20. Το ενιαίο δέσιμο όλων των ομάδων.

Οι εσωτερικές συνδέσεις των τυλιγμάτων πρέπει να γίνονται στέρεες και να έχουν μεγάλη μηχανική αντοχή, για αυτούς του λόγους χρησιμοποιείται χαλκοκόλληση για τη συγκόλληση τους, ακόμα είναι αναγκαίο η κάθε σύνδεσή τους να μονώνεται με μονωτικό μακαρόνι. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται τα άκρα του κινητήρα και τα διαχωριστικά μονωτικά ενδιάμεσα στο κύριο και βοηθητικό τύλιγμα.



Εικόνα 7.21. Τα άκρα των ομάδων του κινητήρα.

Οι δυο ομάδες του κύριου τυλίγματος θα συνδεθούν σε σειρά, δηλαδή η αρχή της κάθε ομάδας θα συνδεθεί με το τέλος της άλλης, έπειτα τα δυο άκρα του κύριου τυλίγματος που προκύπτουν θα καταλήξουν στο πινακάκι του κινητήρα αφού συνδεθούν με καλώδιο NYA 2.5 mm. Οι ομάδες του βοηθητικού τυλίγματος θα συνδεθούν παράλληλα, δηλαδή το τέλος μιας ομάδας θα συνδεθεί με το τέλος της άλλης και οι αρχές των ομάδων θα συνδεθούν με 1.5 mm NYA καλώδιο, όπου θα οδηγηθούν επίσης στο πινακάκι του κινητήρα. Ακόμα, εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στον πυρήνα, είναι απαραίτητη η επιπλέον προστασία της μόνωσης των NYA καλωδίων με μονωτικό μακαρόνι, αποφεύγοντας με αυτό τον τρόπο κάποιο βραχυκύκλωμα. Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνονται όλες οι συνδέσεις στο στάτη και η μόνωση τους με τα μονωτικά μακαρόνια .



Εικόνα 7.22. Οι εσωτερικές συνδέσεις των τυλιγμάτων.

Έχοντας πραγματοποιήσει όλες τις συνδέσεις στο στάτη ακολουθεί το δέσιμο των ομάδων των τυλιγμάτων και σε αυτή την πλευρά του στάτη. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι αυτό το κυκλικό ομοιόμορφο σχήμα που παίρνουν στο τέλος τα τυλίγματα (όπως φαίνετε στην παρακάτω εικόνα), δίνεται χρησιμοποιώντας ματσόλα και ξύλινο λοστό για την αποφυγή τραυματισμού της μόνωσης των τυλιγμάτων, η ματσόλα είναι σφυρί που έχει πλαστική κεφαλή αντί για σιδερένια.



Εικόνα 7.23. Το ενιαίο δέσιμο όλων των ομάδων.

Συνέχεια έχει ο εμποτισμός των τυλιγμάτων με βερνίκι, που όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο συνεισφέρει στη μόνωση των τυλιγμάτων και στην απαγωγή της θερμότητας του κινητήρα.



Εικόνα 7.24. Τα τυλίγματα του στάτη βερνικοωμένα

Έπειτα στο πινακάκι του κινητήρα ελέγχουμε με ένα μέγκερ αν τα δυο τυλίγματα είναι κάπου βραχυκυκλωμένα, είτε μεταξύ τους είτε με το κέλυφος του κίνητρα. Δηλαδή αν μεταξύ των δυο τυλιγμάτων ή τυλίγματος και κελύφους τοποθετηθεί το μέγκερ και η κλίμακα του παρουσιάσει μικρή αντίσταση (ή αντίσταση μηδέν), σημαίνει ότι κάπου υπάρχει βραχυκύκλωμα. Με άλλα λόγια, ένας κινητήρας λειτουργεί σωστά μόνο όταν υπάρχει κλειστό ηλεκτρικό κύκλωμα μεταξύ των ακροδεκτών του κύριου τυλίγματος και μεταξύ των ακροδεκτών του βοηθητικού, καθώς και όταν υπάρχει ανοιχτό κύκλωμα μεταξύ τυλιγμάτων και κελύφους (η τιμή της αντίστασης θα δείχνει άπειρο).

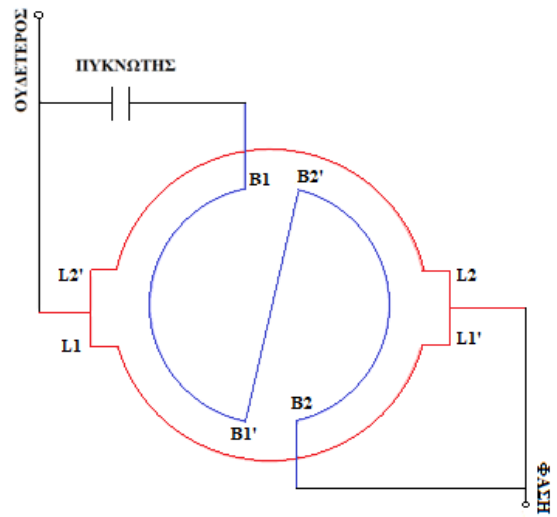
Οι συνδέσεις στο πινακάκι του κινητήρα έχουν ως εξής, τα δυο άκρα του κύριου τυλίγματος συνδέονται στις θέσεις U1 και U2 του πινακάκι και το βοηθητικό στις θέσεις V1 και V2. Ο πυκνωτής θα συνδεθεί με τη σειρά του μεταξύ των δυο τυλιγμάτων όταν τα δυο του άκρα του τοποθετηθούν στις θέσεις W2 και W1, δηλαδή στη θέση V2 το ένα άκρο πυκνωτή συνδέεται στο βοηθητικό τύλιγμα και στη θέση W2 γεφυρώνοντας τη με την U1, συνδέεται στο κύριο τύλιγμα. Τέλος, τα άλλα δυο άκρα των τυλιγμάτων στις θέσεις U1 και U2 γεφυρώνονται μεταξύ τους δημιουργώντας ένα κλειστό κύκλωμα. Τροφοδοσία από το μονοφασικό δίκτυο παίρνουμε στις θέσεις U1 και V1.



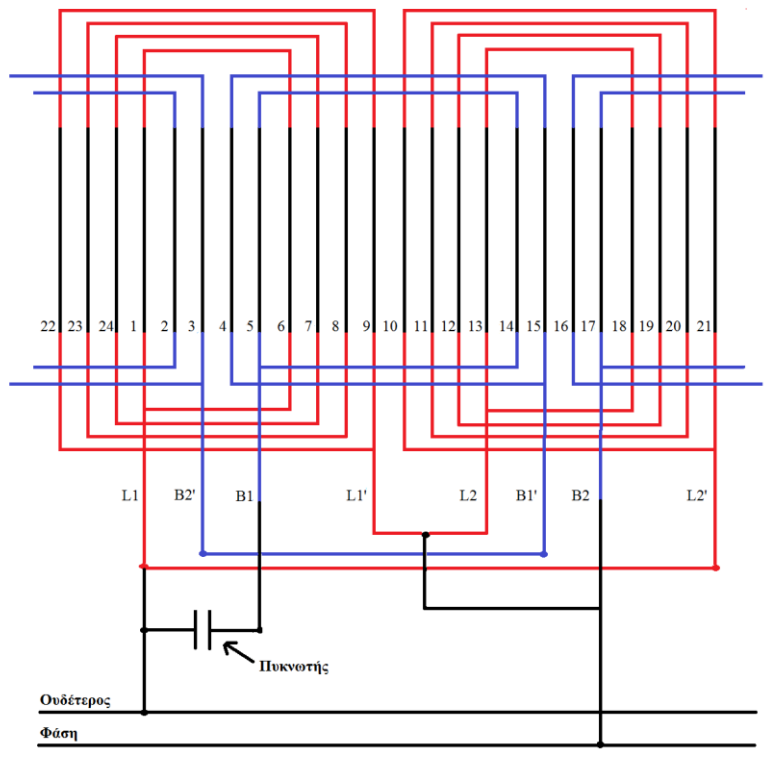
Εικόνα 7.25. Το πινακάκι του κινητήρα.

Ο πιο εύκολος τρόπος για να αντιστρέψουμε την φορά περιστροφής του κινητήρα είναι να αλλάξουμε τις θέσεις των γεφυρών, δηλαδή η μια γέφυρα να τοποθετηθεί μεταξύ U1 και V1 συνδέοντας απευθείας τα δυο τυλίγματα, και η άλλη γέφυρα να μεταξύ W2 και U2 δηλαδή ο πυκνωτής θα συνδεθεί στο κύριο τύλιγμα από το άλλο άκρο του τυλίγματος. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνουμε αλλαγή περιστροφής του μαγνητικού πεδίου χωρίς να «σκατζάρουμε» τα άκρα του κύριου η του βοηθητικού τυλίγματος. Ο κινητήρας τώρα θα τροφοδοτηθεί από τις θέσεις U1 και W2.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται όλες οι συνδέσεις των τυλιγμάτων και η σύνδεση του πυκνωτή λειτουργίας σε σειρά μεταξύ κύριου και βοηθητικού τυλίγματος.



Σχήμα 7.26. Το κυκλικό διάγραμμα ομόκεντρου διπολικού μονοφασικού κινητήρα



Σχήμα 7.27. Το ανάπτυγμα μονοφασικού ομοκεντρικού διπολικού τυλίγματος.

Ο κινητήρας είναι πια έτοιμος για τη συναρμολόγησή του, ακολουθώντας την αντίστροφη διαδικασία.



Εικόνα 7.28 Ο κινητήρας με όλα τα εξαρτήματα του.

Τέλος για να εξακριβώσουμε την σωστή λειτουργία του κινητήρα, με επαγωγικό αμπερόμετρο μετράμε το ρεύμα του κινητήρα χωρίς φορτίο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] M. V. Deshpande, «Design And Testing of Electrical Machines».
- [2] Π. Μαλατέστας, «Ηλεκτρικές Μηχανές», Εκδόσεις Τζιόλας, 2^η έκδοση, Θεσσαλονίκη, 2013.
- [3] Στέλιος Αντωνόπουλος, «Τυλίγματα Ηλεκτρικών Μηχανών».
- [4] Ίδρυμα Ευγενίδου, «Ηλεκτρικές Μηχανές Τόμος Β Εναλλασσομένου Ρεύματος Ίδρυμα Ευγενίδου».
- [5] Διπλωματική Εργασία Του Δημήτριου Βαφειάδη, «Μελέτη Και Κατασκευή Τριφασικού Αντιστροφέα Τάσης Για Την Ρύθμιση Στροφών Ενός Μονοφασικού Επαγωγικού Κινητήρα».
- [6] Stephen J. Chapman, « Ηλεκτρικές Μηχανές AC- DC», Θεσσαλονίκη, Τζιόλα 2003.
- [7] Πτυχιακή Εργασία Των Κωστήνης Άλκη Και Μπάμπης Στέφανος, «Θεωρητική Μελέτη Μονοφασικού Ασύγχρονου Κινητήρα».
- [8] Διπλωματική Εργασία του Δημήτριου Παναγιωτόπουλου, «Σχεδίαση Κινητήρα Επαγωγής 4 KW Για Ηλεκτροκίνηση Υψηλών Ταχυτήτων».
- [9] Πτυχιακή Εργασία Των Χαραλαμπίκης Παναγιώτη Και Παρασκέυης Νικόλαου, «Σύγχρονη Μέθοδοι Εκκίνησης Επαγωγικών Κινητήρων».