

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριθμός 1514

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ
ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΔΡΟΜΕΑ ΙΣΧΥΟΣ 45kW**

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΑ ΣΠΟΥΔΑΣΤΩΝ: ΝΕΛΑ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΠΑΣΧΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ-ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ένας κινητήρας επαγωγής, είναι μια ηλεκτρική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος δύο συζευγμένων τυλιγμάτων, στην οποία το ένα τύλιγμα (στάτης) τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας f , από μια εξωτερική πηγή. Στο άλλο (δευτερεύον τύλιγμα – δρομέας), τα ρεύματα αναπτύσσονται εξ επαγωγής από το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται στο στάτη. Οι ασύγχρονοι ή αλλιώς κινητήρες επαγωγής, παρουσιάζουν το ευρύτερο πεδίο εφαρμογών, από όλους τους ηλεκτρικούς κινητήρες. Με κατάλληλη παραμετροποίηση των γεωμετρικών τους στοιχείων μπορούμε να κατασκευάσουμε κινητήρες για οποιαδήποτε χρήση μιας και είναι δυνατή η διαφοροποίηση των αποδιδόμενων ροπών, του βαθμού απόδοσης και του συντελεστή ισχύος. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετάται ένας επαγωγικός κινητήρας έξι πόλων, ισχύος 45kW με 36 αυλάκια στον στάτη.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένας κινητήρας επαγωγής, είναι μια ηλεκτρική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος δύο συζευγμένων τυλιγμάτων, στην οποία το ένα τύλιγμα (στάτης) τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας f , από μια εξωτερική πηγή. Στο άλλο (δευτερεύον τύλιγμα – δρομέας), τα ρεύματα αναπτύσσονται εξ επαγωγής από το μαγνητικό πεδίο που αναπτύσσεται στο στάτη.

Στο γεγονός αυτό οφείλεται και η ονομασία «κινητήρες επαγωγής». Ο όρος «ασύγχρονες», αποδίδεται διότι οι στροφές λειτουργίας τους είναι λίγο μικρότερες από τον σύγχρονο αριθμό στροφών όταν η μηχανή λειτουργεί σαν κινητήρας και λίγο περισσότερες από τον σύγχρονο αριθμό στροφών όταν η μηχανή λειτουργεί σαν γεννήτρια. Οι ασύγχρονοι ή αλλιώς κινητήρες επαγωγής, παρουσιάζουν το ευρύτερο πεδίο εφαρμογών, από όλους τους ηλεκτρικούς κινητήρες. Με κατάλληλη παραμετροποίηση των γεωμετρικών τους στοιχείων μπορούμε να κατασκευάσουμε κινητήρες για οποιαδήποτε χρήση μιας και είναι δυνατή η διαφοροποίηση των αποδιδόμενων ροπών, του βαθμού απόδοσης και του συντελεστή ισχύος

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετάται ένας επαγωγικός κινητήρας έξι πόλων, ισχύος 45kW με 36 αυλάκια στον στάτη. Οι προδιαγραφές του κινητήρα είναι δεδομένες από τον κατασκευαστή και μέσω των υπολογισμών των διαστάσεων του στάτη και του δρομέα υπολογίζονται τα στοιχεία του ισοδυνάμου κυκλώματος καθώς και το ρεύμα μαγνήτισης. Τα στοιχεία αυτά χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον υπολογισμό των απωλειών, του βαθμού απόδοσης και της ροπής εκκίνησης και ροπής ανατροπής του κινητήρα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	II
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	4
1.1. Κατασκευαστική Δομή των Μηχανών Εναλλασσομένου Ρεύματος.	4
1.2. Το Στρεφόμενο Μαγνητικό Πεδίο	6
1.3. Η ολίσθηση	13
1.4. Χαρακτηριστική Ταχύτητας-Ροπής	14
1.5. Ισοδύναμο κύκλωμα	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ.....	19
2.1. Είδη επαγωγικών κινητήρων	19
2.2. Κλάσεις των επαγωγικών κινητήρων.....	21
2.3. Εφαρμογές επαγωγικών ηλεκτρικών μηχανών	24
2.3.1. Λειτουργία κινητήρα.....	24
2.3.2. Λειτουργία γεννήτριας.....	25
2.3.3. Λειτουργία πέδης	27
2.4. Έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων	29
2.4.1. Έλεγχος της ταχύτητας με ρύθμιση της αντίστασης του δρομέα.	30
2.4.2. Έλεγχος της ταχύτητας με ρύθμιση της τάσης του στάτη.....	31
2.4.3. Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή του αριθμού των πόλων...34	
2.4.4. Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της συχνότητας	34
2.5. Διατάξεις εκκίνησης τριφασικών κινητήρων.....	39
2.5.1. Απευθείας εκκίνηση.....	39
2.5.2. Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή	40

2.5.5. Εκκίνηση με ομαλό εκκινητή (soft-starter)	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	45
3.1 Προδιαγραφές του κινητήρα	45
3.2 Υπολογισμός των στοιχείων του στάτη	46
<u>3.2.1</u> Υπολογισμός των διαστάσεων του στάτη	46
<u>3.2.2</u> Τυλίγματα στάτη	49
<u>3.2.3</u> Υπολογισμός διαστάσεων αυλακιών στάτη	54
3.3 Υπολογισμοί των στοιχείων του δρομέα	60
<u>3.3.1</u> Υπολογισμός των διαστάσεων των αγωγών του δρομέα.	62
<u>3.3.2</u> Υπολογισμός της διαμέτρου του άξονα.	64
3.4 Υπολογισμός ρεύματος μαγνήτισης	65
3.5 Υπολογισμός ισοδυνάμου κυκλώματος	67
<u>3.5.1</u> Υπολογισμός ωμικών αντιστάσεων	67
<u>3.5.2</u> Υπολογισμός επαγωγικών αντιδράσεων	70
3.6 Απώλειες και βαθμός απόδοσης	74
3.7 Υπολογισμών των χαρακτηριστικών λειτουργίας	76
3.8 Συμπεράσματα	78
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	80

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τα διάφορα είδη ηλεκτρικών μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος, ο τριφασικός ασύγχρονος ή επαγωγικός κινητήρας (induction motor), χρησιμοποιείται ευρύτατα στις βιομηχανικές εφαρμογές. Ενδεικτικό της καθολικής χρήσης της μηχανής αυτής είναι ότι, οι επαγωγικοί κινητήρες απορροφούν το 60% περίπου, της συνολικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πλεονεκτήματα του ασύγχρονου κινητήρα, με κυριότερο την απλή κατασκευαστική δομή του δρομέα, θα εξηγηθούν στη συνέχεια.

Οι επαγωγικές μηχανές χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά ως κινητήρες, εξαιτίας των μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν όταν λειτουργούν ως γεννήτριες. Για το λόγο αυτό οι επαγωγικές μηχανές αναφέρονται ως επαγωγικοί κινητήρες. Η αρχή λειτουργίας των ασύγχρονων κινητήρων διατυπώθηκε από τον N. Tesla στις αρχές της δεκαετίας του 1880. Στις αρχές του 1882 μια μικρή ασθένεια τον ανάγκασε να μείνει για μερικές μέρες εκτός εργασίας.



Εικόνα 1: Ο επαγωγικός κινητήρας του Τέσλα

Περπατώντας το ηλιοβασίλεμα με το φίλο και βοηθό του Anital Szigety σε ένα πάρκο της Βουδαπέστης κι απαγγέλλοντας στα γερμανικά στίχους από το *Φάουστ* του Γκαίτε, του ήρθε ως λάμψη μια μεγαλοφυής ιδέα, που έμελλε να οδηγήσει την ανθρωπότητα σε πλήρη εξηλεκτρισμό. «Τότε, σε μια στιγμή έμπνευσης, προφέροντας αυτές τις λέξεις, η ιδέα με κτύπησε σαν λάμψη αστραπής, και μέσα σε μια στιγμή μου αποκαλύφθηκε η αλήθεια. Με το μαστούλι άρχισα τότε να χαράζω

στην άμμο τα διαγράμματα...», έγραψε αργότερα ο Τέσλα στην αυτοβιογραφία του *My Inventions*. Με το μπαστούνι του ο άνθρωπος που θα «ανακάλυπτε» τον 20^ο αιώνα άρχισε να σχεδιάζει πρόχειρα στο χώμα έναν κινητήρα.«Τον βλέπεις;», ρώτησε στον φίλο του, που παρακολουθούσε άφωνος, «κοίταξε με τώρα που θα τον αντιστρέψω!».Όταν τέλειωσε τα πρόχειρα σχέδια του αναφώνησε γεμάτος ικανοποίηση: «Αυτό είναι! Ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο! Δες πόσο ήσυχα λειτουργεί. Χωρίς σπίθες. Χωρίς θόρυβο. Λειτουργεί τέλεια!» Μ' αυτόν τον ασυνήθιστο τρόπο ο Τέσλα συνέλαβε για πρώτη φορά την ιδέα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου και του επαγωγικού κινητήρα, ο οποίος χρησιμοποιείται σήμερα σε κάθε ηλεκτρική συσκευή. Αρπάζοντας ένα μεγάλο μυστικό της Φύσης και χαρίζοντας το στους ανθρώπους, ο Τέσλα έγινε ένας σύγχρονος Προμηθέας που οδήγησε την ανθρωπότητα στην εποχή του ηλεκτρισμού. Ήταν καλοκαίρι του 1883 όταν ο Τέσλα κατασκεύασε τον πρώτο επαγωγικό κινητήρα, ο οποίος λειτουργούσε ακριβώς όπως τον είχε φανταστεί λίγα χρόνια πιο πριν.



Εικόνα 2: Τυπική μορφή ενός επαγωγικού κινητήρα υψηλής απόδοσης

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

αναφέρουμε ότι ένας σημερινός ασύγχρονος κινητήρας των 100hp, έχει τις ίδιες διαστάσεις με ένα κινητήρα 7.5hp του 1897. Η μείωση στις διαστάσεις των επαγωγικών κινητήρων δεν είχε συνοδευτεί από ουσιαστική βελτίωση του βαθμού απόδοσης, έως την πετρελαϊκή κρίση του 1973, εξαιτίας του μικρού κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας. Όμως, στη συνέχεια, όλοι οι κατασκευαστές ανέπτυξαν επαγωγικούς κινητήρες με το χαρακτηρισμό υψηλής απόδοσης. Οι κινητήρες αυτοί, αν και έχουν μεγαλύτερο κόστος από τους τυπικούς επαγωγικούς κινητήρες, αποκτούν όλο και μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς. Η τυπική μορφή ενός επαγωγικού κινητήρα υψηλής απόδοσης εικονίζεται στην εικόνα 2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τις σύγχρονες (synchrouous) και τις ασύγχρονες ή επαγωγικές μηχανές. Οι σύγχρονες μηχανές, αντίθετα από τις επαγωγικές, χρησιμοποιούνται κυρίως ως γεννήτριες.

Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, όλων των κατηγοριών, έχουν την ίδια αρχή λειτουργίας. Σύμφωνα μ' αυτή, ο δρομέας του κινητήρα στρέφεται από τη ροπή, η οποία τείνει να ευθυγραμμίσει τα μαγνητικά πεδία του αναπτύσσουν τα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα.

Αν το μαγνητικό πεδίο του στάτη μπορούσε να στραφεί, τότε η αναπτυσσόμενη ροπή θα ανάγκαζε το δρομέα να ακολουθεί το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Επομένως, η λειτουργία όλων κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος στηρίζεται στη δυνατότητα παραγωγής από το τύλιγμα του στάτη ενός *στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου*.

Στους σύγχρονους κινητήρες η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι ίση με την ταχύτητα που στρέφεται το πεδίο του στάτη. Αντίθετα, στους ασύγχρονους κινητήρες, η ταχύτητα του δρομέα είναι μικρότερη από εκείνη του στρεφόμενου πεδίου του στάτη και εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου.

1.1. Κατασκευαστική Δομή των Μηχανών Εναλλασσομένου Ρεύματος

Στις μηχανές συνεχούς ρεύματος ο στάτης αποτελείται από το ζύγωμα, πάνω στον οποίο στηρίζονται οι μαγνητικοί πόλοι. Οι μαγνητικοί πόλοι προεξέχουν από το κυλινδρικό ζύγωμα και ονομάζονται έκτυποι πόλοι. Το τύλιγμα της διέγερσης, που φέρουν οι πόλοι του στάτη, τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα και παράγει ένα σταθερό και ομοιόμορφο μαγνητικό πεδίο. Το τύλιγμα του οπλισμού τοποθετείται σε αυλακώσεις, στον κυλινδρικό δρομέα.

Στις μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, με έμφαση τις σύγχρονες γεννήτριες, οι ρόλοι του στάτη και του δρομέα είναι αντεστραμμένοι, σε σχέση με τις μηχανές συνεχούς ρεύματος. Η μορφή του δρομέα αλλάζει δραστικά, ανάλογα με το είδος της μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος. Ο δρομέας των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί

να έχει κυλινδρική δομή με αυλακώσεις, εντός των οποίων τοποθετείται το τύλιγμα.



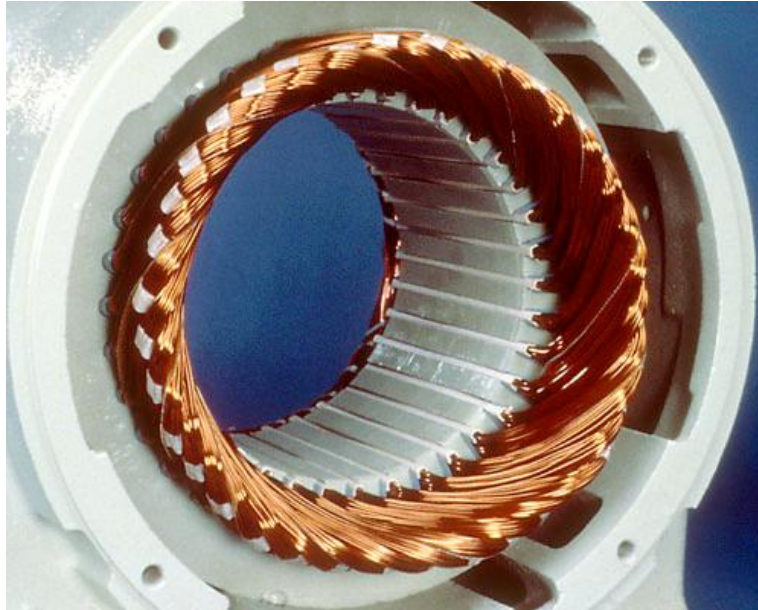
Εικόνα 3: Δρομέας μηχανής AC με αυλακώσεις

Εναλλακτικά, ο δρομέας μπορεί να έχει πόλους οι οποίοι να προεξέχουν (*salient pole rotor*), όπως οι πόλοι του στάτη στις μηχανές συνεχούς ρεύματος.



Εικόνα 4: Δρομέας μηχανής AC με έκτυπους πόλους

Αντίθετα από το δρομέα, ο στάτης όλων των μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος έχει την ίδια κατασκευαστική δομή. Ο στάτης είναι μια κυλινδρική δομή από ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους. Στο εσωτερικό του φέρει αυλακώσεις, μέσα στις οποίες τοποθετείται το τύλιγμα του στάτη, όπως εικονίζεται στην εικόνα 5



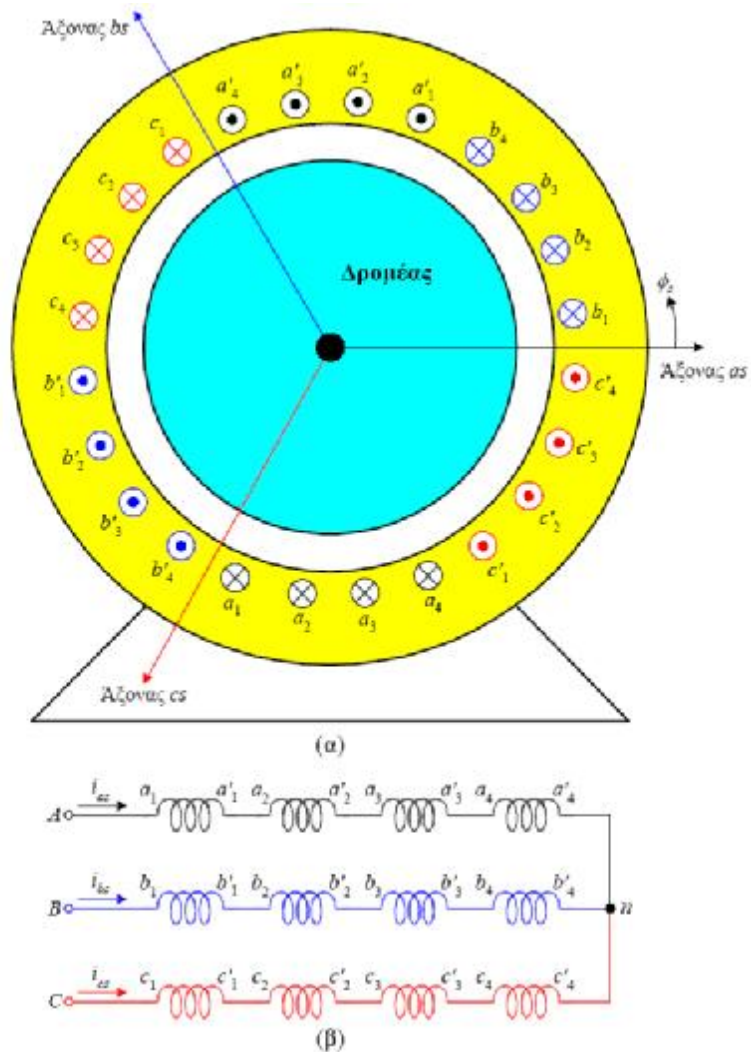
Εικόνα 5:Στάτης μιας μηχανής AC

Στη συνέχεια θεωρούμε ότι το τύλιγμα του στάτη είναι *τριφασικό*, οπότε η μηχανή χαρακτηρίζεται ως *τριφασική*. Όταν το τριφασικό τύλιγμα του στάτη διαρρέεται από ένα τριφασικό σύστημα ρευμάτων, αναπτύσσεται το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

Εκτός από τις τριφασικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος, υπάρχουν οι μονοφασικές και οι διφασικές. Οι μηχανές αυτές φέρουν στο στάτη μονοφασικό ή διφασικό τύλιγμα αντίστοιχα. Η χρήση τους είναι περιορισμένη, σε σχέση με τις τριφασικές μηχανές, εξαιτίας των λειτουργικών μειονεκτημάτων που παρουσιάζουν.

1.2. Το Στρεφόμενο Μαγνητικό Πεδίο

Όπως και στην ανάλυση των μηχανών συνεχούς ρεύματος, θεωρούμε αρχικά μια μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος, ο στάτης της οποίας φέρει ένα στοιχειώδες τριφασικό τύλιγμα. Το τύλιγμα του στάτη, όπως εικονίζεται στην εικόνα 6, δημιουργεί ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με δύο πόλους (διπολική μηχανή).

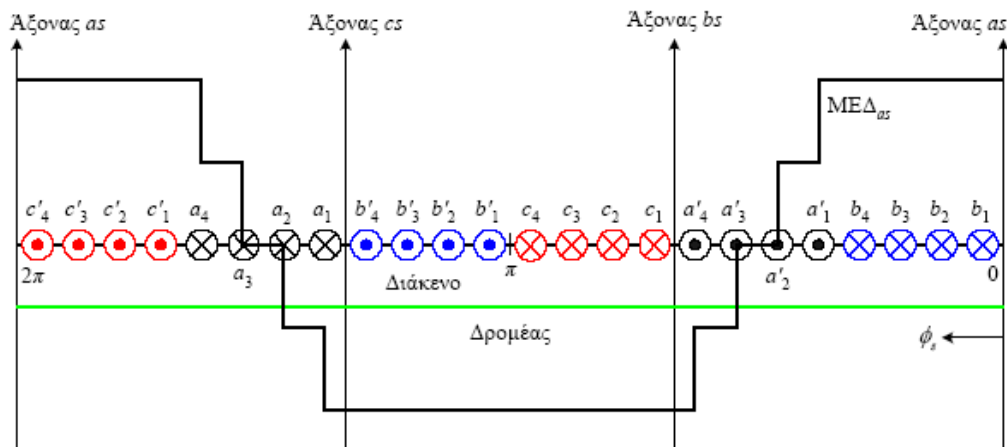


Εικόνα 6: Το τριφασικό τύλιγμα του στάτη σε σύνδεση αστέρα

Στην τριφασική μηχανή, η κάθε φάση του τυλίγματος είναι μετατοπισμένη κατά 120° , σε σχέση με τις άλλες δύο. Οι άξονες as , bs , cs , δηλώνουν τη θετική φορά των μαγνητικών πεδίων, που παράγουν τα τρία τυλίγματα μόνα τους. Τα τρία τυλίγματα έχουν την ίδια αντίσταση και τον ίδιο αριθμό σπειρών, οπότε το τριφασικό τύλιγμα του στάτη ονομάζεται συμμετρικό. Οι πλευρές των ομάδων, κάθε τυλίγματος είναι τοποθετημένες σε αυλάκια, τα οποία σχηματίζουν γωνία 180° στη διπολική μηχανή. Η φορά του ρεύματος σε κάθε πλευρά των ομάδων, οι οποίες αποτελούνται από ορισμένο αριθμό σπειρών, εικονίζεται στην εικόνα 6α. Τα άκρα των τεσσάρων ομάδων κάθε τυλίγματος συνδέονται σε σειρά, με τον τρόπο που εικονίζεται στην εικόνα 6β. Τα άκρα $a'4$, $b'4$ και $c'4$ από τα τρία τυλίγματα συνδέονται μεταξύ τους, στη σύνδεση αστέρα.

Στη στοιχειώδη μηχανή της εικόνα 6α, οι πλευρές των ομάδων κάθε τυλίγματος, είναι ομοιόμορφα κατανομημένες στην επιφάνεια του στάτη, σε γωνία 60° . Στις πραγματικές μηχανές, οι πλευρές των ομάδων κατανοούνται σε μεγαλύτερη γωνία. Έτσι, στην ίδια αυλάκωση τοποθετούνται οι πλευρές από δύο ομάδες. Επιπλέον, οι ομάδες δεν έχουν τον ίδιο αριθμό σπειρών. Το τύλιγμα της εικόνας 6α ονομάζεται *full-pitch*, επειδή οι αντίθετες πλευρές των ομάδων σχηματίζουν γωνία 180° (διπολική μηχανή). Συχνά, οι αντίθετες πλευρές των ομάδων σχηματίζουν γωνία μικρότερη από 180° , οπότε το τύλιγμα ονομάζεται *fractional-pitch*.

Στην εικόνα 7 εικονίζεται το ανάπτυγμα της στοιχειώδους μηχανής. Ως αρχή των αξόνων θεωρείται ο άξονας as στα δεξιά του σχήματος. Ακόμη, στην εικόνα 8 εικονίζεται η μαγνητεγερτική δύναμη ΜΕΔ, που αναπτύσσεται από το τύλιγμα της φάσης as . Η $ΜΕΔ_{as}$ μεταβάλλεται βηματικά στο κέντρο των αγωγών του τυλίγματος. Σημειώνουμε ότι, το μαγνητικό πεδίο διατρέχει ακτινικά το διάκενο. Η ακτινική διεύθυνση του πεδίου οφείλεται στο μικρό πλάτος του διακένου σχετικά με τη διάμετρο του δρομέα και τη μεγάλη μαγνητική του αντίσταση, σε σχέση με εκείνη του σιδήρου στο στάτη και το δρομέα. Η ΜΕΔ που αναπτύσσεται από το τύλιγμα bs ($ΜΕΔ_{bs}$) έχει την ίδια μορφή με την $ΜΕΔ_{as}$, αλλά είναι μετατοπισμένη κατά 120° προς τα αριστερά. Αντίστοιχα, η $ΜΕΔ_{cs}$ είναι μετατοπισμένη κατά 240° προς τα αριστερά ως προς την $ΜΕΔ_{as}$. Οι άξονες as , bs , cs , βρίσκονται στο μέσο της μέγιστης θετικής ΜΕΔ κάθε τυλίγματος.



Εικόνα 7: Το ανάπτυγμα της στοιχειώδους μηχανής

Οι κυματομορφές των ΜΕΔ που αναπτύσσουν τα τυλίγματα της στοιχειώδους μηχανής στο διάκενο, είναι μη ημιτονοειδείς συναρτήσεις της χωρικής γωνίας ϕ_s . Αυτό είναι ανεπιθύμητο, ιδιαίτερα στις μηχανές

μεγάλης ισχύος, γιατί προκαλεί την ανάπτυξη αρμονικών τάσεων και ρευμάτων. Για την παραγωγή ημιτονοειδούς ΜΕΔ στο διάκενο της μηχανής, τα τυλίγματα του στάτη πρέπει να έχουν ημιτονοειδή κατανομή, όπως εικονίζεται στην εικόνα 8α. Τότε, η ΜΕΔ έχει την ημιτονοειδή μορφή της εικόνας 8β και ορίζεται από την παρακάτω σχέση, για τη φάση as

$$ME\Delta_{as} = \frac{N_s}{2} \cdot i_{as} \cdot \cos\varphi_s$$

όπου i_{as} είναι το ρεύμα στη φάση as του τυλίγματος και N_s είναι ο ισοδύναμος αριθμός σπειρών ενός ημιτονοειδούς κατανεμημένου τυλίγματος, ο οποίος δίνει την ίδια θεμελιώδη συνιστώσα με το πραγματικό τύλιγμα. Οι ΜΕΔ που αναπτύσσονται από τα τυλίγματα των φάσεων bs και cs , ορίζονται από τις σχέσεις

$$ME\Delta_{bs} = \frac{N_s}{2} \cdot i_{bs} \cdot \cos(\varphi_s - 2\pi/3)$$

$$ME\Delta_{cs} = \frac{N_s}{2} \cdot i_{cs} \cdot \cos(\varphi_s + 2\pi/3)$$

Η ολική ΜΕΔ στο διάκενο, από τα τρία τυλίγματα, είναι ίση με το άθροισμα των επιμέρους ΜΕΔ

$$ME\Delta_s = \frac{N_s}{2} \left[i_{as} \cos\varphi_s + i_{bs} \cos\left(\varphi_s - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{cs} \cos\left(\varphi_s + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (1)$$

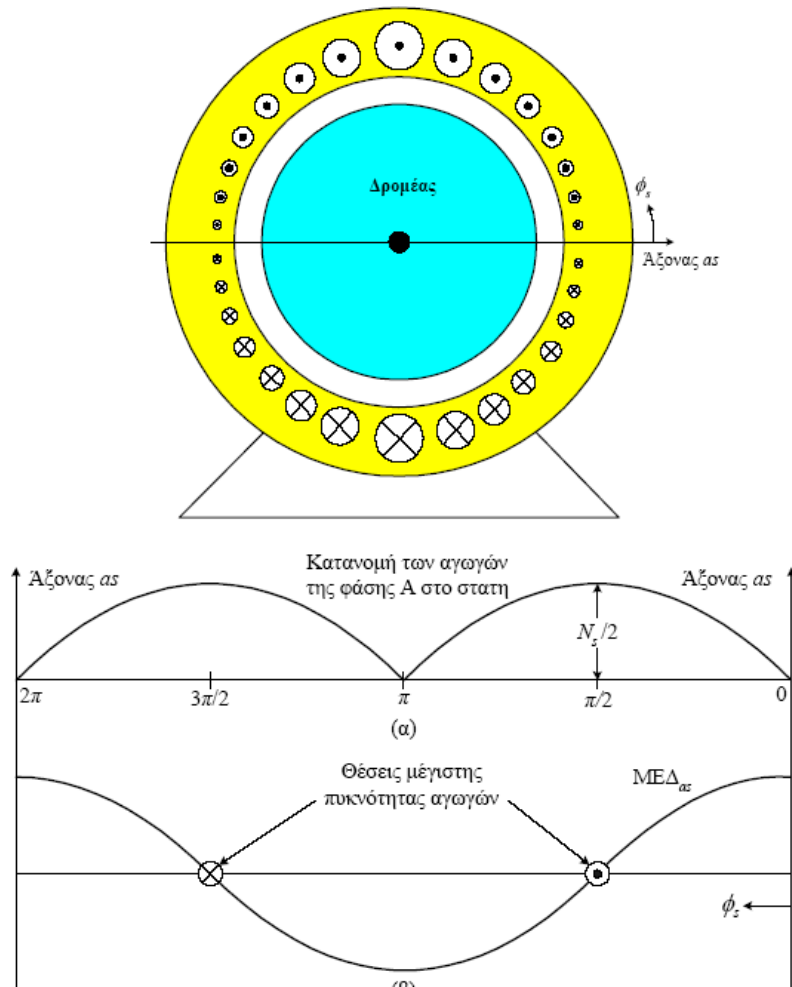
Τα συμμετρικά ρεύματα στο τριφασικό τύλιγμα της μηχανής, ορίζονται από τις σχέσεις

$$i_{as} = I_{ms} \cdot \cos(\omega_e \cdot t) \quad (2)$$

$$i_{bs} = I_{ms} \cdot \cos\left(\omega_e \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3)$$

$$i_{cs} = I_{ms} \cdot \cos\left(\omega_e \cdot t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4)$$

όπου ω_e είναι η κυκλική συχνότητα των ρευμάτων.



Εικόνα 8: Η ΜΕΔ που αναπτύσσεται από το τύλιγμα της φάσης as

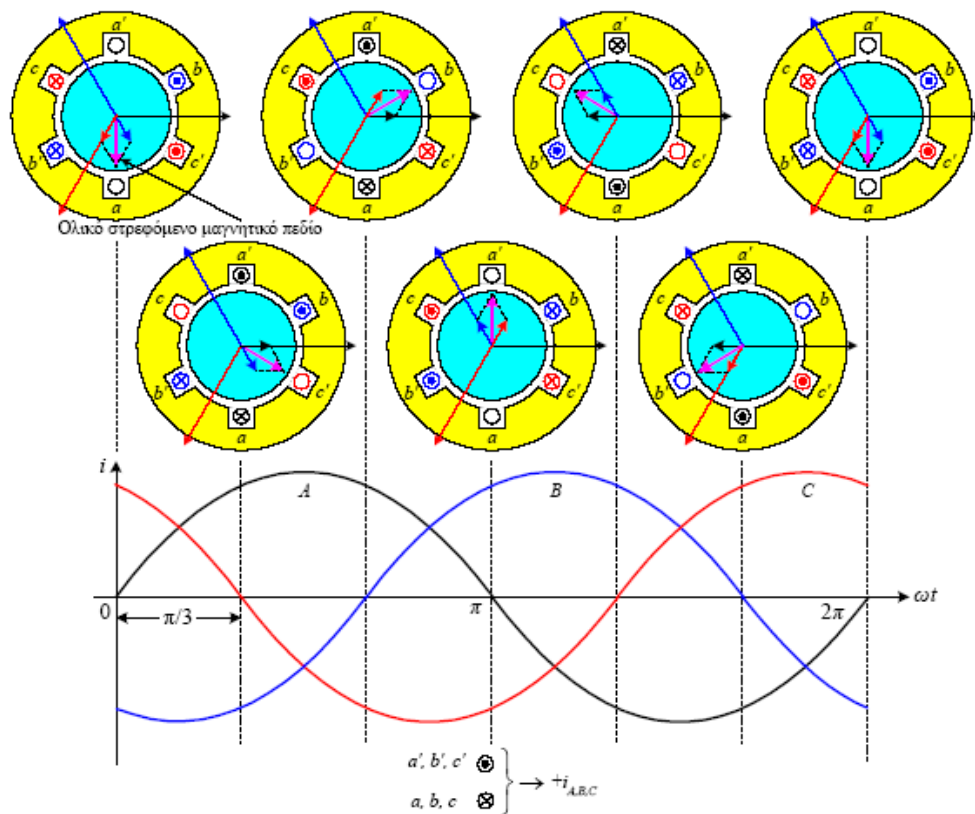
Αντικαθιστώντας τις Εξ. (2)–(4) στην Εξ.(1), ορίζεται η ολική ΜΕΔ στο διάκενο της μηχανής

$$ME\Delta_s = \frac{N_s}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot I_{ms} \cdot \cos(\omega_e \cdot t - \varphi_s)$$

Η παραπάνω εξίσωση παριστά μια ΜΕΔ με ημιτονοειδή κατανομή, η οποία στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω_e σε σχέση με το στάτη της μηχανής, με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού. Η ΜΕΔ έχει ένα ζεύγος πόλων. Επομένως, η ροή των τριφασικών ρευμάτων από το τριφασικό τύλιγμα του στάτη δημιουργήσει ένα μαγνητικό πεδίο, ο βόρειος και ο νότιος πόλος του οποίου κάνουν μια πλήρη περιστροφή σε κάθε περίοδο των ρευμάτων.

Η δημιουργία του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου γίνεται φανερή από την εικόνα 9. Η θετική φορά των ρευμάτων σε καθένα από τα τρία τυλίγματα του στάτη, αντιστοιχεί σ' εκείνη της εικόνας 6α. Κάθε τύλιγμα από τη ροή του αντίστοιχου ρεύματος παράγει ένα μαγνητικό πεδίο, η θετική φορά του οποίου (βόρειος πόλος) εικονίζεται στην εικόνα 9 και είναι ίδια μ' εκείνη της εικόνας 6α.

Στην εικόνα 9 εικονίζονται τα μαγνητικά πεδία που παράγει κάθε τύλιγμα του στάτη μόνο του, καθώς και το ολικό πεδίο της μηχανής σε επτά διακριτές χρονικές στιγμές, οι οποίες αντιστοιχούν σε γωνίες των ρευμάτων 60° . Η διαδοχή φάσης των ρευμάτων είναι ABC . Παρατηρούμε ότι στη διπολική μηχανή που εξετάζουμε το ολικό μαγνητικό πεδίο στρέφεται κατά 60 μηχανικές μοίρες σε κάθε 60° μεταβολή της φασικής γωνίας των ρευμάτων με αντι-ωρολογιακή φορά. Αν η σειρά διαδοχής φάσης των ρευμάτων αντιστραφεί, τότε θα αντιστραφεί και η φορά περιστροφής του μαγνητικού πεδίου (ωρολογιακή).



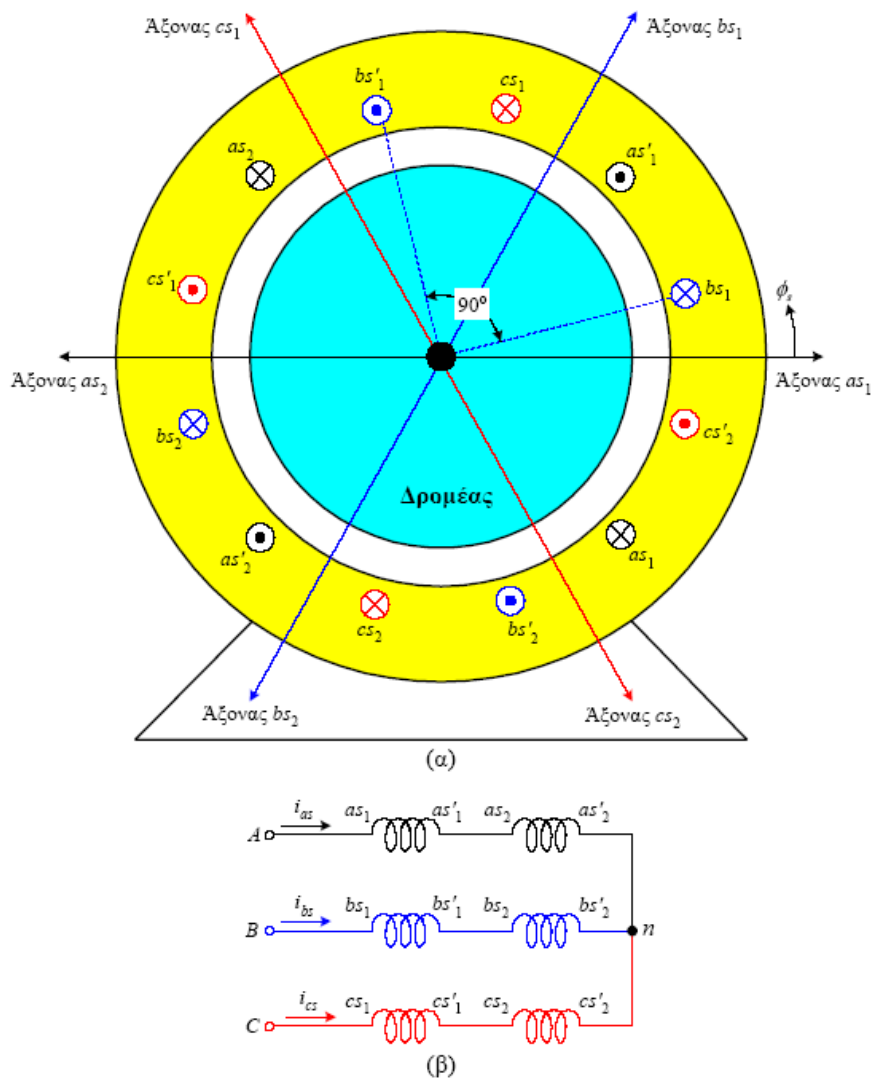
Εικόνα 9: Η δημιουργία του στρεφόμενου Μαγνητικού Πεδίου

Στην εικόνα 10 εικονίζονται τα τυλίγματα του στάτη σε μια τετραπολική μηχανή. Το τύλιγμα της κάθε φάσης αποτελείται από δύο

επιμέρους τυλίγματα, τα οποία συνδέονται σε σειρά. Τα τρία τυλίγματα συνδέονται σε αστέρα. Οι αντίθετες πλευρές των ομάδων κάθε τυλίγματος σχηματίζουν γωνία 90°. Η ΜΕΔ που αναπτύσσεται στο διάκενο των μηχανών με P πόλους, ορίζεται με αντίστοιχο τρόπο από τη σχέση

$$ME\Delta_s = \frac{N_s}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot I_{ms} \cdot \cos(\omega_e \cdot t - \frac{P}{2} \varphi_s)$$

Η ταχύτητα περιστροφής της ΜΕΔ είναι μειωμένη και ίση με $\omega_e / (\frac{P}{2})$. Η ταχύτητα της ΜΕΔ ονομάζεται *σύγχρονη ταχύτητα*. Το μαγνητικό πεδίο αποτελείται από P πόλους.



Εικόνα 10: Τα τυλίγματα του στάτη σε μια τετραπολική μηχανή

1.3. Η ολίσθηση

Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του στάτη, εξαρτάται από τη συχνότητα των ρευμάτων τροφοδοσίας f και τον αριθμό των πόλων P , ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα n_s και ορίζεται από την παρακάτω σχέση σε rpm

$$n_s = \frac{120 \cdot f_e}{P}$$

Στον επαγωγικό κινητήρα, η ανάπτυξη της ροπής οφείλεται στην αλληλεπίδραση των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα. Όμως, το πεδίο του δρομέα οφείλεται στις τάσεις εξ επαγωγής, οι οποίες αναπτύσσονται στο δρομέα μόνο όταν υπάρχει σχετική κίνηση μεταξύ του δρομέα και του στρεφόμενου πεδίου. Επομένως, η ταχύτητα του δρομέα δεν μπορεί να είναι ίση με τη σύγχρονη, καθώς τότε δεν θα επάγονταν τάσεις στο δρομέα, με συνέπεια το ρεύμα και η ροή του δρομέα να ήταν μηδενικά. Έτσι, η ροπή θα μηδενίζονταν και η ταχύτητα του κινητήρα θα μειώνονταν σε μια τιμή μικρότερη από τη σύγχρονη. Η διαφορά της ταχύτητας του δρομέα n_r από τη σύγχρονη n_s ονομάζεται *ταχύτητα ολίσθησης (slip speed)* και ορίζεται από τη σχέση

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

Η ποσοστιαία διαφορά της ταχύτητας του κινητήρα από τη σύγχρονη ταχύτητα ονομάζεται *ολίσθηση (slip)*

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \cdot 100\%$$

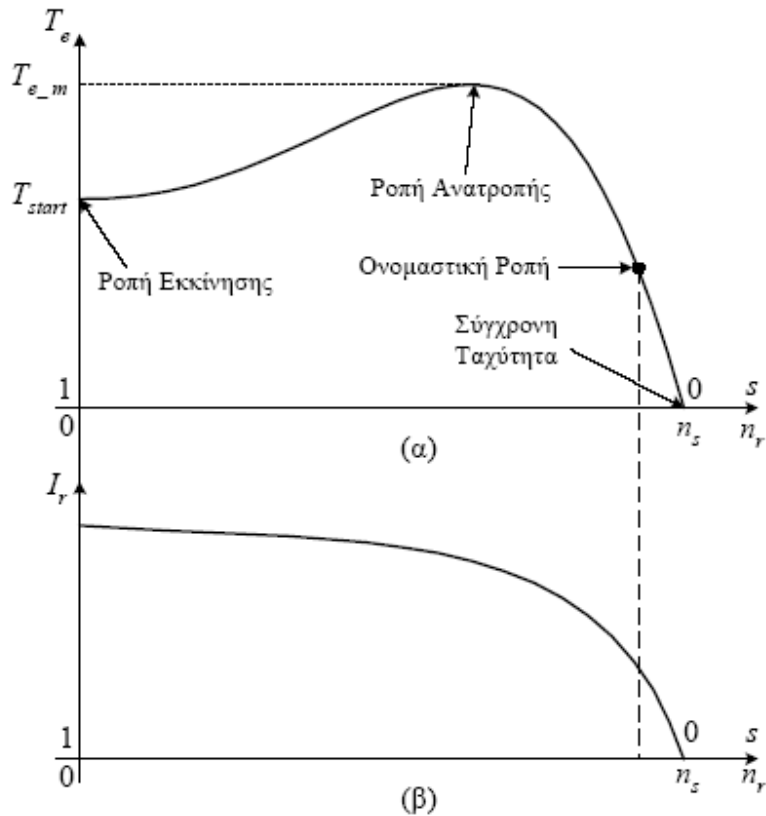
Όταν ο κινητήρας είναι ακίνητος, η ολίσθηση είναι ίση με τη μονάδα ($s = 1$). Αν ο δρομέας στρέφονταν με τη σύγχρονη ταχύτητα, η ολίσθηση θα ήταν μηδέν ($s = 0$). Από την Εξ. (5.18) προκύπτει η παρακάτω σχέση της ταχύτητας του κινητήρα, ως συνάρτηση της σύγχρονης ταχύτητας και της ολίσθησης

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

Η ονομασία ασύγχρονος κινητήρας, προέρχεται από τη διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από τη σύγχρονη, η οποία είναι ανάλογη με τη ροπή του φορτίου.

1.4. Χαρακτηριστική Ταχύτητας-Ροπής

Η ροπή που αναπτύσσει ένας επαγωγικός κινητήρας μεταβάλλεται με την ταχύτητα, με τον τρόπο που εικονίζεται στην εικόνα 11α.



**Εικόνα 11: Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας(α)
Μεταβολή του ρεύματος δρομέα με την ταχύτητα(β)**

Προκειμένου να ερμηνεύσουμε τη χαρακτηριστική αυτή, θεωρούμε ότι ο κινητήρας λειτουργεί αρχικά χωρίς φορτίο (Εικόνα 12α). Τότε, η ταχύτητα του κινητήρα είναι περίπου ίση με τη σύγχρονη. Το μαγνητικό πεδίο του στάτη \mathbf{B}_{sr} παράγεται από το ρεύμα I_s . Το ολικό μαγνητικό πεδίο \mathbf{B}_m είναι ανάλογο με το ρεύμα μαγνήτισης I_m . Το ρεύμα μαγνήτισης εξαρτάται από την τάση E , όταν ο κινητήρας είναι ακόρεστος. Επειδή η πτώση τάσης στη σύνθετη αντίσταση του στάτη είναι πολύ μικρή, η τάση E είναι σταθερή και περίπου ίση με την τάση τροφοδοσίας V . Επομένως, το ολικό μαγνητικό πεδίο στο διάκενο του κινητήρα είναι σταθερό και ανεξάρτητο από τη ροπή του φορτίου. Η τάση που επάγεται στο τύλιγμα του δρομέα E_r είναι πολύ μικρή, εξαιτίας της μικρής ολίσθησης. Έτσι, το ρεύμα του δρομέα I_r και το πεδίο που αυτό αναπτύσσει \mathbf{B}_{rs} , είναι μικρά. Επειδή η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων είναι μικρή, η αντίδραση του δρομέα είναι πολύ

μικρή σε σχέση με την ωμική του αντίσταση και η διαφορά φάσης μεταξύ I_r και E_r είναι ελάχιστη. Μολονότι το ρεύμα του δρομέα είναι πολύ μικρό στη λειτουργία χωρίς φορτίο, το ρεύμα τροφοδοσίας του στάτη είναι αρκετά μεγάλο, καθώς παρέχει το ρεύμα μαγνήτισης. Το μέτρο της αναπτυσσόμενης ροπής δίνεται από τη σχέση

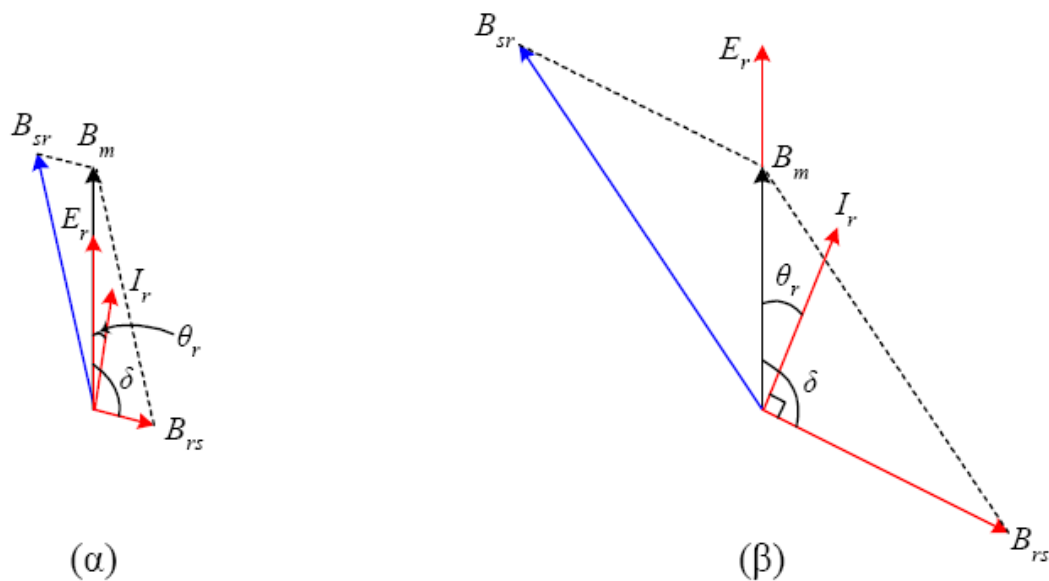
$$T_e = C_T \cdot B_m \cdot B_{rs} \cdot \sin\delta$$

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

Όταν η ροπή του φορτίου αυξηθεί στην ονομαστική τιμή, η ταχύτητα του κινητήρα μειώνεται και η ολίσθηση αυξάνει. Έτσι, η τάση που επάγεται στο δρομέα αυξάνεται. Η αυξημένη τάση E_r προκαλεί την αύξηση του ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου στο δρομέα. Ταυτόχρονα, η αύξηση της συχνότητας στο δρομέα έχει ως αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη διαφορά φάσης μεταξύ των E_r και I_r (Εικόνα 12β). Η αύξηση του πεδίου B_{rs} τείνει να αυξήσει την αναπτυσσόμενη ροπή. Αντίθετα, η αύξηση της γωνίας δ , η οποία είναι μεγαλύτερη από 90° , τείνει να μειώσει τη ροπή. Καθώς η επίδραση του πεδίου είναι μεγαλύτερη από την επίδραση της γωνίας, η ροπή αυξάνεται.

Η επίδραση του μαγνητικού πεδίου του δρομέα B_{rs} υπερισχύει της γωνίας δ , μέχρι μια τιμή του φορτίου, η οποία αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή (Εικόνα 11α). Η μέγιστη ροπή ονομάζεται *ροπή ανατροπής*. Η ροπή ανατροπής είναι 2 έως 3 φορές μεγαλύτερη της ονομαστικής. Όταν η ροπή του φορτίου γίνει μεγαλύτερη από τη ροπή ανατροπής, η επίδραση του $\sin\delta$ είναι εντονότερη από εκείνη του μαγνητικού πεδίου και η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας μειώνεται. Το αποτέλεσμα στην περίπτωση αυτή είναι ο κινητήρας να σταματήσει (παθητικό φορτίο).

Η μεταβολή του ρεύματος του δρομέα με την ταχύτητα εικονίζεται στην εικόνα 11β. Σε μικρές τιμές της ολίσθησης, η μεταβολή του ρεύματος στο δρομέα και της ροπής είναι γραμμική με την ολίσθηση.



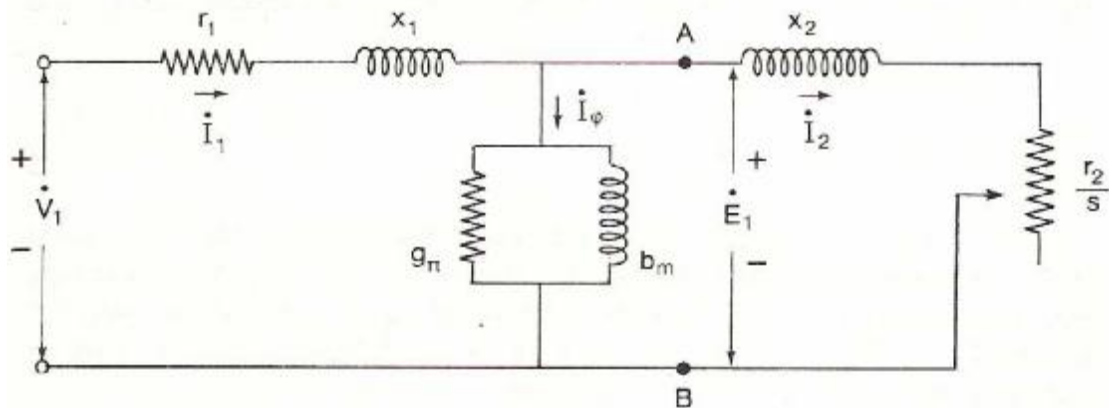
**Εικόνα 12: Διανυσματικό διάγραμμα κινητήρα χωρίς φορτίο(α)
Με φορτίο(β)**

Σε ροπές μεγαλύτερες από την ονομαστική, η συχνότητα των ρευμάτων στο δρομέα είναι αρκετά μεγάλη. Έτσι, ο συντελεστής ισχύος του δρομέα $\cos\theta_r$ μειώνεται. Η μεταβολή του ρεύματος του δρομέα και της ροπής περιορίζεται, σε ροπές μεγαλύτερες από την ονομαστική. Σε ροπές υψηλότερες από τη ροπή ανατροπής, ο συντελεστής ισχύος του δρομέα γίνεται πολύ μικρός και η ροπή μειώνεται αντί να αυξάνει. Ακόμη, το ρεύμα του δρομέα είναι περίπου σταθερό.

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

1.5. Ισοδύναμο κύκλωμα

Οι μηχανές επαγωγής έχουν μόνο συμμετρικά τριφασικά τυλίγματα τα οποία διεγείρονται από συμμετρικές πολυφασικές τάσεις. Μελετούμε τη μία φάση μόνο εφόσον όλες οι φάσεις συμπεριφέρονται κατά τον ίδιο τρόπο και η μόνη διάκριση μεταξύ τους είναι η χαρακτηριστική διαφορά φάσης χρόνου. Το τύλιγμα στάτη θεωρείται συνδεδεμένο κατ'αστέρα. Επίσης θεωρείται ότι όλα τα ρεύματα και οι τάσεις έχουν ημιτονοειδή μορφή κύματος. Οι επιδράσεις των αρμονικών χώρου στη διανομή της ροής αγνοούνται, ενώ λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό των αντιδράσεων σκέδασης στάτη και δρομέα. Το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα δίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 13: Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα

Τα μεγέθη που παριστάνονται στο ισοδύναμο κύκλωμα είναι τα εξής:

V_1 τάση ακροδεκτών στάτη

E_1 αντι-ΗΕΔ που αναπτύσσεται από τη συνισταμένη ροή διακένου

I_1 ρεύμα στάτη

r_1 πραγματική αντίσταση στάτη

X_1 αντίδραση σκέδασης στάτη

I_ϕ συνιστώσα ρεύματος διέγερσης

I_π συνιστώσα απωλειών πυρήνα

I_m συνιστώσα μαγνήτισης

g_m αγωγιμότητα απωλειών πυρήνα

b_m μαγνητίζουσα αγωγιμότητα

I_2 συνιστώσα φορτίου

X_2 αντίδραση σκεδάσεως δρομέα ανοιγμένοι στη συχνότητα στάτη

$r_{2/s}$ ανακλώμενη αντίσταση, συνδυασμένη επίδραση του φορτίου στον άξονα και της αντιστάσεως του δρομέα.

Ισχύει η σχέση:

$$V_1 = E_1 + I_1 \cdot (r_1 + jX_1)$$

Επισημαίνεται ότι όταν τα ρεύματα και οι τάσεις του δρομέα ανακλώνται στο στάτη ,η συχνότητα τους μετατρέπεται σε συχνότητα στάτη. Όλα τα ηλεκτρικά φαινόμενα του δρομέα, όταν παρατηρούνται στο στάτη , γίνονται φαινόμενα συχνότητας στάτη, διότι το τύλιγμα του στάτη απλώς βλέπει κύματα ΜΕΔ και ροής να οδεύουν στη σύγχρονη ταχύτητα.

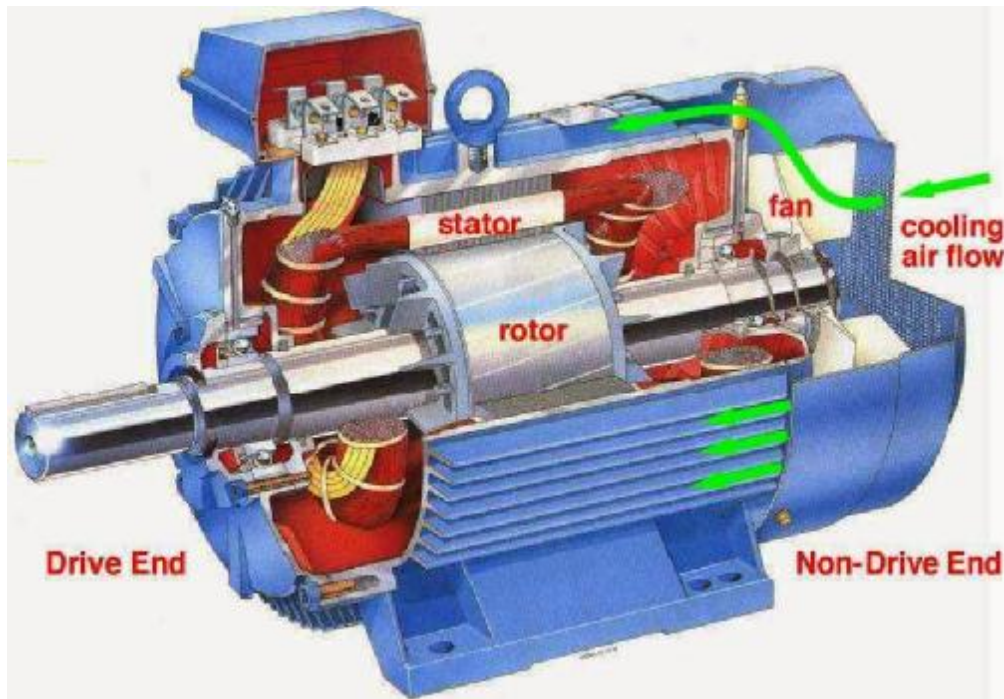
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

2.1. Είδη επαγωγικών κινητήρων

Οι επαγωγικοί κινητήρες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την κατασκευαστική δομή του δρομέα τους: σε κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα ή κλωβό (*squirrel cage rotor*) και σε κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα (*wound rotor*).

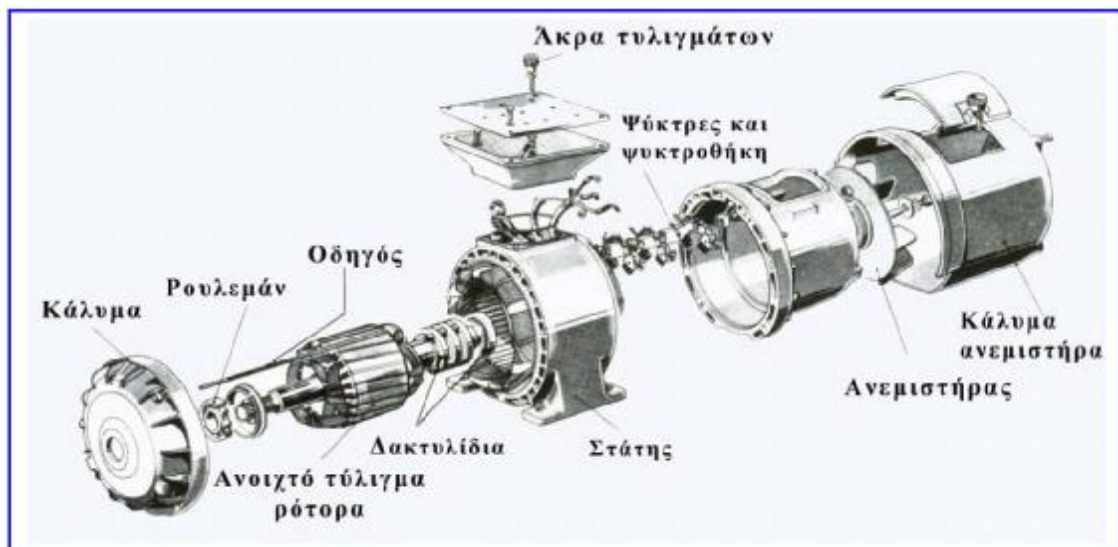
Οι κινητήρες με βραχυκυκλωμένο κλωβό είναι οι πλέον διαδεδομένοι. Ο δρομέας των κινητήρων αυτών αποτελείται από ελάσματα μονωμένα μεταξύ τους, τα οποία προσαρμόζονται στον άξονα. Τα ελάσματα φέρουν οδοντώσεις, οι οποίες σχηματίζουν αυλάκια κατά μήκος του δρομέα. Η γεωμετρική μορφή των αυλακώσεων καθορίζει την ηλεκτρική συμπεριφορά του κινητήρα, δηλαδή τη χαρακτηριστική ταχύτητας-ροπής. Στα αυλάκια του δρομέα τοποθετούνται ράβδοι από χαλκό ή ορείχαλκο, τα άκρα των οποίων συνδέονται μεταξύ τους με δακτυλίους βραχυκύκλωσης. Έτσι, σχηματίζεται το τύλιγμα κλωβού του δρομέα.



Εικόνα 14: Κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού

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

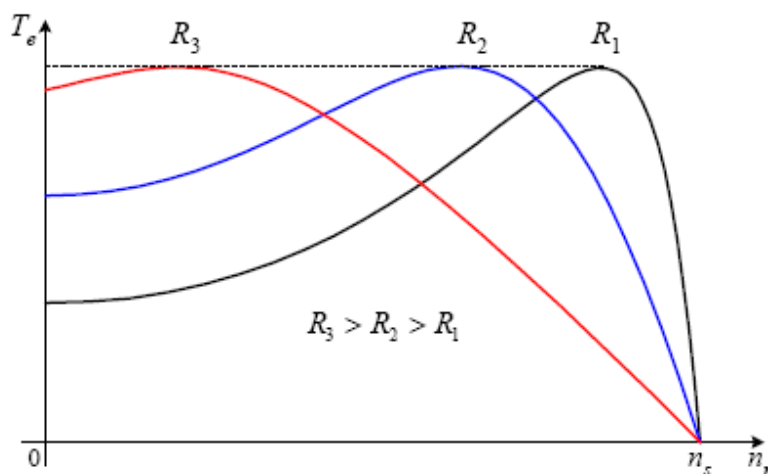
Ο δρομέας των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα φέρει αυλακώσεις, μέσα στις οποίες τοποθετείται ένα τριφασικό τύλιγμα, αντίστοιχο μ' εκείνο του στάτη. Οι τρεις φάσεις του τυλίγματος στο δρομέα συνδέονται σχεδόν πάντα σε αστέρα. Τα τρία άκρα του τυλίγματος αστέρα καταλήγουν σε ισάριθμους δακτυλίους, που φέρει ο δρομέας. Μέσω των δακτυλίων και των ψηκτρών που εφάπτονται σ' αυτούς, είναι δυνατή η σύνδεση ρυθμιστικών αντιστάσεων στο τύλιγμα του δρομέα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η τροποποίηση της χαρακτηριστικής ταχύτητας-ροπής του κινητήρα, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας.



Εικόνα 15:Κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα

2.2. Κλάσεις των επαγωγικών κινητήρων

Η μορφή της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων εξαρτάται από την ωμική αντίσταση του δρομέα και την ολική αντίδραση σκέδασης. Ένας επαγωγικός κινητήρας με μεγάλη αντίσταση στο δρομέα, εμφανίζει τη μέγιστη ροπή σε μικρή ταχύτητα και έχει υψηλή ροπή εκκίνησης. Όμως, οι απώλειες ισχύος στην ονομαστική λειτουργία είναι υψηλές, εξαιτίας της μεγάλης ολίσθησης $P_{cu,r} = sP_{ag}$. Αντίθετα, ένας κινητήρας με μικρή αντίσταση στο δρομέα παρουσιάζει μικρή ροπή εκκίνησης, μεγάλο ρεύμα εκκίνησης, αλλά και υψηλό βαθμό απόδοσης στην ονομαστική λειτουργία. Ταυτόχρονα, η μεταβολή της ταχύτητας με το φορτίο είναι περιορισμένη. Ο συνδυασμός της επιθυμητής υψηλής αντίστασης κατά την εκκίνηση και της μικρής αντίστασης στην κανονική λειτουργία, επιτυγχάνεται ιδανικά στους κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα. Κατά την εκκίνηση των κινητήρων δακτυλιοφόρου δρομέα, προστίθενται εξωτερικές αντιστάσεις σε σειρά με το τύλιγμα του δρομέα, το οποίο έχει μικρή αντίσταση. Οι αντιστάσεις αυτές αφαιρούνται στην κανονική λειτουργία του κινητήρα. Με τον τρόπο αυτό οι χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας του κινητήρα μεταβάλλονται όπως στην εικόνα 16



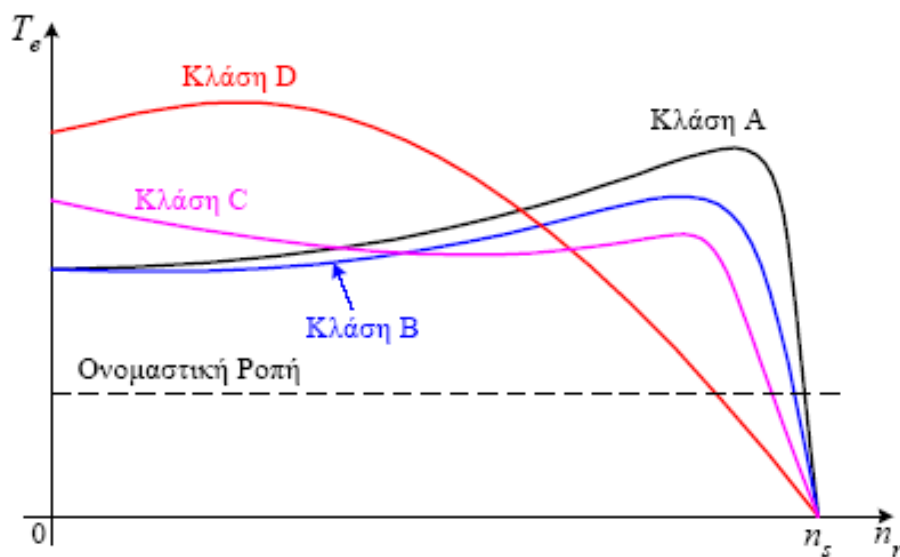
Εικόνα 16: Διαφοροποίηση της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας με την αλλαγή αντίστασης του δρομέα

Η επιθυμητή μεταβολή της αντίστασης του δρομέα ανάλογα με την τιμή της ολίσθησης, μπορεί να επιτευχθεί και στους κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού, με την κατάλληλη σχεδίαση των αυλακώσεων του δρομέα. Όταν οι αυλακώσεις είναι κοντά στην επιφάνεια του δρομέα, οι ράβδοι του τυλίγματος κλωβού είναι σε ισχυρή σύζευξη με το τύλιγμα του στάτη. Επομένως, μόνο ένα μικρό

τμήμα της ροής δεν συνδέει το τύλιγμα του στάτη. Έτσι, η αντίδραση σκέδασης του δρομέα είναι μικρή.

Αντίθετα, όταν οι ράβδοι είναι τοποθετημένες βαθιά μέσα στο δρομέα, η ροή και η αντίδραση σκέδασης του δρομέα είναι υψηλές. Η ωμική αντίσταση του τυλίγματος κλωβού εξαρτάται από το μέγεθος των αυλακώσεων, η οποία επιβάλλει τη διατομή των ράβδων. Όσο μεγαλύτερη είναι η διατομή των ράβδων, τόσο μικρότερη είναι η ωμική αντίσταση του κλωβού.

Οι επαγωγικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα με τη διαμόρφωση των αυλακώσεων του δρομέα, οι οποίες ονομάζονται *κλάσεις σχεδίασης*. Στους κινητήρες κλάσης A, η διαμόρφωση των αυλακώσεων επιβάλλει τη χρήση ράβδων μεγάλης διατομής, οι οποίες βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του δρομέα. Έτσι, το τύλιγμα κλωβού εμφανίζει μικρή αντίσταση και μικρή αντίδραση. Οι κινητήρες κλάσης A έχουν μικρή ροπή εκκίνησης και μεγάλο ρεύμα εκκίνησης. Όμως, η ολίσθηση του κινητήρα στο ονομαστικό φορτίο είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα ο βαθμός απόδοσης να είναι υψηλός. Η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας του κινητήρα εικονίζεται στην εικόνα 17.



Εικόνα 17: Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας για τις τέσσερις κλάσεις του επαγωγικού κινητήρα

Στους κινητήρες κλάσης D, οι ράβδοι του κλωβού βρίσκονται και πάλι κοντά στην επιφάνεια του δρομέα αλλά έχουν μικρή διατομή. Έτσι, η αντίσταση του κλωβού είναι μεγάλη, ενώ η αντίδραση σκέδασης είναι μικρή. Ως αποτέλεσμα, οι κινητήρες κλάσης D έχουν μεγάλη ροπή

εκκίνησης και μικρό ρεύμα εκκίνησης. Όμως, η ολίσθηση στο ονομαστικό φορτίο είναι μεγάλη, με αποτέλεσμα τις υψηλές απώλειες στο δρομέα και το μικρό βαθμό απόδοσης. Επιπλέον, η διακύμανση της ταχύτητας με το φορτίο είναι σημαντική.

Η αντίσταση του δρομέα στους κινητήρες κλάσης A και D είναι σταθερή. Αντίθετα, στους κινητήρες με κλάση σχεδίασης B και C, η αντίσταση του δρομέα μεταβάλλεται με την ολίσθηση (ταχύτητα). Έτσι, οι κινητήρες αυτοί συνδυάζουν την υψηλή ροπή εκκίνησης των κινητήρων κλάσης D και τον υψηλό βαθμό απόδοσης στην ονομαστική λειτουργία των κινητήρων κλάσης A.

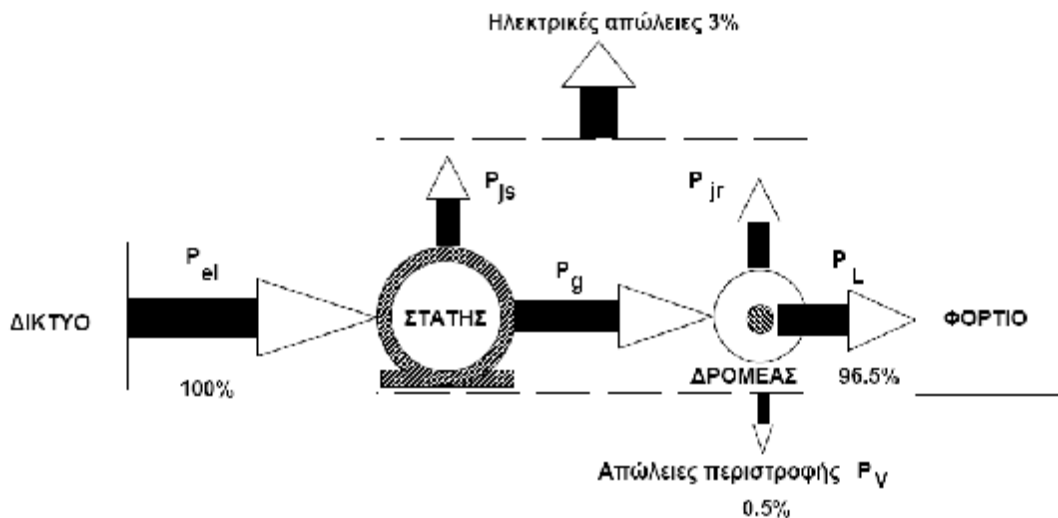
Στους κινητήρες με κλάση B, η μεταβολή της αντίστασης του δρομέα με την ολίσθηση, επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας το δρομέα με *βαθιά αυλάκια*. Στην ονομαστική λειτουργία, όπου η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων στο δρομέα είναι μικρή, το ρεύμα ρέει ομοιόμορφα σ' όλη τη διατομή των ράβδων. Έτσι, η ενεργός διατομή των ράβδων είναι μεγάλη και η αντίσταση του δρομέα μικρή, όπως στους κινητήρες κλάσης A. Κατά την εκκίνηση, όπου η συχνότητα των επαγόμενων τάσεων είναι μεγάλη, οι αντιδράσεις σκέδασης των ράβδων είναι υψηλές. Το ρεύμα του δρομέα ρέει μόνο από τις περιοχές των ράβδων που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του δρομέα, οι οποίες έχουν μικρές αντιδράσεις. Με τον τρόπο αυτό η ενεργός διατομή των ράβδων μειώνεται και η αντίσταση του δρομέα εμφανίζεται αυξημένη κατά την εκκίνηση, όπως στους κινητήρες κλάσης D. Η ροπή εκκίνησης των κινητήρων τάξης B είναι σχεδόν ίση μ' εκείνη των κινητήρων τάξης A, αλλά το ρεύμα εκκίνησης είναι μειωμένο κατά 25% περίπου. Στους κινητήρες κλάσης C, η μεταβολή της αντίστασης του δρομέα με την ταχύτητα είναι εντονότερη και επιτυγχάνεται κατασκευάζοντας το δρομέα με *διπλό κλωβό*. Ο κινητήρας φέρει ένα τύλιγμα κλωβού, το οποίο αποτελείται από ράβδους μεγάλης διατομής τοποθετημένες στο εσωτερικό του δρομέα. Ένας δεύτερος ανεξάρτητος κλωβός από ράβδους μικρής διατομής, βρίσκεται στην επιφάνεια του δρομέα. Στην κανονική λειτουργία του κινητήρα, το ρεύμα του δρομέα ρέει και από τα δύο τυλίγματα κλωβού και ο κινητήρας εμφανίζει μικρή αντίσταση στο δρομέα. Κατά την εκκίνηση, το ρεύμα κυκλοφορεί κυρίως από το εξωτερικά τοποθετημένο τύλιγμα κλωβού, με την υψηλή αντίσταση. Το μειονέκτημα των κινητήρων με διπλό κλωβό είναι το μεγαλύτερο κόστος κατασκευής τους, σε σχέση με τις υπόλοιπους κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα.

2.3. Εφαρμογές επαγωγικών ηλεκτρικών μηχανών

Η προηγούμενη ανάλυση στηρίχθηκε στη λειτουργία της επαγωγικής ηλεκτρικής μηχανής σαν κινητήρα, συσκευής δηλαδή που μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Η εφαρμογή αυτή είναι και η πιο διαδεδομένη. Η επαγωγική ηλεκτρική μηχανή όμως, όπως και κάθε άλλη ηλεκτρική μηχανή, μπορεί να λειτουργήσει αντίστροφα, σαν γεννήτρια, μετατρέποντας μηχανική ισχύ σε ηλεκτρική. Επιπλέον μια ιδιαίτερη εφαρμογή του επαγωγικού κινητήρα, είναι η λειτουργία του σαν πέδη. Οι παραπάνω εφαρμογές παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

2.3.1. Λειτουργία κινητήρα

Όταν η επαγωγική μηχανή λειτουργεί σαν κινητήρας, τροφοδοτείται με ηλεκτρική ισχύ στο στάτη και τη μετατρέπει σε κινητήρια ροπή στον άξονα του δρομέα. Το πεδίο που δημιουργείται από τα τυλίγματα του στάτη στρέφεται στο διάκενο με τη σύγχρονη ταχύτητα, επάγοντας ρεύματα στον ακίνητο βραχυκυκλωμένο δρομέα.



Εικόνα 18: Λειτουργία της μηχανής ως κινητήρας

Η αλληλεπίδραση των πεδίων στάτη και δρομέα, αναπτύσσει ροπή στο δρομέα, κατά τη φορά περιστροφής του πεδίου του στάτη και τον αναγκάζει να κινηθεί προς την ίδια κατεύθυνση. Σχεδόν άμεσα ο δρομέας αποκτά την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του, που υπολείπεται της σύγχρονης ω κατά s , όπου s η ολίσθηση του κινητήρα.

Συνεπώς

$$s = \frac{\omega - \omega_m}{\omega}$$

και $\omega_m < \omega$, άρα $1 > s > 0$ και συνήθως λιγότερο από 0.1. Η ροπή T_m , που αναπτύσσεται στο δρομέα, όπως προκύπτει από τη (1.16), μπορεί να θεωρηθεί ίση με τη ροπή του φορτίου T_L , αγνοώντας τις απώλειες περιστροφής. Τότε η ισχύς που μεταφέρεται μέσα από το διάκενο από το στάτη στο δρομέα και δίνεται από τη (1.11) είναι:

$$P_g = \omega \cdot T_m$$

Αντίστοιχα η μηχανική ισχύς που αποδίδεται στο φορτίο από τον άξονα του κινητήρα, που στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω_m , θα είναι

$$P_L = \omega_m \cdot T_m = \omega(1 - s)T_m$$

Οι απώλειες ισχύος του κινητήρα προκύπτουν προφανώς από τη διαφορά των (1.19) και (1.20) δηλαδή

$$P_{jr} = P_g - P_L = \omega \cdot T_m - \omega(1 - s)T_m = s \cdot \omega \cdot T_m = s \cdot P_g$$

Συνεπώς κατά τη λειτουργία κινητήρα, η ισχύς που απορροφά ο κινητήρας από το δίκτυο $P_{el} > 0$, σύμφωνα με τη σύμβαση καταναλωτή, ενώ αντίστοιχα θετικές είναι οι P_g, T_m . Για την ολίσθηση s ισχύει ότι $1 > s > 0$ και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής είναι πάντα μικρότερη της σύγχρονης, $\omega_m < \omega$. Το ισοζύγιο της ισχύος του επαγωγικού κινητήρα φαίνεται παραστατικά στην εικόνα 18

2.3.2. Λειτουργία γεννήτριας

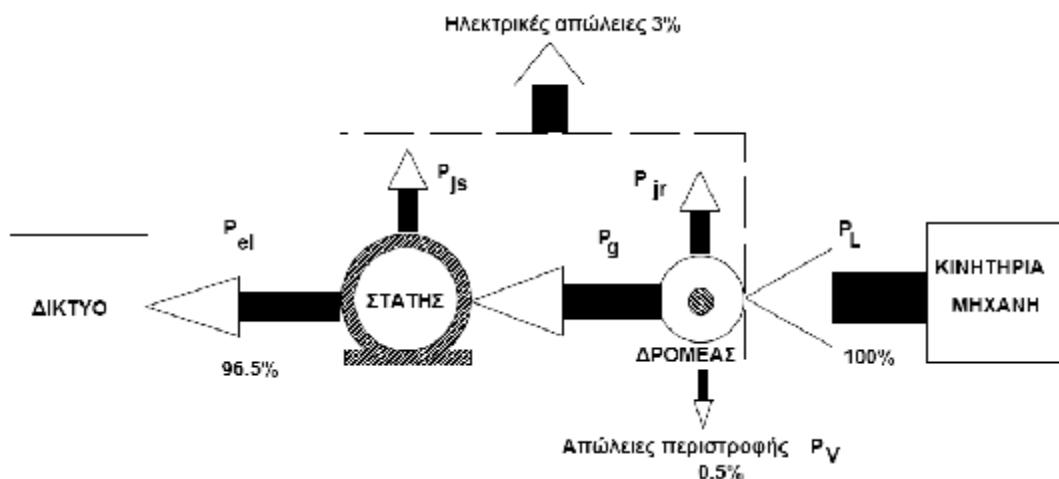
Εξετάζεται στη συνέχεια η περίπτωση που ο άξονας ενός επαγωγικού κινητήρα συνδέεται σε μια κινητήρια μηχανή. Η μηχανή αυτή μπορεί να είναι τα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας που στρέφονται από τον άνεμο, μια ντηζελομηχανή, ή ακόμη και ένα όχημα που κινείται σε μια κατηφόρα. Ο στάτης του κινητήρα συνδέεται σε ένα τριφασικό δίκτυο. Ο άξονας του κινητήρα, υπό την επίδραση της κινητήριας μηχανής, επιταχύνεται και αρχίζει να περιστρέφεται με μηχανική ταχύτητα μεγαλύτερη της σύγχρονης. Τη στιγμή που η ταχύτητα περιστροφής ξεπερνά τη σύγχρονη ταχύτητα, το στρεφόμενο πεδίο του στάτη αναπτύσσει μια αρνητική ροπή που τείνει να φρενάρει την κίνηση του άξονα, εμποδίζοντας έτσι την παραπέρα επιτάχυνσή του. Η ροπή αυτή χαρακτηρίζεται σαν **ηλεκτρομαγνητική πέδηση** καθώς λειτουργεί σαν πέδη, με μόνη διαφορά ότι η ισχύς δεν μετατρέπεται σε θερμότητα, αλλά επιστρέφει σαν ηλεκτρική ισχύς στο δίκτυο. Άρα, ένας επαγωγικός

κινητήρας, ο οποίος υπό την επίδραση μιας κινητήριας ροπής επιταχύνεται και περιστρέφεται με ταχύτητα μεγαλύτερη της σύγχρονης λειτουργεί σαν γεννήτρια, μετατρέποντας τη μηχανική ισχύ που εισέρχεται στον άξονά του σε ηλεκτρική ενέργεια, η οποία επιστρέφει στο δίκτυο μέσα από το στάτη. Μια τέτοια μηχανή ονομάζεται **ασύγχρονη γεννήτρια**.

Σύμφωνα με την παραπάνω περιγραφή της λειτουργίας, για μια ασύγχρονη γεννήτρια ισχύει:

$$\omega_m \geq \omega \Rightarrow s = \frac{\omega - \omega_m}{\omega} \leq 0$$

Η ροπή του δρομέα, είναι η ηλεκτρομαγνητική πέδηση της γεννήτριας $T_m < 0$, και οι ισχύεις του φορτίου, του διακένου καθώς και η ηλεκτρική ισχύς της μηχανής είναι αρνητικές, καθώς σύμφωνα με τη σύμβαση του καταναλωτή, επιστρέφουν από τη μηχανή στο δίκτυο. Το ισοζύγιο ισχύος μιας ασύγχρονης γεννήτριας φαίνεται παραστατικά στην εικόνα 19.



Εικόνα 19: Λειτουργία της μηχανής ως γεννήτρια

Η καμπύλη ροπής – ταχύτητας μιας ασύγχρονης γεννήτριας είναι συμμετρική εκείνης του επαγωγικού κινητήρα, ως προς την αρχή των αξόνων. Η ολίσθηση μεταβάλλεται ανάμεσα στο 0 και στο -1 , ενώ η αναπτυσσόμενη ροπή (άρα και η αντίστοιχη ισχύς) είναι αρνητική. Η ασύγχρονη γεννήτρια λειτουργεί επίσης στη γραμμική περιοχή της χαρακτηριστικής της, όπου η παραγόμενη ισχύς είναι ανάλογη της ολίσθησης. Συνήθως για ονομαστική ισχύ αρκεί μια ολίσθηση της τάξης του 3%. Η περιοχή λειτουργίας της ασύγχρονης γεννήτριας φαίνεται

στη συνολική χαρακτηριστική ροπής ταχύτητας της ασύγχρονης μηχανής στην εικόνα 21.

Ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό της ασύγχρονης γεννήτριας είναι το ότι για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο, η μηχανή χρειάζεται άεργη ισχύ, που πρέπει να απορροφηθεί από το δίκτυο. Άρα η ασύγχρονη μηχανή, ακόμη και όταν λειτουργεί σαν γεννήτρια, είναι πάντοτε καταναλωτής αέργου ισχύος. Συνήθως για την απαιτούμενη άεργη ισχύ χρησιμοποιούνται κατάλληλες συστοιχίες πυκνωτών, που συνδέονται στους ακροδέκτες της μηχανής, εξασφαλίζοντας έτσι την αυτοδυναμία του συστήματος παραγωγής. Καθώς η τάση των ακροδεκτών εξαρτάται από την μαγνητική ροή, προσφέροντας περισσότερη άεργη ισχύ στην ασύγχρονη γεννήτρια αυξάνουμε την τάση των ακροδεκτών της. Προφανώς ο κορεσμός του σιδήρου επιβάλλει το ανώτερο όριο στην μαγνητική ροή. Γενικά η άεργη ισχύ που απαιτεί η ασύγχρονη γεννήτρια για ονομαστική τάση ακροδεκτών, είναι όση περίπου θα κατανάλωνε η ίδια μηχανή λειτουργώντας στην τάση αυτή σαν κινητήρας.

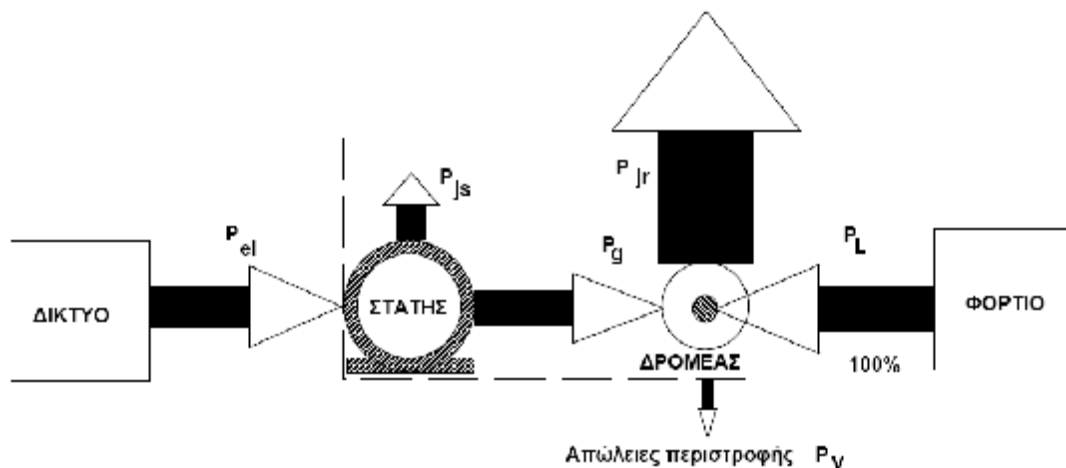
2.3.3. Λειτουργία πέδης

Σε ορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές, ο επαγωγικός κινητήρας και το φορτίο του πρέπει να φρενάρουν απότομα. Αυτό μπορεί να γίνει εάν ο κινητήρας αναγκαστεί να αλλάξει τη φορά περιστροφής του μέχρι την ακινητοποίηση του φορτίου και να σταματήσει να περιστρέφεται πριν αρχίσει να γυρίζει το φορτίο αντίστροφα. Η λειτουργία αυτή του επαγωγικού κινητήρα χαρακτηρίζεται σαν **πέδηση**. Για την αντιστροφή της φοράς περιστροφής του κινητήρα, αρκεί να αντιστραφεί η φορά περιστροφής του πεδίου του σιδήρου, κάτι το οποίο συμβαίνει με την εναλλαγή δύο φάσεων της τροφοδοσίας. Αποδεικνύεται εύκολα ότι στην περίπτωση αυτή προκύπτει ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεων που περιστρέφεται αντίστροφα από το αρχικό.

Κατά την πέδηση, ο επαγωγικός κινητήρας απορροφά κινητική ενέργεια από το περιστρεφόμενο φορτίο και τη μετατρέπει σε θερμότητα που εκλύεται από το δρομέα. Έτσι η ταχύτητα περιστροφής του φορτίου μειώνεται. Ο δρομέας όμως απορροφά ισχύ P_g από το δίκτυο μέσα από το διάκενο. Η ισχύς αυτή μετατρέπεται επίσης σε θερμότητα στο δρομέα. Συνεπώς κατά τη λειτουργία πέδης, ο δρομέας εμφανίζει απώλειες I^2R που είναι πολύ μεγάλες, μεγαλύτερες και από εκείνες που εμφανίζονται όταν έχουμε μπλοκάρισμα του δρομέα κατά την εκκίνηση. Γενικά, η ενέργεια που εκλύεται σαν θερμότητα από τον δρομέα κατά την πέδηση από τις ονομαστικές στροφές μέχρι την ακινητοποίηση, είναι περίπου τριπλάσια της αρχικής κινητικής ενέργειας όλων των

περιστρεφόμενων μερών. Συνεπώς η συχνή πέδηση του επαγωγικού κινητήρα μπορεί να οδηγήσει εύκολα στην καταστροφή από υπερθέρμανση των τυλιγμάτων του δρομέα ή και του στάτη.

Το ισοζύγιο της ισχύος κατά τη λειτουργία του επαγωγικού κινητήρα σαν πέδης, δίνεται στην εικόνα 20.



Εικόνα 20: Λειτουργία πέδης

Με την αντιστροφή της φοράς περιστροφής του πεδίου του στάτη, η ολίσθηση s γίνεται μεγαλύτερη του 1, συνεπώς,

$$s = \frac{\omega - \omega_m}{\omega} > 1 \Leftrightarrow \omega_m < 0$$

Η ροπή T_m και η ισχύς P_{el} είναι θετικές, συνεπώς ο κινητήρας απορροφά ισχύ από το δίκτυο. Ταυτόχρονα

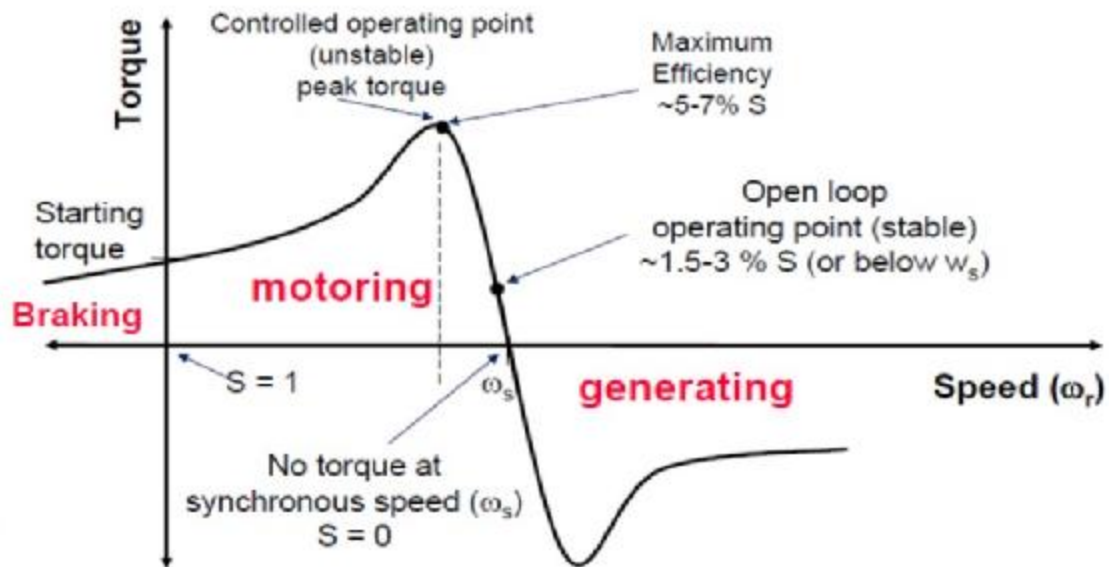
$$P_L \approx P_m = \omega_m \cdot T_m < 0$$

άρα ο κινητήρας απορροφά ισχύ και από το φορτίο. Προφανώς, στην περίπτωση αυτή οι απώλειες του δρομέα θα είναι

$$P_{jr} = |P_{el}| + |P_L|$$

Οι τρεις λειτουργικές καταστάσεις που περιγράφηκαν προσδιορίζουν τη συνολική χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας της ασύγχρονης μηχανής, όπως αυτή φαίνεται στην εικόνα 21. Στην καμπύλη αυτή φαίνεται ότι οι διάφορες καταστάσεις μπορούν να διαδέχονται ομαλά η μια την άλλη. Συνοψίζοντας, σαν γενική παρατήρηση, ισχύει ότι ο άξονας του

κινητήρα περιστρέφεται με την ίδια φορά με το στρεφόμενο πεδίο όταν η μηχανή λειτουργεί σαν κινητήρας ή σαν γεννήτρια. Στην περίπτωση του κινητήρα όμως, η ταχύτητα του είναι λίγο μικρότερη από τη σύγχρονη (θετική ολίσθηση), ενώ στην περίπτωση της γεννήτριας λίγο μεγαλύτερη από την σύγχρονη (αρνητική ολίσθηση). Τέλος κατά τη λειτουργία πέδης, ο άξονας στρέφεται με αντίθετη φορά από εκείνη του στρεφόμενου πεδίου.



Εικόνα 21: Συνολική χαρακτηριστική ροπής ταχύτητας της ασύγχρονης μηχανής

2.4. Έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων

Όταν ένας τριφασικός επαγωγικός κινητήρας τροφοδοτείται από το δίκτυο σταθερής τάσης και συχνότητας, στρέφεται με μια ταχύτητα η οποία είναι λίγο μικρότερη από τη σύγχρονη. Η μεταβολή της ταχύτητας από τη σύγχρονη εξαρτάται από το φορτίο και είναι τόσο μεγαλύτερη όσο υψηλότερη είναι η αντίσταση του δρομέα. Όμως, η λειτουργία του κινητήρα με μειωμένη ταχύτητα σημαίνει αύξηση της ολίσθησης και των απωλειών χαλκού στο δρομέα ($P_{cu_r} = sP_{ag}$), με συνέπεια τη μείωση του βαθμού απόδοσης.

Ο έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

- § Με τη ρύθμιση της ολίσθησης.
- § Με τη ρύθμιση της σύγχρονης ταχύτητας.

Η ρύθμιση της ολίσθησης, για δεδομένη ροπή φορτίου, επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της αντίστασης του δρομέα στον κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα και με τον έλεγχο της τάσης τροφοδοσίας στον κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού.

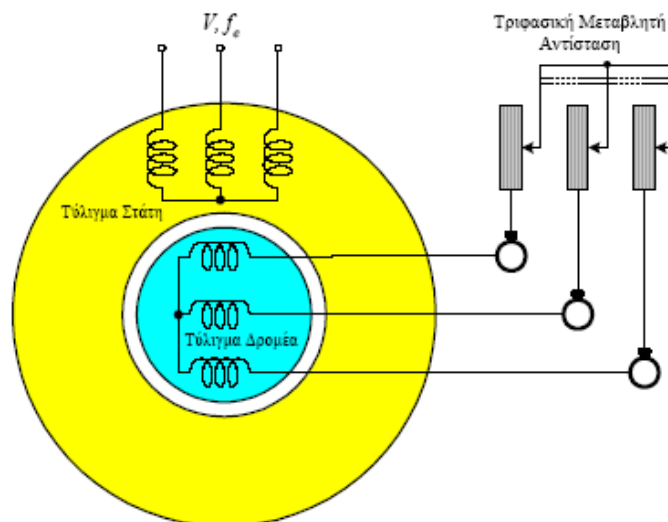
Η ρύθμιση της σύγχρονης ταχύτητας από τη σχέση

$$n_s = \frac{120 \cdot f_e}{p}$$

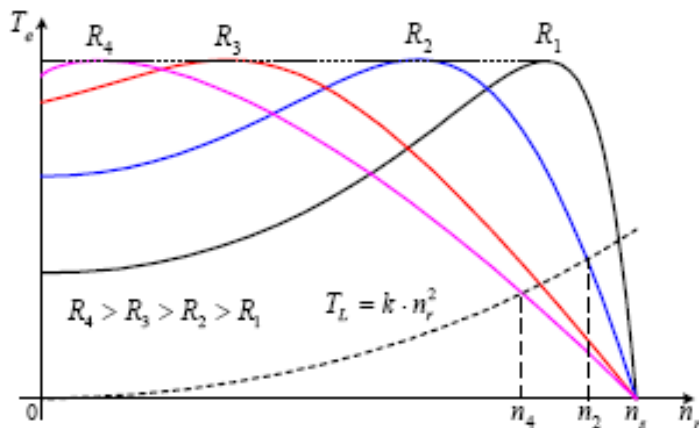
επιτυγχάνεται είτε με τη μεταβολή του αριθμού των πόλων του τυλίγματος του στάτη, ή με τη μεταβολή της συχνότητας τροφοδοσίας.

2.4.1. Έλεγχος της ταχύτητας με ρύθμιση της αντίστασης του δρομέα

Η ταχύτητα των επαγωγικών κινητήρων με δακτυλιοφόρο δρομέα ρυθμίζεται με την εισαγωγή μεταβλητών αντιστάσεων στο τύλιγμα του δρομέα, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 22. Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλεται η μορφή της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας του κινητήρα.



Εικόνα 22: Μεταβλητές αντιστάσεις στο τύλιγμα του δρομέα

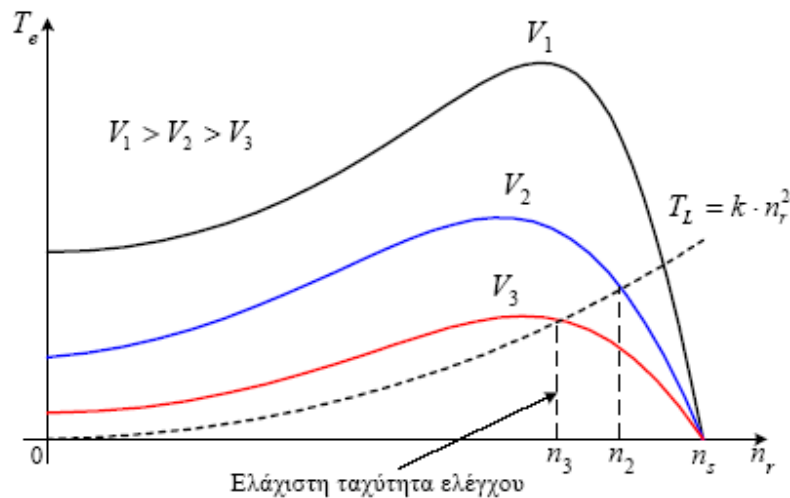


Εικόνα 23: Χαρακτηριστικές του κινητήρα για τέσσερις τιμές της αντίστασης του δρομέα και χαρακτηριστική του φορτίου

Στην εικόνα 23 εικονίζονται οι χαρακτηριστικές του κινητήρα για τέσσερις τιμές της αντίστασης του δρομέα, μαζί με τη χαρακτηριστική του φορτίου. Η ροπή του φορτίου μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της ταχύτητας. Αυτή η χαρακτηριστική φορτίου είναι πολύ κοινή και απαντάται στις αντλίες, τους ανεμιστήρες και τα ανυψωτικά. Η μεταβολή της ταχύτητας με τη ρύθμιση της αντίστασης είναι φανερή. Η ταχύτητα του κινητήρα μειώνεται από την τιμή n_2 όταν $R_r = R_2$ στην τιμή n_4 όταν $R_r = R_4$. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι, ο βαθμός απόδοσης της διάταξης μειώνεται με τη μείωση της ταχύτητας, εξαιτίας των εξωτερικών αντιστάσεων.

2.4.2. Έλεγχος της ταχύτητας με ρύθμιση της τάσης του στάτη

Στους επαγωγικούς κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού, η ρύθμιση της ολίσθησης (ταχύτητας) επιτυγχάνεται με τη μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας των τυλιγμάτων του στάτη. Η συχνότητα των τάσεων είναι σταθερή και ίση με τη συχνότητα του δικτύου. Καθώς η ροπή που αναπτύσσει ο επαγωγικός κινητήρας είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης του στάτη, οι χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας μεταβάλλονται όπως στην εικόνα 24, για διάφορες τιμές της τάσης. Η ροπή του φορτίου είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας.

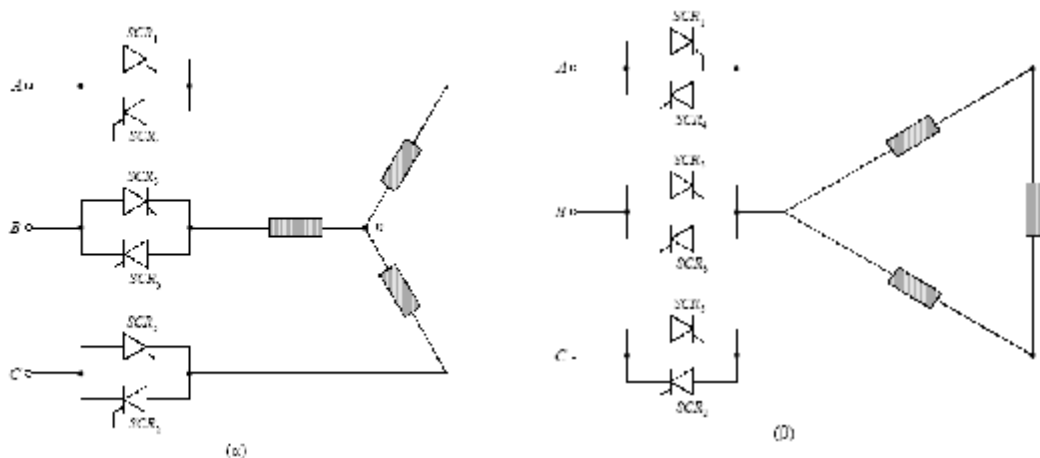


Εικόνα 24: Μεταβολή της ταχύτητας συναρτήσει της τάσης του στάτη

Από την εικόνα 24 είναι φανερό ότι, η ταχύτητα του κινητήρα δεν μπορεί να ελεγχθεί σε τιμές πολύ μικρότερες από τη σύγχρονη. Η ελάχιστη δυνατή ταχύτητα είναι η n_3 , που αντιστοιχεί στη ροπή ανατροπής για την τάση V_3 . Ακόμη, το ρεύμα του κινητήρα είναι ανάλογο της τάσης. Έτσι, ο λόγος ροπής προς ρεύμα, η μέγιστη ροπή, ο συντελεστής ισχύος και ο βαθμός απόδοσης, μειώνονται με τη μείωση της ταχύτητας. Επομένως, ο έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων με τη ρύθμιση της τάσης του στάτη δεν είναι αποτελεσματικός.

Ο έλεγχος της τάσης στα τυλίγματα του στάτη επιτυγχάνεται με κατάλληλους μετατροπείς ισχύος, οι οποίοι ονομάζονται *ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης (ac voltage controllers)*. Η κυκλωματική δομή του τριφασικού ρυθμιστή εναλλασσόμενης τάσης φαίνεται στην εικόνα 25. Τα τυλίγματα του κινητήρα μπορεί να είναι σε σύνδεση αστέρα (Εικόνα 25α), ή τριγώνου (Εικόνα 25β).

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



Εικόνα 25: Τριαφασικός ρυθμιστής εναλλασσόμενης τάσης

Οι ρυθμιστές εναλλασσόμενης τάσης χρησιμοποιούνται συνήθως στον έλεγχο της ταχύτητας επαγωγικών κινητήρων κλάσης D, σε εφαρμογές αντλιών και ανεμιστήρων, όπου δεν απαιτείται έλεγχος της ταχύτητας σε μικρές τιμές. Όμως, η κυριότερη εφαρμογή τους είναι στην εκκίνηση των επαγωγικών κινητήρων όλων των κατηγοριών, οπότε ονομάζονται *soft starters*. Οι ηλεκτρονικοί εκκινητές έχουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους εκκίνησης, με αυτομετασχηματιστή ή διακόπτη αστέρα-τριγώνου. Κάποια από τα πλεονεκτήματα είναι: η ομαλή επιτάχυνση και επιβράδυνση, ο έλεγχος του ρεύματος, η μειωμένη συντήρηση, η προστασία από έλλειψη ή ασυμμετρία των φάσεων. Επιπλέον, ένας εκκινητής με ρυθμιστή εναλλασσόμενης τάσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ελαχιστοποίηση των απωλειών του επαγωγικού κινητήρα, λειτουργώντας τον κινητήρα με μειωμένη τάση σε μικρά φορτία. (Ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί με το μέγιστο βαθμό απόδοσης στο ονομαστικό φορτίο, όπου η κατανομή των επιμέρους απωλειών του είναι η βέλτιστη. Όταν το φορτίο μειώνεται, η βέλτιστη κατανομή των απωλειών διαταράσσεται και ο βαθμός απόδοσης μειώνεται. Μεταβάλλοντας την τάση τροφοδοσίας του κινητήρα ανάλογα με το φορτίο του, ώστε η μαγνητική ροή στο διάκενο να έχει πάντα τη βέλτιστη τιμή, επιτυγχάνουμε το μέγιστο βαθμό απόδοσης. Η βέλτιστη τιμή της μαγνητικής ροής εξαρτάται από το φορτίο και την ταχύτητα του κινητήρα).

2.4.3. Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή του αριθμού των πόλων

Ο αριθμός των μαγνητικών πόλων που αναπτύσσονται από το τριφασικό τύλιγμα του στάτη μπορεί να μεταβληθεί, με τη μέθοδο των *διαδοχικών πόλων* (*consequent poles*), ή τοποθετώντας *πολλαπλά τυλίγματα στο στάτη* (*multiple stator windings*).

Στη μέθοδο των διαδοχικών πόλων, με κάποιες απλές αλλαγές στη σύνδεση των ομάδων του τυλίγματος του στάτη, ο αριθμός των πόλων του μεταβάλλεται με ένα λόγο 2 προς 1. Έτσι, ο επαγωγικός κινητήρας μπορεί να έχει δύο ή τέσσερις πόλους και σύγχρονη ταχύτητα 3000rpm ή 1500rpm αντίστοιχα.

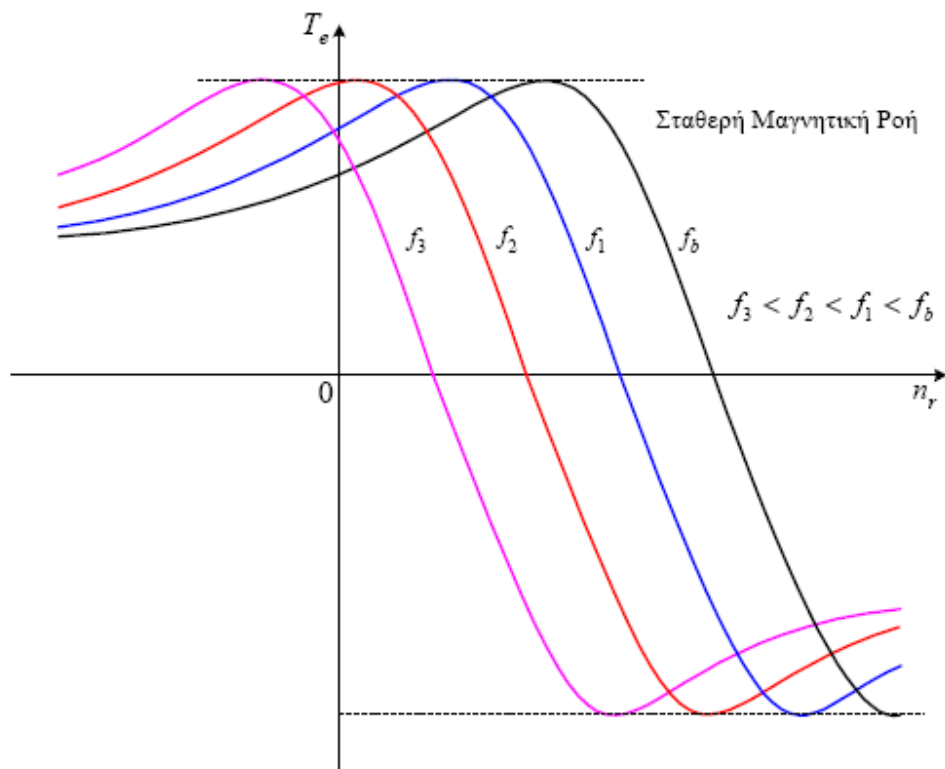
Όταν ο λόγος 2 προς 1 στην ταχύτητα δεν είναι βολικός, τοποθετούνται στο στάτη περισσότερα από ένα ανεξάρτητα τριφασικά τυλίγματα, με τον επιθυμητό αριθμό πόλων. Ανάλογα με τη ζητούμενη ταχύτητα, τροφοδοτείται κάθε φορά το κατάλληλο τύλιγμα. Το μειονέκτημα των πολλαπλών τυλιγμάτων είναι ότι αυξάνουν το κόστος του κινητήρα. Ακόμη, η μέθοδος των πολλαπλών τυλιγμάτων μπορεί να συνδυασθεί με τη μέθοδο των διαδοχικών πόλων, για τη λειτουργία του κινητήρα σε περισσότερες ταχύτητες.

Πρέπει να σημειωθεί ότι, η μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας με τη μεταβολή του αριθμών των πόλων, μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε επαγωγικούς κινητήρες με βραχυκυκλωμένο κλωβό.

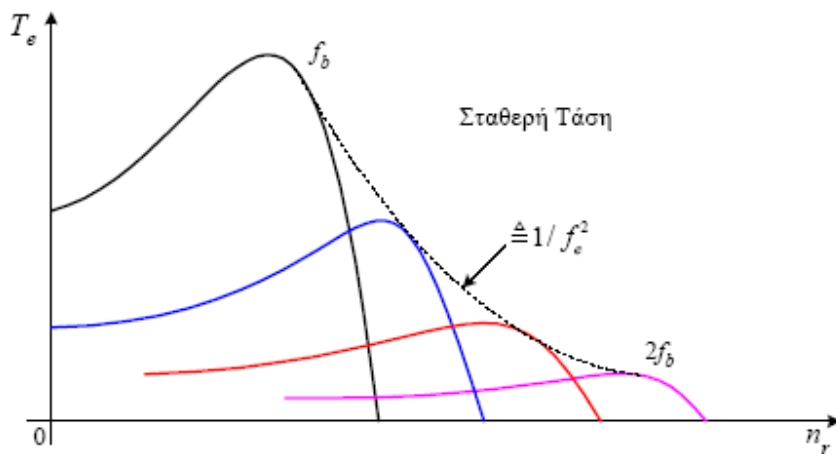
Ο δρομέας των κινητήρων αυτών αναπτύσσει πάντα τόσους πόλους, όσοι είναι και οι πόλοι του στάτη. Αυτό δεν ισχύει στους κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα, όπου το τύλιγμα του δρομέα αναπτύσσει ένα καθορισμένο αριθμό πόλων, ανάλογο με την κατασκευή του.

2.4.4. Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της συχνότητας

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



(α)



(β)

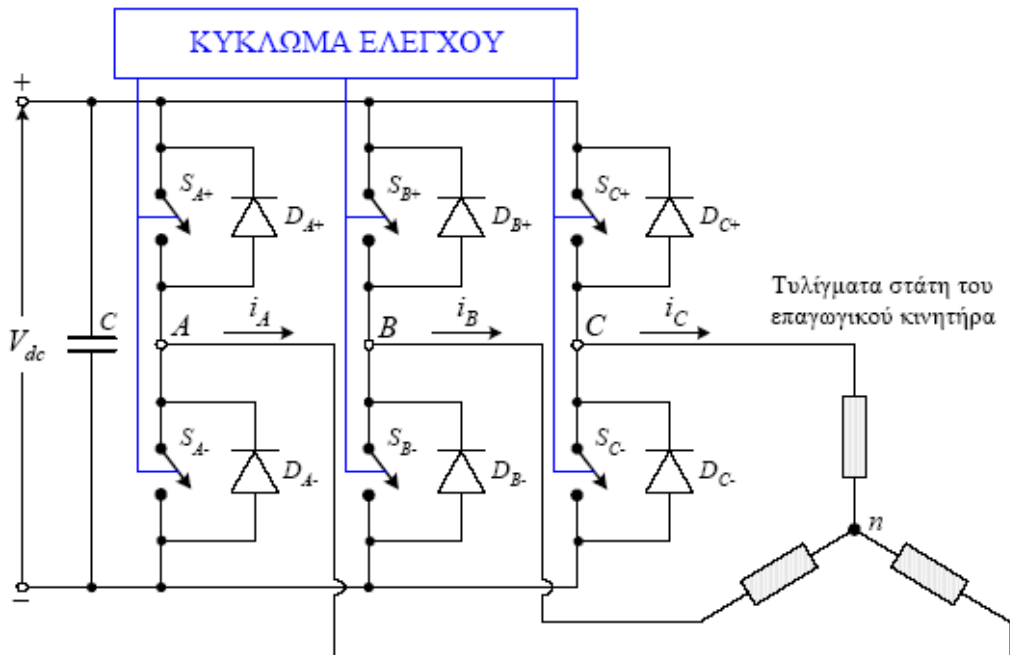
Εικόνα 26: Χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας του κινητήρα, σε διάφορες συχνότητες μικρότερες από τη βασική, όταν μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή (α)μείωση της μέγιστης ροπής ανατροπής με το τετράγωνο της συχνότητας (β)

Καθώς η συχνότητα των τάσεων τροφοδοσίας μπορεί να ρυθμιστεί σε τιμές μικρότερες αλλά και μεγαλύτερες της ονομαστικής, η ταχύτητα του κινητήρα μπορεί να μεταβληθεί από το μηδέν, μέχρι μια τιμή πολλαπλάσια της βασικής. Το άνω όριο της ταχύτητας περιορίζεται από τη μηχανική αντοχή του κινητήρα. Εκτός από την ευρεία περιοχή ρύθμισης της ταχύτητας, η μέθοδος εξασφαλίζει τη λειτουργία του κινητήρα με μικρή ολίσθηση σε κάθε ταχύτητα. Έτσι, ο βαθμός απόδοσης διατηρείται υψηλός.

Όταν η ταχύτητα του κινητήρα ρυθμίζεται σε τιμές μικρότερες της βασικής, η μείωση της συχνότητας συνοδεύεται από αντίστοιχη μείωση της τάσης. Ειδικότερα, ο λόγος της τάσης προς τη συχνότητα V/f_e διατηρείται σταθερός. Με τον τρόπο αυτό η μαγνητική ροή στο διάκενο του κινητήρα παραμένει περίπου σταθερή ($\Phi = \frac{E}{\omega_e} = \frac{V}{\omega_e f_e}$). Στην εικόνα 26α εικονίζονται οι χαρακτηριστικές ροπής-ταχύτητας του κινητήρα, σε διάφορες συχνότητες μικρότερες από τη βασική, όταν μαγνητική ροή διατηρείται σταθερή. Παρατηρούμε ότι η ροπή ανατροπής (μέγιστη ροπή), δεν μεταβάλλεται με τη μεταβολή της συχνότητας. Έτσι, ο κινητήρας μπορεί να ελέγξει φορτία, τα οποία απαιτούν μεγάλη ροπή σε μικρές ταχύτητες. Επιπλέον, η δυναμική συμπεριφορά του κινητήρα είναι εξαιρετική.

Στην ονομαστική ταχύτητα, ο κινητήρας τροφοδοτείται με την ονομαστική τάση και τη βασική συχνότητα. Για την αύξηση της ταχύτητας, σε τιμές πέρα από την ονομαστική, η συχνότητα γίνεται μεγαλύτερη από τη βασική. Όμως, η τάση τροφοδοσίας διατηρείται σταθερή στην ονομαστική τιμή, για την προστασία της μόνωσης των τυλιγμάτων. Επειδή η τάση δεν ακολουθεί την αύξηση της συχνότητας, η μαγνητική ροή μειώνεται καθώς η συχνότητα αυξάνει. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση της μέγιστης ροπής ανατροπής με το τετράγωνο της συχνότητας, όπως φαίνεται στην εικόνα 26β.

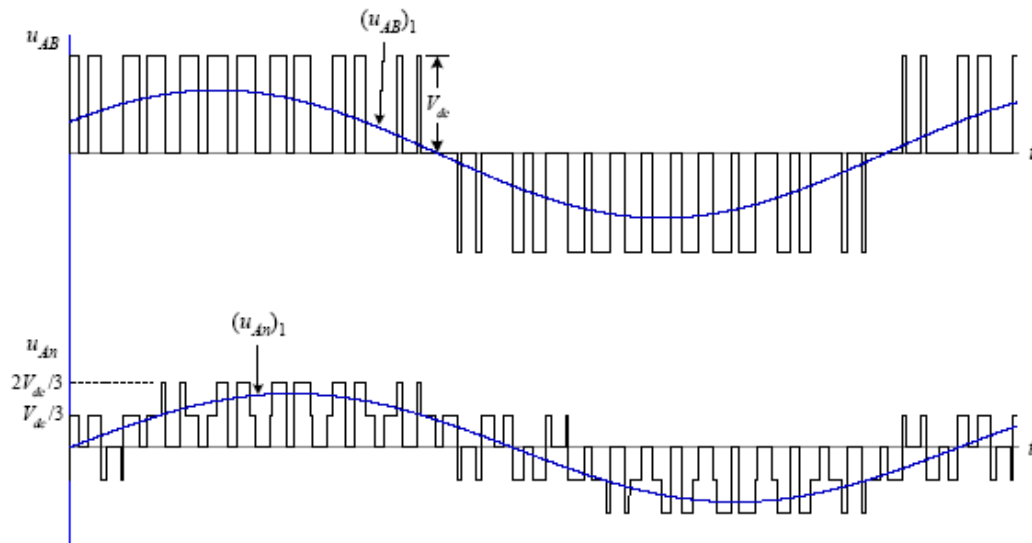
Αν και η μέθοδος ελέγχου της ταχύτητας με τη ρύθμιση της συχνότητας προσφέρει πολύ καλύτερα χαρακτηριστικά λειτουργίας απ' όλες τις άλλες μεθόδους, η χρήση της έχει γενικευτεί μόλις τα τελευταία χρόνια. Αυτό οφείλεται στην κατασκευή των κατάλληλων μετατροπέων ισχύος, οι οποίοι ονομάζονται *αντιστροφείς (inverters)*, με λογικό κόστος και υψηλή αξιοπιστία. Στην εικόνα 27 εικονίζεται η δομή του *τριφασικού αντιστροφέα πηγής τάσης*.



Εικόνα 27: Τριφασικός αντιστροφέας πηγής τάσης

Ο αντιστροφέας ονομάζεται πηγής τάσης, επειδή τροφοδοτείται από μια πηγή συνεχούς τάσης. Η συνεχής τάση εισόδου του αντιστροφέα V_{dc} , προέρχεται από την ανόρθωση της τάσης του δικτύου, την οποία εξομαλύνει ο πυκνωτής C . Οι αντιστροφείς που τροφοδοτούνται από πηγές συνεχούς ρεύματος ονομάζονται *αντιστροφείς πηγής ρεύματος* και χρησιμοποιούνται στον έλεγχο κινητήρων μεγάλης ισχύος. Οι έξι διακόπτες του αντιστροφέα πηγής τάσης, είναι συνήθως *MOSFET* ισχύος (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) ή *IGBT* (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). Αντιπαράλληλα με κάθε διακόπτη συνδέεται μια δίοδος, η οποία εξασφαλίζει την αμφίδρομη ροή της ισχύος μεταξύ της dc εισόδου και της ac εξόδου. Οι διακόπτες οδηγούνται από το κύκλωμα ελέγχου, με κάποια από τις πολλές τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμού *PWM* (*Pulse Width Modulation*).

Το χαρακτηριστικό όλων των τεχνικών *PWM* είναι η ρύθμιση εκτός από τη συχνότητα και της τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα. Όμως, οι διακόπτες του αντιστροφέα λειτουργούν με μια συχνότητα f_s , η οποία είναι πολύ μεγαλύτερη από τη θεμελιώδη f_e . Η συχνότητα f_s ονομάζεται *συχνότητα μετάβασης* (*switching frequency*). Στην εικόνα 28 παρουσιάζεται ενδεικτικά η κυματομορφή της πολικής και της φασικής τάσης στον κινητήρα, όταν τροφοδοτείται από ένα *PWM* αντιστροφέα.



Εικόνα 28: Κυματομορφή της πολικής και της φασικής τάσης στον κινητήρα, όταν τροφοδοτείται από ένα PWM αντιστροφέα

Ο κινητήρας εξαιτίας της επαγωγικής συμπεριφοράς του, φιλτράρει τις συνιστώσες υψηλής συχνότητας των ρευμάτων και ανταποκρίνεται μόνο στη θεμελιώδη συνιστώσα τους. Τα μικρά αρμονικά ρεύματα αυξάνουν τις απώλειες χαλκού και σιδήρου του κινητήρα.

:

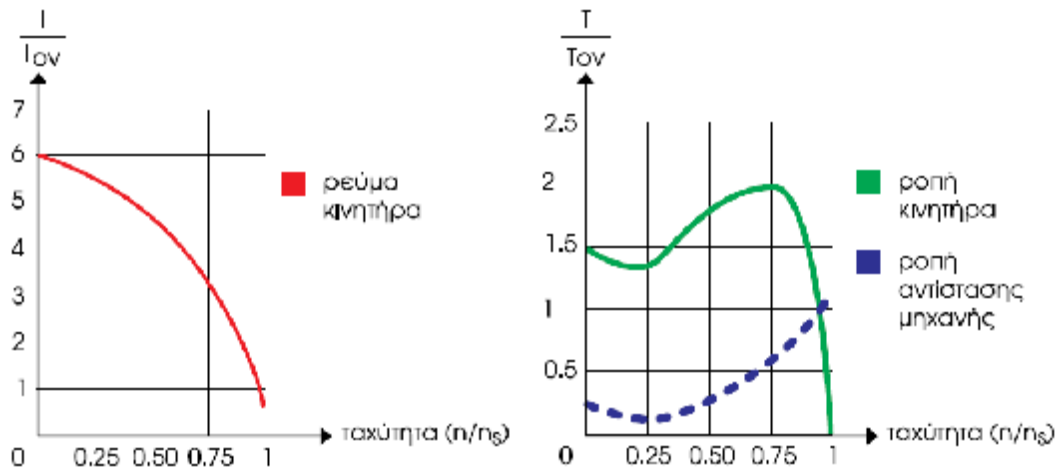
2.5. Διατάξεις εκκίνησης τριφασικών κινητήρων

Έχουμε τους παρακάτω τρόπους εκκίνησης:

- § Απευθείας εκκίνησης
- § Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή
- § Εκκίνηση με αντιστάσεις στον στάτη
- § Εκκίνηση με διακόπτη αστέρα-τριγώνου
- § Με ρύθμιση του λόγου V/f (ομαλός εκκινητής soft starter)

2.5.1. Απευθείας εκκίνηση

Ο απλούστερος τρόπος εκκίνησης τριφασικού κινητήρα, είναι η απευθείας εκκίνηση με τη χρήση ενός μόνο απλού τριπολικού διακόπτη.

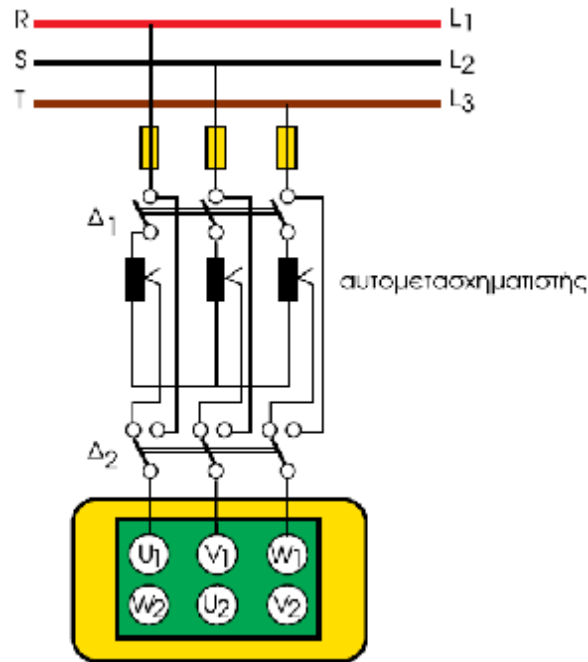


Εικόνα 29: Ρεύμα και ροπή εκκίνησης κατά την απευθείας εκκίνηση

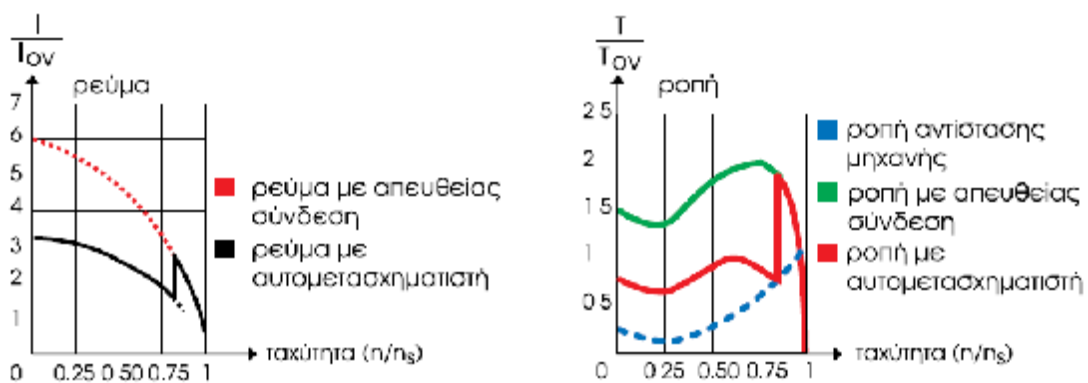
Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε ορισμένες περιπτώσεις στη βιομηχανία και κυρίως για κινητήρες μικρής ισχύος της τάξης του 1,5-2KW. Υπάρχουν περιπτώσεις όμως όπου η ΔΕΗ επιτρέπει την απευθείας εκκίνηση κινητήρων μεγαλύτερης ισχύος (βλέπε κανονισμό ΔΕΗ) τόσο στη χαμηλή όσο και στη μέση τάση. Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι πρώτον η απλή μεθοδός του και η υψηλή ροπή εκκίνησης. Ενώ το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το μεγάλο ρεύμα εκκίνησης.

2.5.2. Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή

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



Εικόνα 30: Σύνδεση του κινητήρα με το δίκτυο κατά την εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή

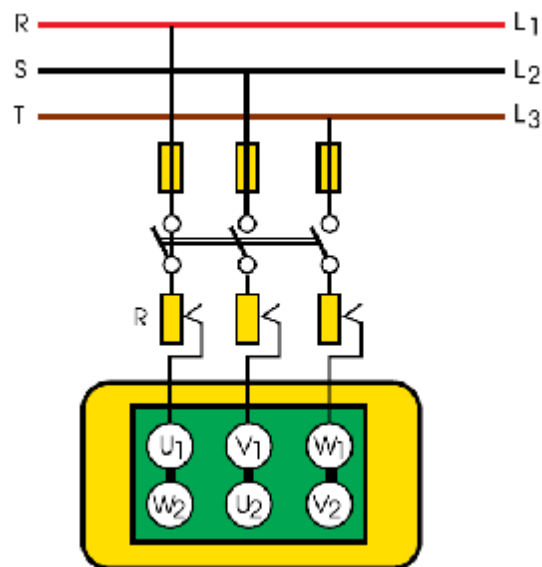


Εικόνα 31: Ρεύμα και ροπή εκκίνησης κατά την εκκίνηση με χρήση αυτομετασχηματιστή

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

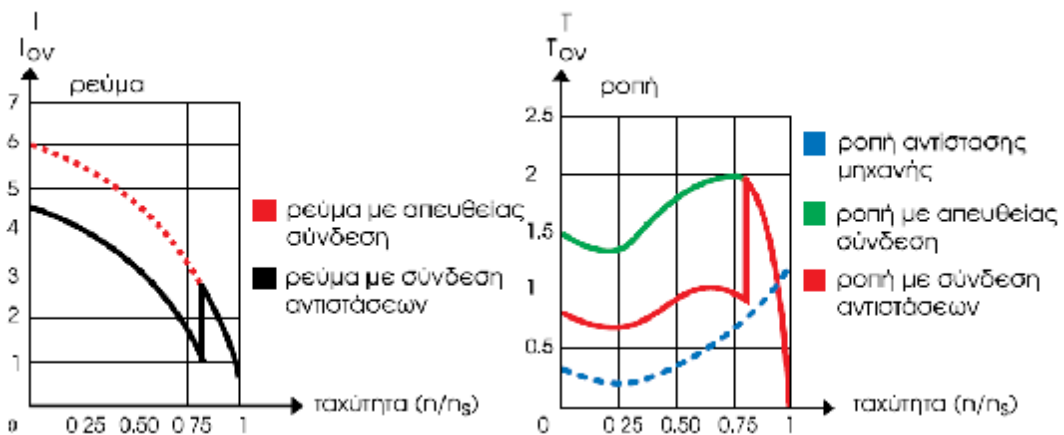
2.5.3. Εκκίνηση με αντιστάσεις στο στάτη

Για την εκκίνηση με αντιστάσεις στο στάτη χρησιμοποιείται εκκινητής που αποτελείται από τρεις αντιστάσεις οι οποίες παρεμβάλλονται στο κύκλωμα που τροφοδοτεί το στάτη του τριφασικού κινητήρα.



Εικόνα 32: Σύνδεση του κινητήρα με το δίκτυο κατά την εκκίνηση με χρήση αντιστάσεων στο στάτη

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

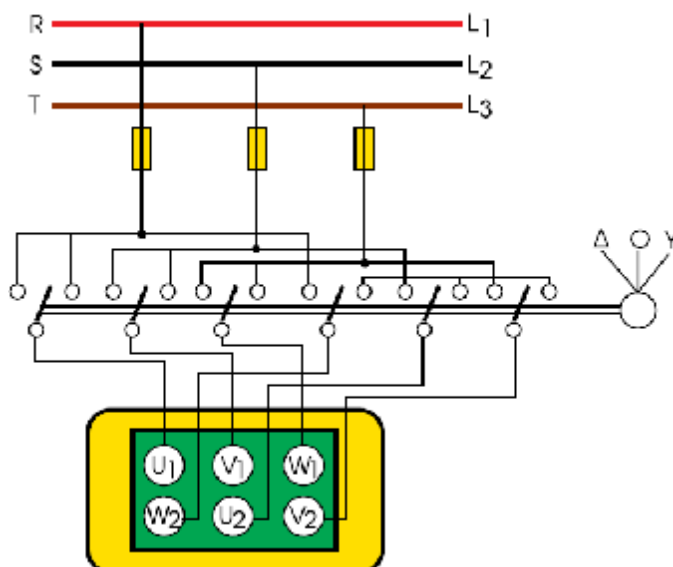


Εικόνα 33: Ρεύμα και ροπή εκκίνησης κατά την εκκίνηση με χρήση αντιστάσεων στο στάτη

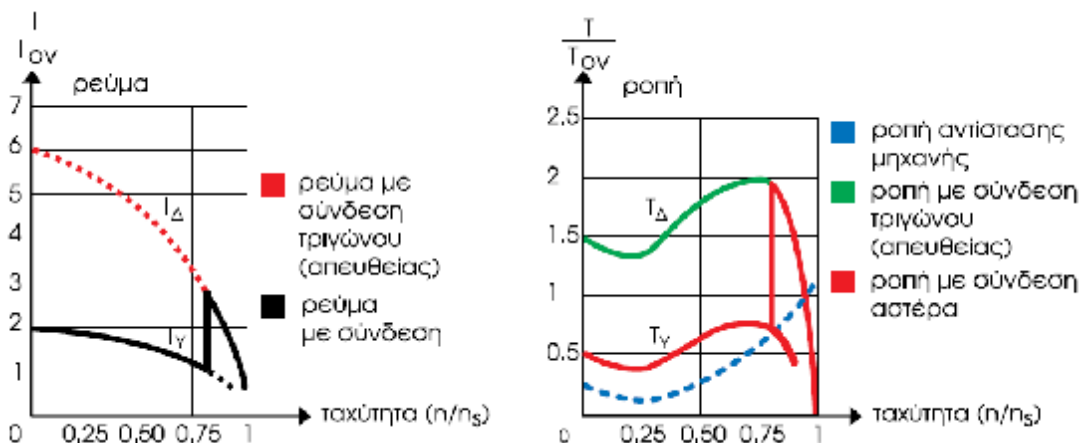
2.5.4. Εκκίνηση με διακόπτη αστέρα-τριγώνου

Η παραγόμενη ροπή όπως προαναφέραμε είναι ανάλογη του τετραγώνου του μεγέθους της τάσης τροφοδοσίας. $T \sim V_1^2$

Επιπλέον η ολίσθηση για την οποία έχουμε τη μέγιστη ροπή (για σταθερή συχνότητα), είναι σταθερή και ανεξάρτητη της τάσης τροφοδοσίας.



Εικόνα 34: Σύνδεση του κινητήρα με το δίκτυο κατά την εκκίνηση με χρήση διακόπτη αστέρα-τριγώνου



Εικόνα 35: Ρεύμα και ροπή εκκίνησης κατά την εκκίνηση με χρήση διακόπτη αστερά-τριγώνου

2.5.5. Εκκίνηση με ομαλό εκκινητή (soft-starter)

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

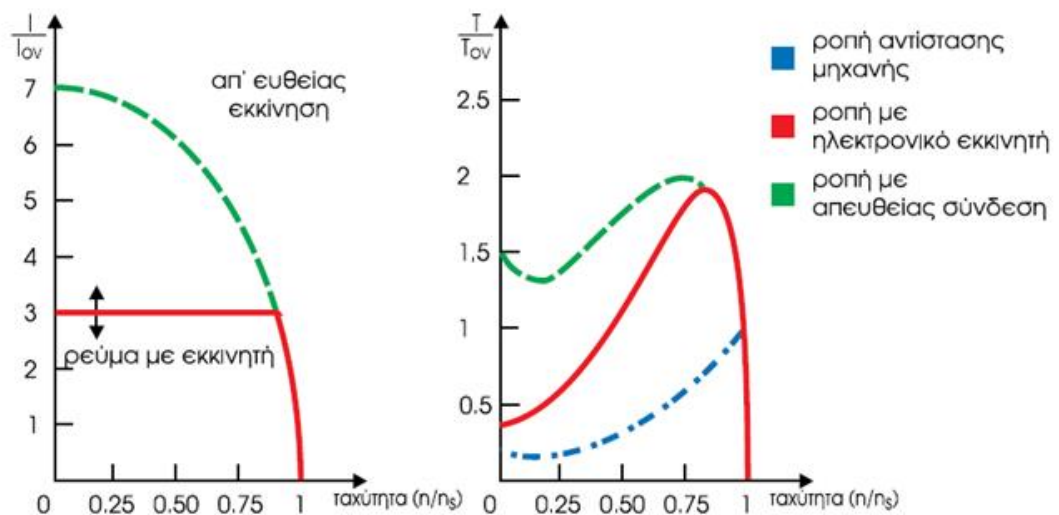
Οι κυριότερες λειτουργίες που διακρίνουν τους ηλεκτρονικούς ομαλούς εκκινητές είναι:

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

Ο ηλεκτρονικός ρυθμιστής τάσης χρησιμοποιεί θυρίστορ για το κύριο κύκλωμα του, ενώ η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα ρυθμίζεται με τη βοήθεια τυπωμένου κυκλώματος.

Κατά την εκκίνηση μειώνοντας την τάση του κινητήρα, το ρεύμα και η ροπή εκκίνησης μειώνονται επίσης. Η ροπή της εκκίνησης είναι τόσο χαμηλή που δεν δημιουργεί μηχανική καταπόνηση μεταξύ των συνδέσεων του κινητήρα (ηλεκτρομειωτήρες, αλυσίδες, ιμάντες) με το φορτίο.

Ένα από τα πλεονεκτήματα του ομαλού εκκινήτη είναι ότι προσαρμόζεται εύκολα στις ανάγκες του φορτίου είτε είναι πλήρες είτε όχι. Σε εφαρμογές με ειδικά φορτία μπορούμε να έχουμε ομαλό σταμάτημα, αυτή η λειτουργία χρησιμοποιείται για το σταμάτημα αντλίας.



Εικόνα 36: Ρεύμα και ροπή εκκίνησης κατά την εκκίνηση με χρήση ομαλού εκκινήτη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

3.1 Προδιαγραφές του κινητήρα

Ονομαστική Ισχύς: 45kW

Ονομαστικές στροφές : 988στρ./λεπτό

Ολίσθηση: 0.012

Πόλοι: 6.

Τάση τροφοδοσίας: 400V

Ονομαστικό ρεύμα: 81A

Ρεύμα χωρίς φορτίο: 23,6A

Ρεύμα εκκίνησης: 6 φορές το ονομαστικό.

Συχνότητα: 50Hz

Αριθμός φάσεων: 3

Τρόπος συνδεσμολογίας: τρίγωνο

Συντελεστής ισχύος : 0.85

Βαθμός απόδοσης: 0.93

Ονομαστική ροπή: 434 Nm

Ροπή εκκίνησης: 959Nm

Ροπή Ανατροπής: 1316 Nm

3.2 Υπολογισμός των στοιχείων του στάτη

3.2.1 Υπολογισμός των διαστάσεων του στάτη

Ξεκινάμε με τον υπολογισμό της εσωτερικής διαμέτρου του στάτη D_{IS} η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$D_{IS} = \sqrt[3]{\frac{2p_i}{\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{p_i}{f} \cdot \frac{S_{gap}}{C_0}} \quad (1)$$

Στην παραπάνω σχέση p_i είναι τα ζεύγη πόλων, f η συχνότητα λειτουργίας, S_{gap} η φαινόμενη ισχύς διακένου, λ ο λόγος του μήκους του πυρήνα προς το πολικό βήμα και C_0 μια σταθερά.

Η ισχύς διακένου υπολογίζεται από την σχέση:

$$S_{gap} = \frac{K_E \cdot P_n}{n_N \cdot \cos\varphi}$$

Στην παραπάνω σχέση P_n είναι η ονομαστική ισχύς, n_N ο βαθμός απόδοσης και $\cos\varphi$ ο συντελεστής ισχύος.

Όπου:

$$K_E = \frac{E_A}{V_\varphi} \approx 0.98 - 0.005 \cdot p_i = 0.98 - 0.005 \cdot 3 = 0.965$$

Άρα

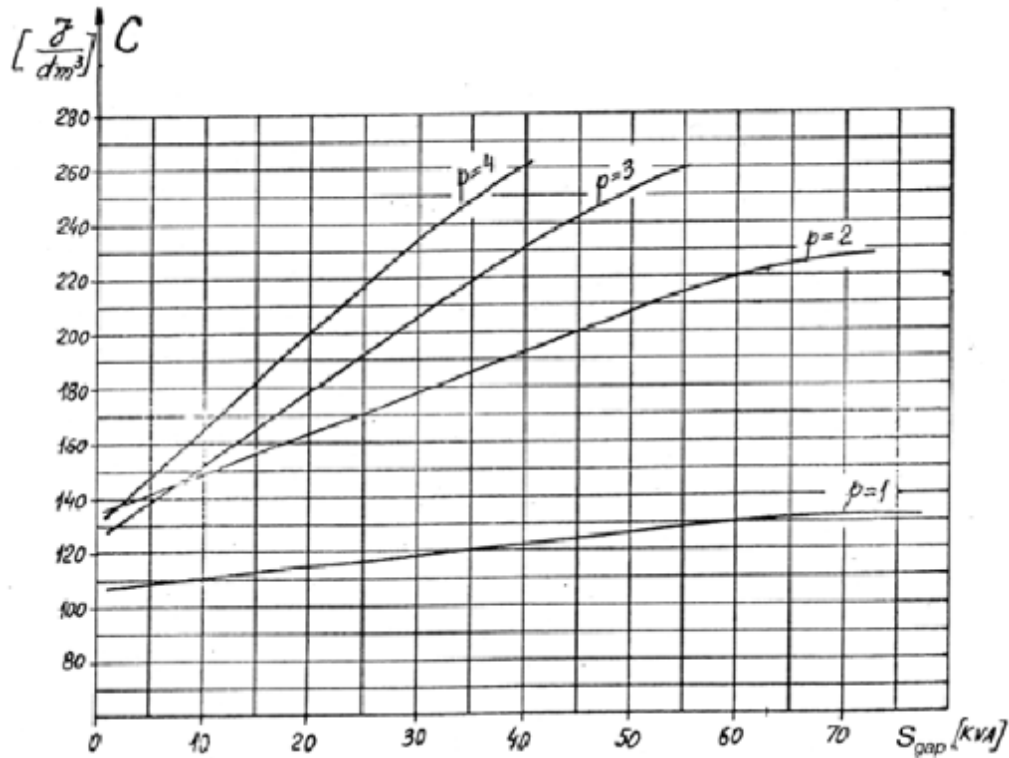
$$S_{gap} = \frac{K_E \cdot P_n}{\eta_N \cdot \cos\varphi} = \frac{0.965 \cdot 45000W}{0.93 \cdot 0.85} = 54933.58VA \cong 55kVA$$

Ο συντελεστής λ είναι ο λόγος του μήκους του πυρήνα προς το πολικό βήμα και όταν πρόκειται για εξαπολικούς κινητήρες παίρνει τιμή μεταξύ 1.6 και 2.2

2p_i	2	4	6	8
λ	0.6 – 1.0	1.2 – 1.8	1.6 – 2.2	2 – 3

Στη συγκεκριμένη μελέτη επιλέγουμε τιμή $\lambda=2$.

Το C_0 ονομάζεται σταθερά του Esson και μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά. Εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως οι σπείρες ανά φάση, η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο του κινητήρα, η πυκνότητα του ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη κλπ. Δύναται όμως να υπολογιστεί και από την παρακάτω γραφική παράσταση η οποία ισχύει για μικρής ισχύος κινητήρες:



Εικόνα 37: Διάγραμμα υπολογισμού της σταθεράς Esson

Από το παραπάνω διάγραμμα παίρνουμε μία προσεγγιστική τιμή:

$$C_0 \approx 260 \times 10^3 \text{ J/m}^3$$

Αντικαθιστώντας όλα τα παραπάνω στην σχέση (1) υπολογίζουμε:

$$D_{IS} = \sqrt[3]{\frac{2p_i \cdot p_i \cdot S_{gap}}{\pi \cdot \lambda \cdot f \cdot C_0}} \Rightarrow D_{IS} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 54933.58}{\pi \cdot 2 \cdot 50 \cdot 260 \cdot 10^3}} = 0.23 \text{ m} = 23 \text{ cm}$$

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε το μήκος του πυρήνα. Θα χρησιμοποιήσουμε την σχέση:

$$\lambda = \frac{L}{\tau} \rightarrow L = \lambda \cdot \tau \rightarrow L = \frac{\lambda \cdot \pi \cdot D_{IS}}{2 \cdot p_i} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 0.23}{2 \cdot 3} \text{ m} = 0.24 \text{ m} = 24 \text{ cm}$$

όπου τ είναι το πολικό βήμα, δηλαδή η απόσταση ανάμεσα σε δυο διαδοχικούς πόλους (pole pitch):

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{IS}}{2 \cdot p_i} = \frac{3.14 \cdot 0.23m}{2 \cdot 3} = 0.12m = 12cm$$

Επίσης το βήμα των αυλακιών είναι

$$\tau_s = \frac{\tau}{3q} = \frac{0.12}{3 \cdot 2} = 20 \cdot 10^{-3} m$$

Η εξωτερική διάμετρος του κινητήρα υπολογίζεται αρχικά από την εμπειρική σχέση:

$$\frac{D_{IS}}{D_{out}} = 0.7 \rightarrow D_{out} = \frac{D_{IS}}{0.7} = 32.86cm$$

Η παραπάνω σχέση προκύπτει από εμπειρικά δεδομένα που εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα:

$2p_i$	2	4	6	8
$\frac{D_{in}}{D_{out}}$	0.54 0.58	0.61 0.63	0.68 0.71	0.72 0.74

Αυτό που απομένει είναι να υπολογίσουμε το διάκενο μεταξύ του δρομέα και του στάτη. Το διάκενο υπολογίζεται από την σχέση:

$$g = (0.1 + 0.012 \cdot \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3}m = (0.1 + 0.012 \cdot \sqrt[3]{45000}) \cdot 10^{-3}m = 0.526mm$$

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι τα διάκενα είναι συγκεκριμένα, π.χ. 0,35mm, 0,4mm, 0,45mm, 0,5mm κλπ. Εμείς θα διαλέξουμε διάκενο ίσο με 0,55mm. Ένα πολύ μικρό διάκενο προκαλεί μαγνητικά πεδία με υψηλότερες αρμονικές και μεγαλύτερες απώλειες, ενώ ένα μεγάλο διάκενο μειώνει τον συντελεστή ισχύος και την απόδοση του κινητήρα.

3.2.2 Τυλίγματα στάτη

Η μελέτη των τυλιγμάτων του στάτη ξεκινά με την επιλογή του αριθμού των αυλακιών, μέσα στα οποία θα μπουν τα τυλίγματα. Για να υπολογίσουμε τον συνολικό αριθμό των αυλακιών χρησιμοποιούμε την σχέση:

$$N_s = 2 \cdot p_i \cdot q \cdot m$$

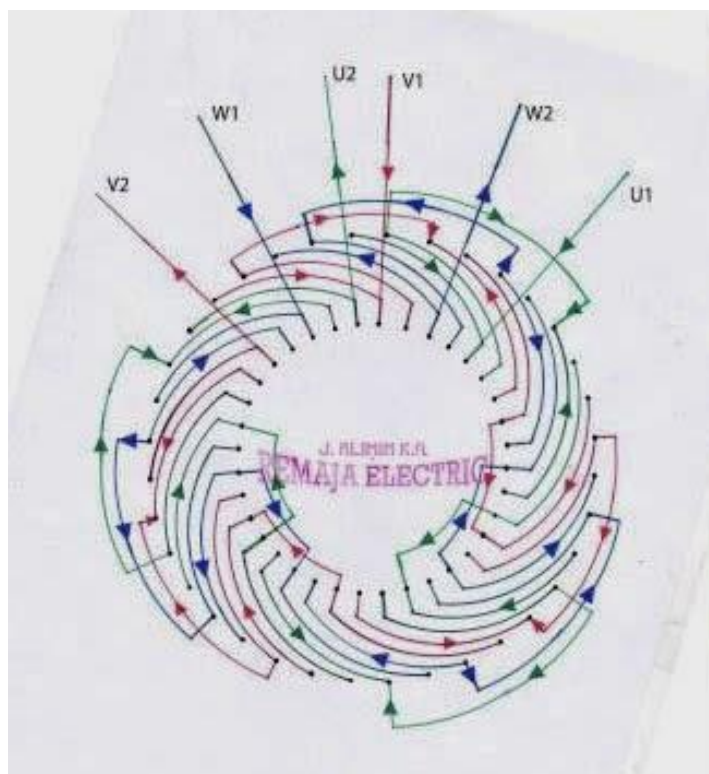
όπου p_i τα ζεύγη πόλων, m ο αριθμός των φάσεων και q ο αριθμός των αυλακιών ανά φάση και πόλο. Επιλέγουμε 2 αυλάκια ανά φάση και πόλο άρα:

$$N_s = 2 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 3 = 36 \text{ αυλάκια}$$

Το πολικό βήμα θα είναι:

$$y_\pi = \frac{36}{2 \cdot 3} = 6 \text{ αυλάκια}$$

Θα φτιάξουμε ένα τύλιγμα με μια στρώση (ένα μάτσο ανά αυλάκι), με τρεις πραγματικούς και τρεις φανταστικούς πόλους, το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 38 : Το τύλιγμα της Μηχανής. 36 αυλάκια, 6 πόλοι

Ο συντελεστής τυλίγματος δίνεται από την σχέση:

$$K_{\tau} = K_W = \frac{\sin \frac{q \cdot a}{2}}{q \cdot \sin \frac{a}{2}} = \frac{\sin \frac{2 \cdot 30}{2}}{2 \cdot \sin \frac{30}{2}} = 0.966$$

Όπου

a : η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών αυλακιών σε ηλεκτρικές μοίρες οι οποίες δίνονται από την σχέση: $a = p_i \cdot a_r$

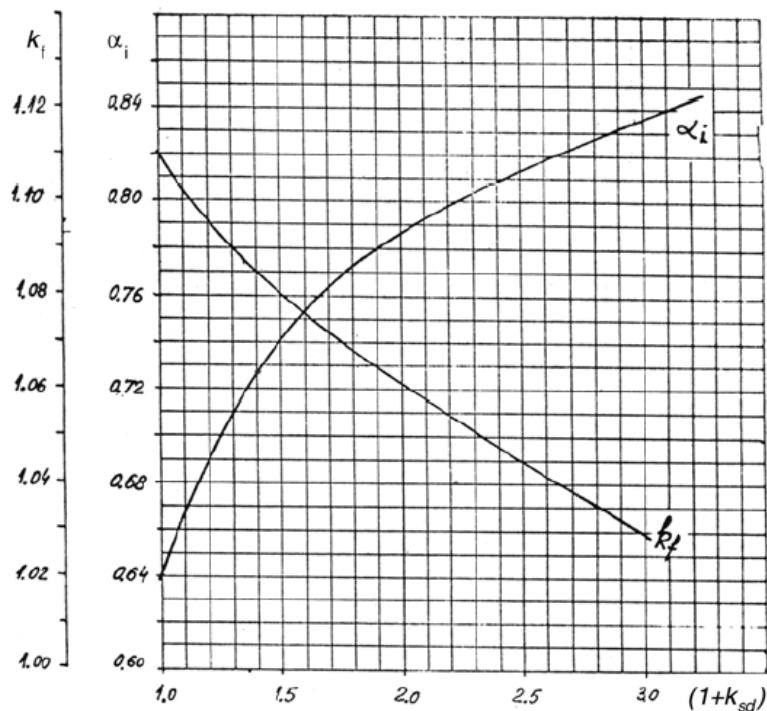
Όπου a_r : η γεωμετρική γωνία ($360^\circ/36$ αυλάκια= 10° στην περίπτωση μας).

Αρά $a = p_i \cdot a_r = 3 \cdot 10 = 30$

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τον αριθμό σπειρών ανά φάση. Ο υπολογισμός στηρίζεται στην μαγνητική ροή που περνά από το διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα και δίνεται από την σχέση:

$$\varphi = a_i \cdot \tau \cdot L \cdot B_g$$

όπου φ η μαγνητική ροή, τ το πολικό βήμα σε μέτρα, L το μήκος του πυρήνα άρα και του διακένου και B_g η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο. Η σταθερά a_i ονομάζεται flux density shape factor και προσδιορίζεται από την παρακάτω γραφική παράσταση:



Εικόνα 39 : Form Factor K_f και flux density shape factor α_i σαν συνάρτηση του $1+K_{sd}$

Όπως φαίνεται και από το σχήμα, η σταθερά εξαρτάται από το $1+K_{sd}$ που ονομάζεται tooth saturation factor. Υποθέτουμε ότι η παραπάνω σταθερά παίρνει τιμή ίση με 1.5 άρα από την γραφική παράσταση το $a_i=0.74$

The airgap flux density is recommended in the intervals:

$$B_g = (0.5 - 0.75)T \quad \text{for } 2p_1 = 2$$

$$B_g = (0.65 - 0.78)T \quad \text{for } 2p_1 = 4$$

$$B_g = (0.7 - 0.82)T \quad \text{for } 2p_1 = 6$$

$$B_g = (0.75 - 0.85)T \quad \text{for } 2p_1 = 8$$

Για μηχανές με έξι πόλους συνίσταται η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο να είναι μεταξύ 0.7-0.82T όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα. Εμείς θα επιλέξουμε μια μαγνητική επαγωγή ίση με 0.8T. Άρα, η μαγνητική ροή στο διάκενο θα είναι ίση με:

$$\varphi = a_i \cdot \tau \cdot L \cdot B_g = 0.74 \cdot 0.12 \cdot 0.24 \cdot 0.8 = 17.0496 \cdot 10^{-3} Wb$$

Στην συνέχεια, υπολογίζουμε τον αριθμό σπειρών ανά φάση, ο οποίος δίνεται από την σχέση:

$$W_i = \frac{K_E \cdot V_\varphi}{4 \cdot K_f \cdot K_\tau \cdot f \cdot \varphi}$$

όπου η σταθερά K_f ονομάζεται form factor και εξαρτάται από τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του υλικού του πυρήνα και παίρνει τιμές $1,02 < K_f < 1,11$. Όπως και με την σταθερά a_i την βρίσκουμε από την εικόνα 15. Στην εν λόγω περίπτωση παίρνει τιμή 0.76. Άρα:

$$W_i = \frac{K_E \cdot V_\varphi}{4 \cdot K_f \cdot K_\tau \cdot f \cdot \varphi} = \frac{0.965 \cdot 400}{4 \cdot 0.76 \cdot 0.966 \cdot 50 \cdot 17.0496 \cdot 10^{-3}} \approx 154 \text{ σπειρες} / \text{φάση}$$

Εν συνεχεία, υπολογίζουμε τον αριθμό αγωγών ανά αυλάκι:

$$n_s = \frac{a_i \cdot W_i}{p_i \cdot q} = \frac{1 \cdot 154}{3 \cdot 2} \approx 26 \text{ αγωγοί} / \text{αυλάκι}$$

Ο συντελεστής a_i εκφράζει τον αριθμό των παράλληλων αγωγών που στην περίπτωσή μας είναι 1.

Στη συνέχεια, θα υπολογίσουμε την διατομή των αγωγών που θα χρησιμοποιήσουμε στον στάτη. Το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα μας θα είναι ίσο με:

$$I_{ov} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_{\pi} \cdot \cos\varphi \cdot \eta \cdot \sqrt{3}} = \frac{45000W}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.85 \cdot 0.93 \cdot \sqrt{3}} = 47.435A$$

Για να υπολογίσουμε την διατομή των αγωγών, θα επιλέξουμε μια πυκνότητα ρεύματος.

$$J_{\cos} = (4 \dots 7) A/mm^2 \text{ for } 2p_1 = 2, 4,$$

$$J_{\cos} = (5 \dots 8) A/mm^2 \text{ for } 2p_1 = 6, 8$$

Για κινητήρες τεσσάρων πόλων συνίσταται η πυκνότητα ρεύματος να βρίσκεται μεταξύ 5 και 8 A/mm²

Όσο μεγαλώνει η πυκνότητα του ρεύματος, μειώνεται η διατομή των αγωγών αλλά μεγαλώνουν οι απώλειες χαλκού. Επιλέγουμε μια πυκνότητα ρεύματος ίση με 6 A/mm², για να μην έχουμε μεγάλες απώλειες και υπολογίζουμε την διατομή:

$$A_{co} = \frac{I_{ov}}{J_{\cos}} = \frac{47.435A}{6 A/mm^2} = 7.9mm^2$$

Η διάμετρος του αγωγού θα είναι ίση με:

$$d_{cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{co}}{\pi}} = 3.17mm$$

Η τυποποιημένη διάμετρος του αγωγού επιλέγεται από τον επόμενο πίνακα. Επειδή όμως οι τυποποιημένες τιμές του πίνακα φθάνουν μέχρι το 1.5mm, επαναυπολογίζουμε τη διάμετρο του αγωγού χρησιμοποιώντας 8 παράλληλους κλάδους, δηλαδή

$$d_{cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{cu}}{a_p \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 7.9}{8 \cdot \pi}} = 1.122mm$$

Έτσι επιλέγεται από τον παρακάτω πίνακα η αμέσως επόμενη τυποποιημένη διάμετρο η οποία είναι 1.15mm

Rated diameter [mm]	Insulated diameter [mm]
0.3	0.327
0.32	0.348
0.33	0.359
0.35	0.3795
0.38	0.4105
0.40	0.4315
0.42	0.4625
0.45	0.4835
0.48	0.515
0.50	0.536
0.53	0.567
0.55	0.5875
0.58	0.6185
0.60	0.639
0.63	0.6705
0.65	0.691
0.67	0.7145
0.70	0.742
0.71	0.7525
0.75	0.749
0.80	0.8455
0.85	0.897
0.90	0.948
0.95	1.0
1.0	1.051
1.05	1.102
1.10	1.153
1.12	1.173
1.15	1.2035
1.18	1.2345
1.20	1.305
1.25	1.305
1.30	1.356
1.32	1.3765
1.35	1.407
1.40	1.4575
1.45	1.508
1.5	1.559

3.2.3 Υπολογισμός διαστάσεων αυλακιών στάτη

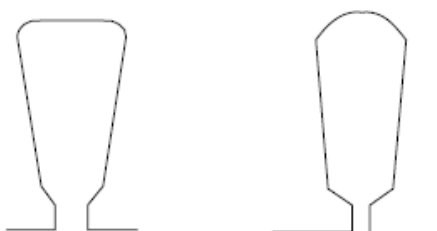
Από την στιγμή που γνωρίζουμε την διατομή των αγωγών και τον αριθμό τους, μπορούμε να υπολογίσουμε τη απαιτούμενη διατομή των αυλακιών του στάτη από την σχέση:

$$A_{su} = \frac{\pi \cdot d_{cu}^2 \cdot a_p \cdot n_s}{4 \cdot K_{fill}}$$

Όπου K_{fill} είναι μια σταθερά (fill factor), η οποία εξαρτάται από το πάχος της μόνωσης που χρησιμοποιούμε και για κινητήρες μεγαλύτερους από 10kW παίρνει τιμές από 0.4 έως 0.44. Επιλέγουμε τιμή 0.42 οπότε η διατομή των αυλακιών θα είναι ίση με:

$$A_{su} = \frac{\pi \cdot d_{cu}^2 \cdot a_i \cdot n_s}{4 \cdot K_{fill}} = \frac{\pi \cdot 1.15^2 \cdot 8 \cdot 26}{4 \cdot 0.42} = 514.137619mm^2$$

Η μορφή των αυλακιών του στάτη έχει συνήθως μία από τις παρακάτω μορφές:



Εικόνα 40: : Συνηθισμένη μορφή αυλακιών του στάτη.

Η εικόνα 41 της επόμενης σελίδας απεικονίζει αναλυτικά τις διαστάσεις που θα πρέπει να υπολογιστούν. Κάποιες από τις διαστάσεις αυτές υπολογίζονται εμπειρικά από την βιομηχανική εμπειρία. Πιο συγκεκριμένα:

$b_{os}=2-3mm$, επιλέγουμε 2,5mm.

$h_{os}=0.5-1mm$, επιλέγουμε 0.7mm.

$h_w=1-4mm$, επιλέγουμε 1mm.

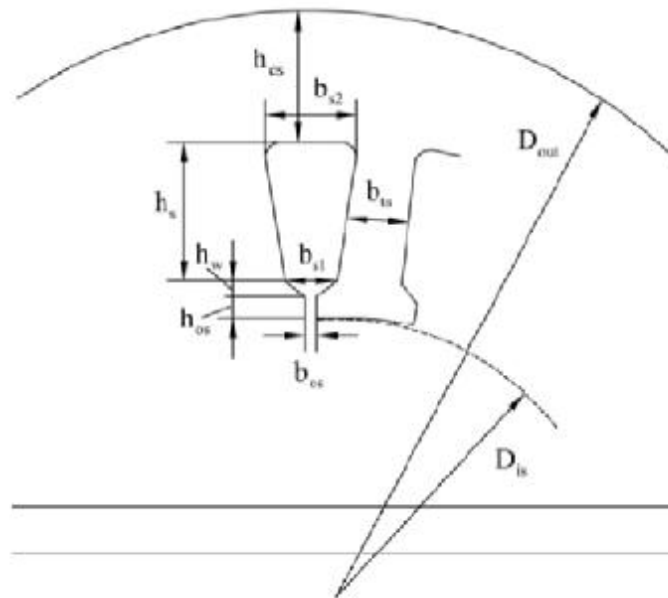
Εάν υποθέσουμε ότι όλη η μαγνητική ροή περνά μέσα από το «δόντι» του στάτη, τότε ισχύει η σχέση:

$$B_g \cdot \tau_s \cdot L = B_{ts} \cdot b_{ts} \cdot L \cdot K_{Fe}$$

Αριστερά είναι η μαγνητική ροή στο διάκενο και δεξιά η μαγνητική ροή στο «δόντι» του αυλακιού. Ο K_{Fe} είναι ένας συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τα αποτελέσματα της μόνωσης μεταξύ των μεταλλικών φύλλων από τα οποία αποτελείται ο στάτης και B_{ts} είναι η μαγνητική επαγωγή στον στάτη, η οποία συνίσταται να παίρνει τιμές μεταξύ 1,5T έως 1,65T. Η μαγνητική επαγωγή είναι φυσικά μεγαλύτερη σε σχέση με την μαγνητική επαγωγή του διακένου λόγω της παρουσίας του σιδηρομαγνητικού υλικού. Άρα:

$$b_{ts} = \frac{B_g \cdot \tau_s \cdot L}{B_{ts} \cdot L \cdot K_{Fe}} = \frac{0.8 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{1.6 \cdot 0.96} = 10.42 \cdot 10^{-3} m$$

Θα πρέπει να τονιστεί ότι το πλάτος του δοντιού δεν θα πρέπει να είναι μικρότερο από 3.5mm για κατασκευαστικούς λόγους. Άρα θα λάβουμε $b_{ts}=10.42mm$



Εικόνα 41 : Οι διαστάσεις του στάτη αναλυτικά

Από την γεωμετρία του αυλακιού προκύπτει ότι:

$$b_{s1} = \frac{\pi \cdot (D_{is} + 2h_{os} + 2h_w)}{N_s} - b_{ts}$$

$$= \frac{\pi \cdot (230 + 2 \cdot 0.7 + 2 \cdot 1) \cdot 10^{-3}}{36} - 10.42 \cdot 10^{-3}$$

$$\Rightarrow b_{s1} = 9.938 \cdot 10^{-3} m = 9.938 mm$$

Επίσης:

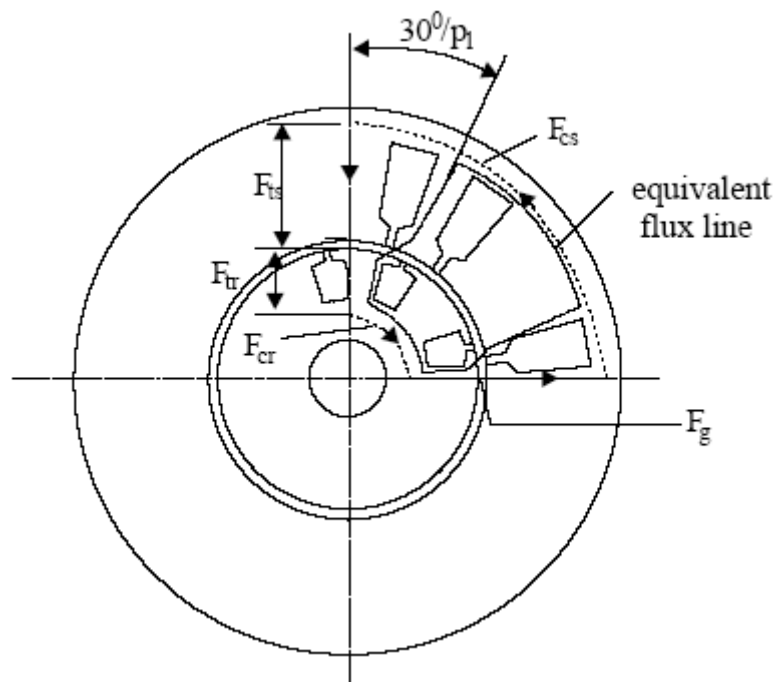
$$b_{s2} = \sqrt{4 \cdot A_{su} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{N_s}\right) + b_{s1}^2} = \sqrt{4 \cdot 336.2 \cdot \tan\left(\frac{\pi}{36}\right) + 9.938^2} \text{mm} = 14.71 \text{mm}$$

$$A_{su} = h_s \cdot \frac{(b_{s1} + b_{s2})}{2} \rightarrow h_s = \frac{2 \cdot A_{su}}{(b_{s1} + b_{s2})} \rightarrow h_s = \frac{2 \cdot 514.137619}{(9.938 + 14.71)} = 41.72 \text{mm}$$

Στη συνέχεια, θα υπολογίσουμε τον συντελεστή $1+K_{st}$ (tooth saturation factor), στον οποίο αυθαίρετα είχαμε δώσει μία τιμή ίση με 3. Ο συντελεστής δίνεται από την σχέση:

$$1 + K_{st} = 1 + \frac{F_{mts} + F_{mtr}}{F_{mg}}$$

Όπου F_{mts} , F_{mtr} και F_{mg} είναι η μαγνητεγερτική δύναμη στον σάτη, στον δρομέα και στο διάκενο αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 42: Μαγνητεγερτική δύναμη στον σάτη, στον δρομέα και στο διάκενο (F_{mts} , F_{mtr} και F_{mg})

Η μαγνητεγερτική δύναμη στο διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα δίνεται από την σχέση:

$$F_{mg} = K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0}$$

όπου K_C είναι ο συντελεστής Carter (Carter coefficient) που δίνεται από την σχέση:

$$K_C = \frac{B_{g1max}}{B_{g1}}$$

όπου B_{gmax} είναι η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο χωρίς ανώτερες αρμονικές και B_g είναι η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο με ανώτερες αρμονικές (αναφέρεται στην βασική).

Ο συντελεστής Κάρτερ μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά αλλά χρειάζονται κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του δρομέα. Για να συνεχίσουμε την μελέτη, θεωρούμε μία τυπική τιμή για τον συντελεστή αυτόν ίση με 1,2. Προκύπτει λοιπόν ότι

$$F_{mg} = K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0} = 1,2 \cdot 0,55 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,8}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 420At$$

Η μαγνητεγερτική δύναμη στον στάτη F_{mts} , δίνεται από την σχέση:

$$F_{mts} = H_{ts}(h_s + h_{os} + h_w)$$

όπου H_{ts} είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου στον στάτη.

Από τον πίνακα που ακολουθεί, παίρνουμε συνηθισμένες (τυποποιημένες) τιμές της καμπύλης μαγνήτισης για σιδηρομαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές μηχανές:

B[T]	H[A/m]	B[T]	H[A/m]
0.05	22.8	1.05	237
0.1	35	1.1	273
0.15	45	1.15	310
0.2	49	1.2	356
0.25	57	1.25	417
0.3	65	1.3	482
0.35	70	1.35	585
0.4	76	1.4	760
0.45	83	1.45	1050
0.5	90	1.5	1340
0.55	98	1.55	1760
0.6	106	1.6	2460
0.65	115	1.65	3460
0.7	124	1.7	4800
0.75	135	1.75	6160
0.8	148	1.8	8270
0.85	162	1.85	11170
0.9	177	1.9	15220
0.95	198	1.95	22000
1.0	220	2.0	34000

Επιλέγοντας $B_{ts}=1.6T$ (συνήθως παίρνει τιμές μεταξύ $1.5T - 1.65T$) προκύπτει ότι $H_{ts}=2460At$. Άρα:

$$F_{mts} = H_{ts} (h_s + h_{os} + h_w) = 2460 \cdot (41.72 + 0.7 + 1) \cdot 10^{-3} = 106.8132At$$

Η μαγνητεγερτική δύναμη στον δρομέα υπολογίζεται από την σχέση:

$$F_{mtr} = K_{st} \cdot F_{mg} - F_{mts} = 0.5 \cdot 420 - 106.8132 = 103.1868At$$

Επειδή η μαγνητεγερτική δύναμη στον δρομέα F_{mtr} είναι περίπου ίση με αυτή του στάτη F_{mts} δεν απαιτείται καμία αλλαγή στην σχεδίαση του κινητήρα σε αυτή τη φάση).

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε το h_{cs} (βλέπε εικόνα 4). Αυτό δίνεται από την σχέση:

$$h_{cs} = \frac{D_{out} - (D_{IS} + 2 \cdot (h_{os} + h_w + h_s))}{2} = \frac{328.6 - (230 + 2 \cdot (0.7 + 1 + 41.72))}{2}$$

$$\rightarrow h_{cs} = \frac{328.6 - 316.84}{2} \rightarrow h_{cs} = 5.88mm$$

Στη συνέχεια, θα υπολογίσουμε την μαγνητική επαγωγή στον στάτη και συγκεκριμένα στον χώρο μεταξύ των αυλακιών και της εξωτερικής περιμέτρου B_{cs} (Back core flux density). Η συγκεκριμένη μαγνητική ροή θα υπολογιστεί από την σχέση:

$$B_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot h_{cs}} = \frac{17.0496 \cdot 10^{-3} Wb}{2 \cdot 0.24m \cdot 5.88 \cdot 10^{-3}m} = 6.04T$$

Η συγκεκριμένη τιμή της μαγνητικής επαγωγής δεν είναι αποδεκτή εάν λάβουμε υπόψη μας ότι θέλουμε να βρίσκεται μεταξύ 1.4T-1.7T

Για να επιλύσουμε το πρόβλημα θα αυξήσουμε την εξωτερική διάμετρο του στάτη.

Για να μειωθεί η μαγνητική επαγωγή στον πυρήνα του στάτη σε τιμή ίση με 1,5T θα πρέπει το h_{cs} να γίνει ίσο με:

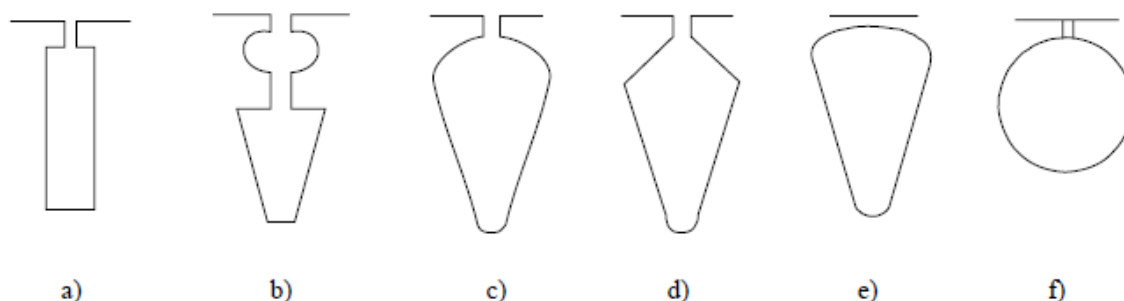
$$h_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot B_{cs}} = \frac{17.0496 \cdot 10^{-3} Wb}{2 \cdot 0.24m \cdot 1.5T} = 23.68mm$$

Άρα η εξωτερική διάμετρος θα πρέπει να αυξηθεί κατά $2 \cdot (23.68 - 5.88)mm = 35.6mm = 3.56cm$. Άρα η εξωτερική διάμετρος της μηχανής θα είναι:

$$D_{out} = 32.86cm + 3.56cm = 36.42cm = 364.2mm$$

3.3 Υπολογισμών των στοιχείων του δρομέα

Αρχικά θα υπολογίσουμε τη μορφή και τον αριθμό των αγωγών του δρομέα. Στην εικόνα 43 φαίνονται οι τυπικές μορφές των αγωγών του δρομέα



Εικόνα 43: Τυπικές μορφές των αγωγών του δρομέα:

Για λόγους απλοποίησης των υπολογισμών που θα ακολουθήσουν επιλέγουμε την πρώτη μορφή. Στην συνέχεια θα επιλέξουμε τον αριθμό των αγωγών. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι τυποποιημένες τιμές που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία:

$2p_1$	N_s	N_r – skewed rotor slots
2	24	18, 20, 22, 28, 30, 33, 34
	36	25, 27, 28, 29, 30, 43
	48	30, 37, 39, 40, 41
4	24	16, 18, 20, 30, 33, 34, 35, 36
	36	28, 30, 32, 34, 45, 48
	48	36, 40, 44, 57, 59
	72	42, 48, 54, 56, 60, 61, 62, 68, 76
6	36	20, 22, 28, 44, 47, 49
	54	34, 36, 38, 40, 44, 46
	72	44, 46, 50, 60, 61, 62, 82, 83
8	48	26, 30, 34, 35, 36, 38, 58
	72	42, 46, 48, 50, 52, 56, 60
12	72	69, 75, 80
	90	86, 87, 93, 94

Επιλέγουμε 44 αγωγούς και συνεχίζουμε με τον υπολογισμό του ονομαστικού ρεύματος ενός αγωγού του δρομέα:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_i \cdot K_{w1} \cdot I_{1n} \cdot K_I}{N_r}$$

Όπου :

$$K_I = 0.8 \cdot \cos\varphi + 0.2 = 0.88$$

Το $\cos\varphi$ είναι ο συντελεστής ισχύος της μηχανής που θέλουμε να επιτύχουμε (0,85 στην περίπτωση μας). Άρα:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_i \cdot K_{w1} \cdot I_{1n} \cdot K_I}{N_r} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 154 \cdot 0.966 \cdot 47.435 \cdot 0.88}{44} = 846.794A$$

Για κινητήρες με μεγάλη απόδοση θα πρέπει η πυκνότητα ρεύματος στον αγωγό (μπάρα) του δρομέα να είναι ίση με $3,42A/mm^2$. Για να το επιτύχουμε αυτό θα πρέπει η διατομή της κάθε μπάρας του δρομέα να είναι ίση με:

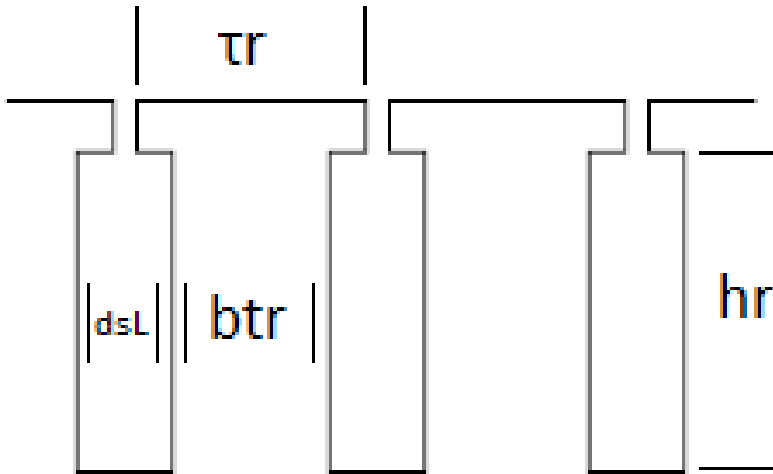
$$A_b = \frac{846.794A}{3.42 A/mm^2} = 247.6mm^2$$

Το ρεύμα στους δακτυλίους που βραχυκυκλώνουν τις μπάρες του δρομέα (end ring current) θα είναι ίσο με:

$$I_{er} = \frac{I_b}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p_i}{N_r}} = \frac{846.794A}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 3}{44}} = 1991.84A$$

Η διατομή του δακτυλίου βραχυκύκλωσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$A_{er} = \frac{I_{er}}{J_{er}} = \frac{1991.84A}{0.8 \cdot 3.42 A/mm^2} = 728mm^2$$



Εικόνα 44. Οι βασικές διαστάσεις των αγωγών του δρομέα.

3.3.1 Υπολογισμός των διαστάσεων των αγωγών του δρομέα.

Θα υπολογίσουμε αρχικά την απόσταση ανάμεσα σε δυο αγωγούς του δρομέα (Rotor slot pitch).

$$\tau_r = \frac{\pi \cdot (D_{is} - 2g)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (230 - 2 \cdot 0.55)}{44} = 16.335mm$$

Θεωρώντας ότι η μαγνητική επαγωγή στο «δόντι» του δρομέα είναι ίση με 1,6T υπολογίζουμε την διάσταση b_{tr} από την σχέση:

$$b_{tr} \cdot K_{fe} \cdot B_{tr} = B_g \cdot \tau_r$$

Η παραπάνω σχέση προκύπτει θεωρώντας ότι η μαγνητική ροή στο δόντι του στάτη και στο διάκενο είναι ίση. Άρα προκύπτει ότι:

$$b_{tr} = \frac{B_g \cdot \tau_r}{K_{fe} \cdot B_{tr}} = \frac{0.8T \cdot 16.335 \cdot 10^{-3}}{0.96 \cdot 1.6T} = 8.5 \cdot 10^{-3}mm$$

Λόγω της πολύ μικρής απόστασης του δρομέα από την εσωτερική περιφέρεια του στάτη θεωρούμε κατά προσέγγιση ότι η διάμετρος του δρομέα είναι ίση με:

$$D_{re} = D_{is} = 230mm$$

Άρα η περιφέρεια του δρομέα θα είναι:

$$C = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot \frac{230}{2} = 722.2mm$$

Από το σχήμα των αγωγών προκύπτει ότι:

$$d_{SL} = \tau_r - b_{tr} = 16.335mm - 8.5mm = 7.835mm$$

Το βάθος του αγωγού θα είναι:

$$h_r = \frac{A_b}{d_{SL}} = \frac{247.6 \text{ mm}^2}{7.835mm} = 31.6mm$$

Οι άλλες δυο διαστάσεις b_{or} και h_{or} παίρνουν τυποποιημένες τιμές 1,5mm και 0,5mm αντίστοιχα.

Γνωρίζοντας τις ακριβείς διαστάσεις του δρομέα και των αγωγών του θα υπολογίσουμε την μαγνητεγερτική δύναμη στο «δόντι» του δρομέα. Αν θέλουμε η μαγνητική επαγωγή να είναι ίση με 1.6T τότε από τον πίνακα 3 για το υλικό που χρησιμοποιούμε η ένταση του μαγνητικού πεδίου θα είναι 2460A/m. Άρα η μαγνητεγερτική δύναμη που απαιτείται είναι ίση με:

$$F_{mtr} = H_{tr} \cdot (h_r + h_{or} + d_{SL}) = 2460 \cdot A/m \cdot (31.6 + 0.5 + 7.835) \cdot 10^{-3}m \\ = 98.24At$$

Η τιμή που υπολογίσαμε είναι κοντά στη μαγνητεγερτική δύναμη του στάτη F_{mts} , όπως πρέπει να είναι κάτι που κάνει την σχεδίαση μέχρι τώρα αποδεκτή.

Αυτό που απομένει είναι ο υπολογισμός της απόστασης του δρομέα πίσω (κάτω) από τα αυλάκια. Η μαγνητική επαγωγή στο χώρο αυτό του δρομέα θα πρέπει να είναι μεταξύ 1,4T έως 1,7T. Επιλέγοντας τιμή ίση με 1.6T έχουμε:

$$h_{cr} = \frac{\Phi}{2} \cdot \frac{1}{L \cdot B_{cr}} = \frac{17.0496 \cdot 10^{-3}Wb}{2 \cdot 0.24m \cdot 1.6T} = 22.2mm$$

3.3.2 Υπολογισμός της διαμέτρου του άξονα.

Στην συνέχεια θα υπολογίσουμε την διάμετρο του άξονα της μηχανής. Η μέγιστη δυνατή διάμετρος εξαρτάται από τις διαστάσεις του δρομέα και των αυλακιών και παίρνει τιμή ίση με:

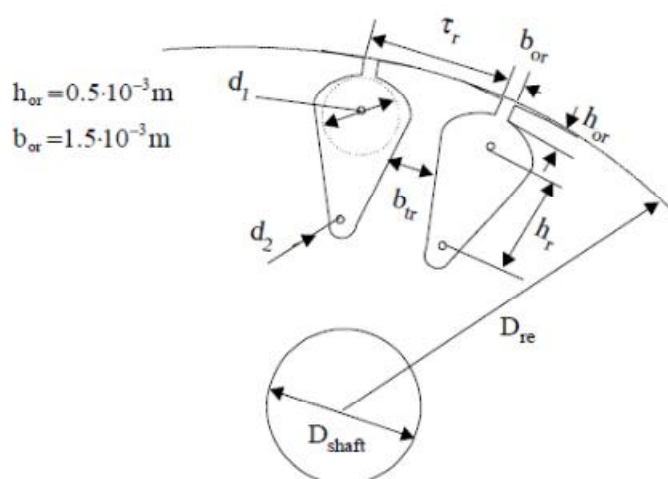
$$D_{shaft} \leq D_{is} - 2 \cdot (h_r + h_{or} + h_{cr}) - 2 \cdot g$$

$$\Rightarrow D_{shaft} \leq 230 - 2 \cdot (37.447 + 0.5 + 22.2) - 2 \cdot 0.55 = 108.606mm$$

Η ροπή στον άξονα του κινητήρα (με ολίσθηση ίση με 0.012) υπολογίζεται ως εξής:

$$T = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{45000W}{2 \cdot \pi \cdot \frac{988}{60} \cdot (1 - 0.012)} = 440.44Nm$$

Με βάση την βιομηχανική εμπειρία για μια τέτοια ροπή η διάμετρος του άξονα είναι ικανοποιητική.



Εικόνα 45. Γενική μορφή του δρομέα και του άξονα του.

3.4 Υπολογισμός ρεύματος μαγνήτισης

Έχοντας καθορίσει τις διαστάσεις της μηχανής μας και γνωρίζοντας την απαιτούμενη μαγνητεγερτική δύναμη ώστε να έχουμε την μαγνητική επαγωγή που θέλουμε στα διάφορα σημεία του κινητήρα, θα υπολογίσουμε το ρεύμα μαγνήτισης που απαιτείται για την δημιουργία των πεδίων αυτών.

Αρχικά θα υπολογίσουμε την ολική μαγνητεγερτική δύναμη που απαιτείται, η οποία είναι το άθροισμα των επιμέρους μαγνητεγερτικών δυνάμεων (βλέπε και εικόνα 5):

$$F_{1m} = 2 \cdot (K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0} + F_{mts} + F_{mtr} + F_{mcs} + F_{mcr})$$

Όπου K_C είναι ο συντελεστής Carter για τον οποίο είχαμε μέχρι τώρα θεωρήσει μια τυπική τιμή ίση με 1,2. Τώρα που γνωρίζουμε τις διαστάσεις του κινητήρα μπορούμε να του υπολογίσουμε αναλυτικά ως εξής:

$$K_C = K_{c1} \cdot K_{c2}$$

Όπου:

$$K_{c1} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1}$$

$$K_{c2} = \frac{\tau_r}{\tau_r - \gamma_2}$$

Και:

$$\gamma_1 = \frac{b_{os}^2}{5 \cdot g + b_{os}} = \frac{2.5^2}{5 \cdot 0.55 + 2.5} = 1.19$$

$$\gamma_2 = \frac{b_{or}^2}{5 \cdot g + b_{or}} = \frac{1.5^2}{5 \cdot 0.55 + 1.5} = 0.53$$

Άρα:

$$K_{c1} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1} = \frac{20}{20 - 1.19} = 1.0633$$

$$K_{c2} = \frac{\tau_r}{\tau_r - \gamma_2} = \frac{16.335}{16.335 - 0.53} = 1.0335$$

$$K_C = K_{c1} \cdot K_{c2} = 1.0633 \cdot 1.0335 = 1.1$$

Η τιμή του συντελεστή είναι κοντά στην τιμή 1,2 που υποθέσαμε αρχικά άρα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι υπολογισμοί μας ως τώρα είναι σωστοί.

Στη συνέχεια θα υπολογισθούν οι αρμονικές της μαγνητεγερτικής δύναμης F_{mcs} και F_{mcr} . Από τους υπολογισμούς του στάτη και του δρομέα παίρνουμε $B_{ts}=1.6T$ και $B_{tr}=1.6T$, οπότε από τον πίνακα προκύπτει $H_{cs}=2460A/m$ και $H_{cr}=2460A/m$. Έτσι

$$F_{mcs}=C_{cs} \frac{\pi \cdot (D_{out}-h_{cs})}{2 \cdot p_i} \cdot H_{cs}=0.316 \frac{\pi \cdot (364.2-5.88) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3} \cdot 2460=145.77At$$

$$F_{mcr}=C_{cr} \frac{\pi \cdot (D_{shaft}+h_{cr})}{2 \cdot p_i} \cdot H_{cr}=0.316 \frac{\pi \cdot (108.606+22.2) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3} \cdot 2460=53.21At$$

Όπου

$$C_{CS} = 0.88 \cdot e^{-0.4 \cdot B_{ts}^2} = 0.88 \cdot e^{-0.4 \cdot 1.6^2} = 0.316$$

$$C_{Cr} = 0.88 \cdot e^{-0.4 \cdot B_{tr}^2} = 0.88 \cdot e^{-0.4 \cdot 1.6^2} = 0.316$$

Οπότε

$$F_{1m}=2 \cdot \left(K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0} + F_{mts} + F_{mtr} + F_{mcs} + F_{mcr} \right) =$$

$$2 \cdot \left(1.1 \cdot 0.55 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0.8}{1.256 \cdot 10^{-6}} + 106.8132 + 98.24 + 145.77 + 53.21 \right) = 1578.77At$$

$$1+K_{st} = \frac{F_{1m}}{2 \cdot F_{mg}} = \frac{1578.77}{2 \cdot 420} = 1.8795$$

Και τελικά το ρεύμα μαγνήτισης δίνεται από τη σχέση

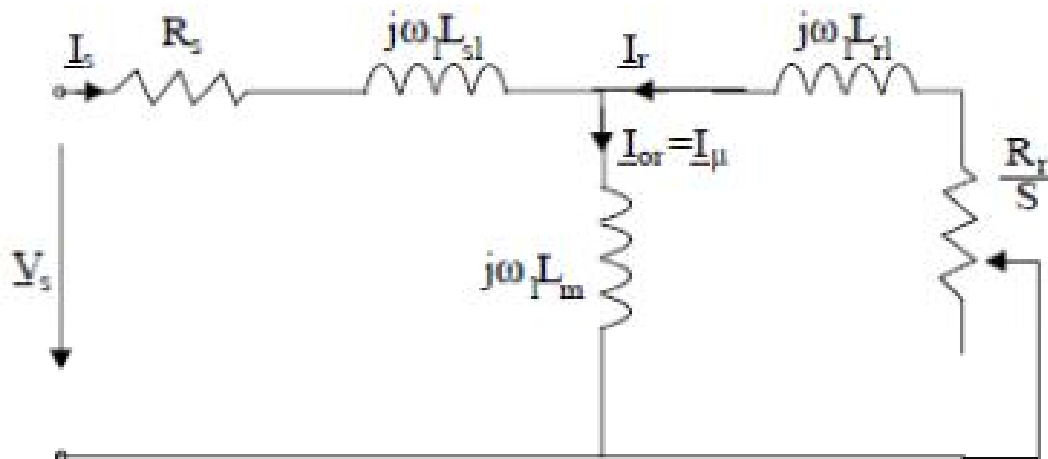
$$I_{\mu} = \frac{\pi \cdot \frac{F_{1m}}{2} \cdot p_i}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot K_{wi} \cdot W_i} = \frac{3.14 \cdot \frac{1578.77}{2} \cdot 3}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot 0.966 \cdot 154} = 11.78A$$

$$i_{\mu} = \frac{I_{\mu}}{I_{ov}} = \frac{11.78}{47.435} = 0.2483 = 24.83\%$$

3.5 Υπολογισμός ισοδύναμου κυκλώματος

3.5.1 Υπολογισμός ωμικών αντιστάσεων

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα είναι το παρακάτω:



Εικόνα 46: Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα

Στο παραπάνω ισοδύναμο δεν εμφανίζεται η ωμική αντίσταση R_{fe} που αντιστοιχεί στις απώλειες σιδήρου. Η ωμική αντίσταση (ανά φάση) του στάτη δίνεται από τη σχέση:

$$R_S = \rho_{CO} \cdot \frac{l_C \cdot W_i}{A_{CO} \cdot a_i}$$

Όπου ρ_{CO} είναι η ειδική αντίσταση του χαλκού στους 80°C και l_C είναι το μήκος του τυλίγματος κάθε φάσης:

$$l_C = 2 \cdot (L + l_{end})$$

Όπου L είναι το μήκος του στάτη και l_{end} είναι το μήκος του τυλίγματος που είναι ουσιαστικά έξω από τα αυλάκια του στάτη. Το μήκος l_{end} για μηχανές 6 πόλων δίνεται προσεγγιστικά από την σχέση:

$$l_{end} = \frac{\pi}{2} \cdot y + 0.018m$$

Όπου y είναι το βήμα του τυλίγματος. Στην περίπτωσή μας θα χρησιμοποιήσουμε λόγο $y/\tau = 7/9$, ο οποίος διατηρεί την 5^η αρμονική της μαγνητεγερτικής δύναμης χαμηλά. Οι αρμονικές της μαγνητεγερτικής δύναμης είναι υπεύθυνες για την εμφάνιση στον κινητήρα παρασιτικών ροών, ακτινωτών δυνάμεων, επιπλέον

απώλειες πυρήνα και χαλκού, θορύβου και κραδασμών και είναι επιθυμητό όσο το δυνατόν να διατηρούνται σε χαμηλές τιμές.

$$\frac{y}{\tau} = \frac{7}{9} \Rightarrow y = \frac{7}{9} \cdot \tau = \frac{7}{9} \cdot 0.12m = 0.0933m$$

Άρα:

$$l_{end} = \frac{\pi}{2} \cdot y + 0.018m = \frac{\pi}{2} \cdot 0.0933 + 0.018 = 0.165m$$

Η ειδική αντίσταση του χαλκού στους 20°C είναι $1,78 \times 10^{-8} \Omega m$. Στους 80°C (ενδεικτική περίπτωση θερμοκρασίας κατά την λειτουργία της μηχανής) η ειδική αντίσταση θα είναι ίση με:

$$\rho_{80} = \rho_{20} \cdot \left(1 + \frac{1}{273} \cdot (80 - 20) \right) = 2,17 \cdot 10^{-8} \Omega m$$

Το συνολικό μήκος του τυλίγματος κάθε φάσης θα είναι:

$$l_c = 2 \cdot (L + l_{end}) = 2 \cdot (0.24 + 0,0933) = 0.6666m$$

Η αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη θα είναι ίση με:

$$R_S = \rho_{Co} \cdot \frac{l_c \cdot W_i}{A_{co} \cdot a_i} = 2.17 \cdot 10^{-8} \Omega m \cdot \frac{0.6666m \cdot 154}{7.9 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot 0.74} = 0.381 \Omega$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την αντίσταση του δρομέα. Η συνδυασμένη αντίσταση των αγωγών του δρομέα και των δακτυλίων βραχυκύκλωσης δίνεται από την σχέση:

$$R_{be} = \rho_{Al} \cdot \left[\frac{L}{A_b} \cdot K_R + \frac{l_{er}}{2 \cdot A_{er} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi P_1}{N_r} \right)} \right]$$

Στην παραπάνω σχέση ο συντελεστής K_R ονομάζεται skin effect resistance coefficient. Η ειδική αντίσταση του αλουμινίου στους 20°C είναι ίση με $3,1 \times 10^{-8} \Omega m$ (οι αγωγοί του δρομέα είναι κατασκευασμένοι από αλουμίνιο). Το μήκος του τομέα του δακτυλίου βραχυκύκλωσης που αντιστοιχεί σε έναν αγωγό του δρομέα θα είναι:

$$l_{er} = \frac{\pi \cdot (D_{er} - b)}{N_r}$$

Όπου b είναι το ύψος (ή βάθος) του δακτυλίου βραχυκύκλωσης:

$$b = h_r + h_{or} + d_{SL} = 31.6 + 0.5 + 7.835 = 35.5175mm$$

$$D_{er} = D_{re} - 3,5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot g = 0,23 - 0,0035 - 2 \cdot 0,0055 = 0,2155m$$

Συνεπώς το μήκος του τομέα του δακτυλίου βραχυκύκλωσης θα είναι:

$$l_{er} = \frac{\pi \cdot (D_{er} - b)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (0,2155 - 0,0355175)}{44} = 12,844 \cdot 10^{-3}m$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την σταθερά K_R από την σχέση:

$$K_R = \frac{R_{AC}}{R_{DC}} = \xi \cdot \frac{(\sinh 2\xi + \sin 2\xi)}{(\cos 2\xi - \cos 2\xi)} \approx \xi$$

Οπου

$$\xi = \beta_s \cdot h_r \cdot \sqrt{s}$$

Το h_r είναι το βάθος των αγωγών του δρομέα και ο συντελεστής β_s είναι ο λόγος, του βάθους του αγωγού, προς το μέρος εκείνο του αγωγού που διαπερνάται από μαγνητικό πεδίο. Ο συντελεστής δίνεται από την σχέση:

$$\beta_s = \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_o}{2 \cdot \rho_{Al}}} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 50 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3,1 \cdot 10^{-8}}} = 79,75m^{-1}$$

$$\xi = \beta_s \cdot h_r \cdot \sqrt{s} = 79,75m^{-1} \cdot 0,0316m \cdot 1 = 2,5201$$

Άρα η αντίσταση του δρομέα στους 80^0C θα είναι ίση με:

$$R_{be}^{80} = \rho_{Al} \cdot \left[1 + \frac{1}{273} (80-20) \right] \cdot \left[\frac{L}{A_b} \cdot K_R + \frac{l_{er}}{2 \cdot A_{er} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi P_1}{N_r} \right)} \right] =$$

$$3,1 \cdot 10^{-8} \left[1 + \frac{1}{273} (80-20) \right] \cdot \left[\frac{0,24 \cdot 2,5201}{247,6 \cdot 10^{-6}} + \frac{12,844 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 728 \cdot 10^{-3} \cdot \sin^2 \left(\frac{3\pi}{44} \right)} \right] = 92,375 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Η παραπάνω αντίσταση είναι η πραγματική αντίσταση του δρομέα. Στο ισοδύναμο κύκλωμα η αντίσταση είναι ανηγμένη στον στάτη. **Η ανηγμένη αντίσταση υπολογίζεται από την σχέση:**

$$(R'_r)_{s=1} = \frac{4 \cdot m}{N_r} \cdot (W_i \cdot K_{wl})^2 \cdot R_{be}^{80} = \frac{4 \cdot 3}{44} \cdot (154 \cdot 0,966)^2 \cdot 92,375 \cdot 10^{-6} \Omega = 0,5575 \Omega$$

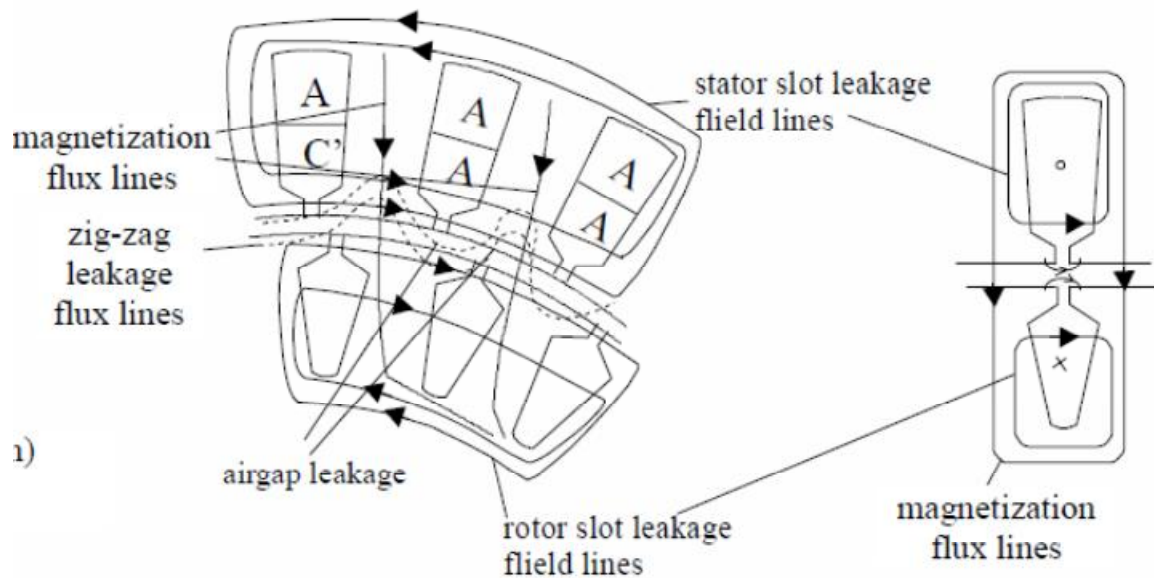
3.5.2 Υπολογισμός επαγωγικών αντιδράσεων

Σε μια επαγωγική μηχανή ένα μέρος του μαγνητικού πεδίου διαπερνά τόσο τον στάτη όσο και τον δρομέα (magnetization flux lines – αμοιβαία ροή) ενώ υπάρχουν και δυναμικές γραμμές που περνούν μόνο από τον στάτη ή μόνο από τον δρομέα (leakage flux lines – ροή σκέδασης). Τόσο η αμοιβαία ροή όσο και η ροή σκέδασης στο εσωτερικό ενός επαγωγικού κινητήρα απεικονίζονται στο σχήμα της επόμενης σελίδας.

Η επαγωγική αντίδραση του στάτη (ανά φάση) δίνεται από τη σχέση:

$$X_{SL} = 2 \cdot \mu_0 \cdot \omega_1 \cdot L \cdot \frac{W_i^2}{p_1 \cdot q} \cdot (\lambda_s + \lambda_{ds} + \lambda_{er})$$

Όπου λ_s , λ_{ds} , λ_{er} είναι συντελεστές που ονομάζονται slot coefficient, differential coefficient και end ring coefficient αντίστοιχα).



Εικόνα 47. Αμοιβαία ροή και ροή διαρροής στο εσωτερικό μιας επαγωγικής μηχανής.

Ο συντελεστής λ_s υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda_s = \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{h_s}{b_{s1} + b_{s2}} + \frac{2 \cdot h_w}{b_{os} + b_{s1}} + \frac{h_{os}}{b_{os}} \right] \cdot \left(\frac{1 + 3\beta}{4} \right)$$

Όπου $\beta = y/\tau = 7/9$. Οι υπόλοιποι όροι της εξίσωσης αντιστοιχούν στις διαστάσεις των αυλακιών του στάτη. Αντικαθιστώντας τις τιμές στην παραπάνω εξίσωση έχουμε:

$$\lambda_s = \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{h_s}{b_{s1} + b_{s2}} + \frac{2 \cdot h_w}{b_{os} + b_{s1}} + \frac{h_{os}}{b_{os}} \right] \cdot \left(\frac{1 + 3\beta}{4} \right)$$

$$= \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{41.72}{9.938 + 14.71} + \frac{2 \cdot 1}{2,5 + 9.938} + \frac{0.7}{2,5} \right] \cdot \left(\frac{1 + 3 \cdot 7/9}{4} \right) = 2.483$$

Ο συντελεστής λ_{ds} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda_{ds} = \frac{0,9 \cdot \tau_s \cdot q^2 \cdot K_{w1}^2 \cdot C_s \cdot \gamma_{ds}}{K_c \cdot g \cdot (1 + K_{st})}$$

Όπου

$$C_s = 1 - 0,033 \cdot \frac{b_{os}^2}{g \cdot \tau_s}$$

Και

$$\gamma_{ds} = (0,18 \cdot \sin\varphi_1 + 1,24) \cdot 10^{-2}$$

$$\varphi_1 = \pi \cdot (6\beta - 5.5) = 180 \left(6 \cdot \frac{7}{9} - 5.5 \right) = -150^\circ$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$\gamma_{ds} = (0,18 \cdot \sin\varphi_1 + 1,24) \cdot 10^{-2} = 1.15 \cdot 10^{-2}$$

$$C_s = 1 - 0,033 \cdot \frac{b_{os}^2}{g \cdot \tau_s} = 1 - 0,033 \cdot \frac{2.5^2}{0.55 \cdot 20} = 0.98125$$

Και

$$\lambda_{ds} = \frac{0,9 \cdot \tau_s \cdot q^2 \cdot K_{w1}^2 \cdot C_s \cdot \gamma_{ds}}{K_c \cdot g \cdot (1 + K_{sd})}$$

$$= \frac{0,9 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot 4^2 \cdot 0,966^2 \cdot 0,98125 \cdot 1,15 \cdot 10^{-2}}{1,2 \cdot 0,55 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 0,5)} = 0.306$$

Ο συντελεστής λ_{er} για τύλιγμα μονού στρώματος (single layer winding) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda_{er} = 0,67 \cdot \frac{q}{L} \cdot (l_{end} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) = 0,67 \cdot \frac{4}{0,24} \cdot \left(0,165 - 0,64 \cdot \frac{7}{9} \cdot 0,12 \right) \Rightarrow \lambda_{er}$$

$$= 1.175$$

Από τα παραπάνω υπολογίζεται η επαγωγική αντίδραση του στάτη από τη σχέση:

$$\begin{aligned}
X_{SL} &= 2 \cdot \mu_0 \cdot \omega_1 \cdot L \cdot \frac{W_i^2}{p_1 \cdot q} \cdot (\lambda_s + \lambda_{ds} + \lambda_{er}) \\
&= 2 \cdot 1.256 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0.24 \cdot \frac{154^2}{3 \cdot 4} \cdot (2.483 + 0.306 + 1.175) \\
&= 1.483 \Omega
\end{aligned}$$

Η επαγωγική αντίδραση του δρομέα (δεν είναι ανηγμένη στο στάτη) δίνεται από τη σχέση:

$$X_{be} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot L \cdot (\lambda_r \cdot K_X + \lambda_{dr} + \lambda_{er})$$

Όπου

$$\lambda_r = 0.66 + \frac{2 \cdot h_r}{3 \cdot d_{SL}} + \frac{h_{or}}{b_{or}} = 0.66 + \frac{2 \cdot 31.6}{3 \cdot 7.835} + \frac{0.5}{1.5} = 3.682$$

$$\lambda_{dr} = \frac{0.9 \cdot \tau_r \cdot \gamma_{dr}}{K_c \cdot g} \cdot \left(\frac{N_r}{6 \cdot p_i}\right)^2$$

Ο συντελεστής γ_{dr} δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma_{dr} = 9 \cdot \left(\frac{6 \cdot p_i}{N_r}\right)^2 \cdot 10^{-2} = 9 \cdot \left(\frac{6 \cdot 3}{44}\right)^2 \cdot 10^{-2} = 1.506 \cdot 10^{-2}$$

Άρα:

$$\lambda_{dr} = \frac{0.9 \cdot \tau_r \cdot \gamma_{dr}}{K_c \cdot g} \cdot \left(\frac{N_r}{6 \cdot p_i}\right)^2 = \frac{0.9 \cdot 16.335 \cdot 1.506 \cdot 10^{-2}}{1.2 \cdot 0.55} \cdot \left(\frac{44}{6 \cdot 3}\right)^2 = 2$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον συντελεστή λ_{er} από τη σχέση:

$$\lambda_{er} = \frac{2.3 \cdot (D_{er} - b)}{N_r \cdot L \cdot 4 \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi \cdot P_1}{N_r}\right)} \cdot \log \left[\frac{4.7 \cdot (D_{er} - b)}{b + 2a} \right]$$

Στην παραπάνω σχέση το a είναι το πλάτος του δακτυλίου βραχυκύκλωσης και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{A_{er}}{b} = \frac{728 \cdot 10^{-3} \text{mm}^2}{35.5175 \text{mm}} = 20.497 \text{mm}$$

Άρα:

$$\begin{aligned}\lambda_{er} &= \frac{2.3 \cdot (D_{er} - b)}{N_r \cdot L \cdot 4 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot P_1}{N_r}\right)} \cdot \log\left[\frac{4.7 \cdot (D_{er} - b)}{b + 2a}\right] \\ &= \frac{2.3 \cdot (215.5 - 35.5175)}{44 \cdot 240 \cdot 4 \cdot \sin^2\left(\frac{3\pi}{44}\right)} \cdot \log\left[\frac{4.7 \cdot (215.5 - 35.5175)}{35.5175 + 2 \cdot 20.497}\right] \\ &= 0.22635\end{aligned}$$

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε τον συντελεστή επιδερμικού φαινομένου K_x (skin effect coefficient for leakage reactance) από τη σχέση:

$$\begin{aligned}K_x &= \frac{3 \cdot [\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)]}{2 \cdot \xi \cdot [\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)]} = \frac{3 \cdot [\sinh(5.0402) - \sin(5.0402)]}{2 \cdot 2.5201 \cdot [\cosh(5.0402) - \cos(5.0402)]} \\ &= \frac{3 \cdot (77.247 - 0.08785)}{2 \cdot 2.5201 \cdot [77.254 - 0.996]} = 0.6\end{aligned}$$

Η επαγωγική αντίδραση του δρομέα θα είναι ίση με:

$$\begin{aligned}X_{be} &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot L \cdot (\lambda_r \cdot K_x + \lambda_{dr} + \lambda_{er}) \\ &= 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1.256 \cdot 10^{-6} \cdot 0.24 \cdot (3.682 \cdot 0.6 + 2 + 0.22635) \\ &= 419.83 \cdot 10^{-6} \Omega\end{aligned}$$

Η ανηγμένη στο στάτη επαγωγική αντίδραση του δρομέα θα είναι:

$$\begin{aligned}(X_{rl})_{s=1} &= 4 \cdot m \cdot \frac{(W_1 \cdot K_{w1})^2}{N_r} \cdot X_{be} = 4 \cdot 3 \cdot \frac{(154 \cdot 0.966)^2}{44} \cdot 419.83 \cdot 10^{-6} \\ &= 2.534 \Omega\end{aligned}$$

Τελικά

$$(X_{sl})_{sat}^{s=1} = X_{sl} \cdot 0.75 = 1.483 \cdot 0.75 = 1.11225 \Omega$$

$$(X_{rl})_{sat}^{s=1} = X_{rl} \cdot 0.65 = 2.534 \cdot 0.65 = 1.6471 \Omega$$

Απομένει ο υπολογισμός της αντίδρασης μαγνήτισης από τη σχέση:

$$X_m = \sqrt{\left(\frac{V_{ph}}{I_\mu}\right)^2 - R_s^2} - X_{sl} = \sqrt{\left(\frac{230}{11.78}\right)^2 - 0.381^2} - 1.11225 = 18.4 \Omega$$

3.6 Απώλειες και βαθμός απόδοσης

Το επόμενο βήμα της μελέτης περιλαμβάνει τον υπολογισμό των απωλειών του κινητήρα καθώς και του βαθμού απόδοσης. Οι συνολικές απώλειες του κινητήρα υπολογίζονται από τη σχέση:

$$P_{απ} = P_{cu} + P_{Al} + P_{fe} + P_{MHX} + P_{KAT}$$

Όπου P_{Al} είναι οι απώλειες στον δρομέα του οποίου οι αγωγοί είναι κατασκευασμένοι από αλουμίνιο. Αναλυτικά:

Απώλειες χαλκού στον στάτη:

$$P_{cu} = 3 \cdot I_{ov}^2 \cdot R_s = 3 \cdot 47.435^2 \cdot 0.381 = 2571.84W$$

Απώλειες στον δρομέα:

$$P_{Al} = 3 \cdot I_{rn}^2 \cdot R_r = 3 \cdot K_f^2 \cdot I_n^2 \cdot R_r = 3 \cdot 0.88^2 \cdot 47.435^2 \cdot 0.312 = 1630.94W$$

Οι μηχανικές απώλειες υπολογίζονται προσεγγιστικά από την εμπειρική σχέση:

$$P_{MHX} = 0.008 \cdot P_{ov} = 0.008 \cdot 45000W = 360W$$

Οι καταναεμημένες απώλειες υπολογίζονται και αυτές εμπειρικά από τη σχέση:

$$P_{KAT} = 0.01 \cdot P_{ov} = 0.01 \cdot 45000W = 450W$$

Οι απώλειες σιδήρου εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στον στάτη γιατί στον δρομέα η συχνότητα του ρεύματος είναι πολύ μικρή. Οι απώλειες σιδήρου στο στάτη χωρίζονται σε απώλειες στα «δόντια» (ανάμεσα στα λούκια) p_{t1} (stator teeth fundamental losses) και στο πυρήνα που βρίσκεται πίσω (πάνω) από τα λούκια p_{y1} (back iron losses – yoke).

Οι απώλειες στα δόντια υπολογίζονται από τη σχέση:

$$p_{t1} = K_t \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{ts}^{1,7} \cdot G_{t1}$$

Όπου $p_{10}=2-3W/kg$ και K_t είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από την ποιότητα του υλικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του πυρήνα. Η παράμετρος G_{t1} είναι το βάρος των δοντιών του πυρήνα (stator tooth weight) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$G_{t1} = \gamma_{iron} \cdot N_s \cdot b_{ts} \cdot (h_s + h_w + h_{os}) \cdot L \cdot K_{Fe}$$

$$\Rightarrow G_{t1} = 7800 \cdot 36 \cdot 10.42 \cdot 10^{-3} \cdot (41.72 + 1 + 0.7) \cdot 10^{-3} \cdot 0.24 \cdot 0.966 = 29.45kg$$

$$p_{t1} = K_t \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{ts}^{1,7} \cdot G_{t1} = 1,7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1,6^{1,7} \cdot 29,45 = 333,933W$$

Οι απώλειες στον υπόλοιπο πυρήνα δίνονται από τη σχέση:

$$p_{y1} = K_y \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{cs}^{1,7} \cdot G_{y1}$$

Όπου:

$$G_{y1} = \gamma_{\text{iron}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [D_{\text{out}}^2 - (D_{\text{out}} - 2 \cdot h_{cs})^2] \cdot L \cdot K_{Fe}$$

$$\Rightarrow G_{y1} = 7800 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [0,3642^2 - (0,3642 - 2 \cdot 0,02368)^2] \cdot 0,24 \cdot 0,966 \Rightarrow G_{y1} = 45,786W$$

Άρα οι απώλειες στον υπόλοιπο πυρήνα θα είναι:

$$p_{y1} = K_y \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{cs}^{1,7} \cdot G_{y1} = 1,7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1,5^{1,7} \cdot 45,786 W = 465,22W$$

Οι συνολικές απώλειες σιδήρου θα είναι ίσες με:

$$P_{fe} = p_{t1} + p_{y1} = 333,933W + 465,22W = 799,153W$$

Οι συνολικές απώλειες του κινητήρα θα είναι:

$$P_{\alpha\pi} = P_{cu} + P_{Al} + P_{fe} + P_{MHX} + P_{KAT}$$

$$= 2571,84 + 1630,94 + 799,153 + 360 + 450 = 5811,933W$$

Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα θα είναι:

$$\eta = \frac{45000W}{45000 + 5811,933} \cdot 100\% = 88,56\%$$

3.7 Υπολογισμών των χαρακτηριστικών λειτουργίας

Το ρεύμα του κινητήρα χωρίς φορτίο (το ενεργό, δεν συμπεριλαμβάνεται το ρεύμα μαγνήτισης) είναι ίσο με:

$$I_0 = \frac{P_{fe} + P_{MHX} + 3 \cdot I_\mu^2 \cdot R_s}{3 \cdot V_{ph}} = \frac{799.153 + 360 + 3 \cdot 11.78^2 \cdot 0.381}{3 \cdot 400} = 1.098A$$

Η ολίσθηση υπολογίζεται από την σχέση:

$$\begin{aligned} P_{Al} &= s \cdot P_{AG} \rightarrow s = \frac{P_{Al}}{P_{AG}} = \frac{P_{Al}}{P_{out} + P_{Al} + P_{KAT} + P_{MHX}} \\ &= \frac{1630.94}{45000 + 1630.94 + 450 + 360W} = 0.034 \end{aligned}$$

Η ονομαστική ροπή είναι ίση με:

$$T_n = \frac{45000W}{2\pi \cdot \frac{50}{3} (1 - 0.034)} = \frac{45000}{156.22} = 445Nm$$

Η ροπή ανατροπής υπολογίζεται από την σχέση:

$$T_{bk} = \frac{3 \cdot p_1}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2}{[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + C_1 \cdot X_2)^2}}$$

Όπου:

$$C_1 = 1 + \frac{X_{sl}}{X_m} = 1 + \frac{1.11225}{18.4} = 1.06044$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των παραμέτρων, η ροπή ανατροπής είναι ίση με:

$$\begin{aligned}
 T_{bk} &= \frac{3 \cdot p_1}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2}{[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + C_1 \cdot X_2)^2}]^2} \\
 &= \frac{3 \cdot 3}{2 \cdot 103.41} \cdot \frac{400^2}{[0.381 + \sqrt{0.381^2 + (1.11225 + 1.0822 \cdot 2.534)^2}]^2} \\
 &= 1636.58 Nm
 \end{aligned}$$

Το ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα είναι ίσο με:

$$\begin{aligned}
 I_{LR} &= \frac{V_{ph}}{\sqrt{(R_s + R_r)^2 + (X_{sl} + X_{rl})^2}} = \frac{400}{\sqrt{(0.381 + 0.5575)^2 + (1.11225 + 1.6471)^2}} \\
 &= 137.24 A
 \end{aligned}$$

Η ροπή εκκίνησης είναι ίση με:

$$T_{LR} = \frac{3 \cdot I_{LR}^2 \cdot R_r}{\omega_s} \cdot p = \frac{3 \cdot 137.24^2 \cdot 0.5575}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1000}{60}} \cdot 3 = 902.901 Nm$$

Τέλος, ο συντελεστής ισχύος της μηχανής δίνεται από την σχέση:

$$\cos\varphi = \frac{P_n}{3 \cdot V_{ph} \cdot I_n \cdot \eta} = \frac{45000}{3 \cdot 400 \cdot 47.435 \cdot 0.8856} = 0.89$$

3.8 Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση της μελέτης παρατηρούμε τα εξής

1. Ο βαθμός απόδοσης υπολογίσθηκε 0.885 ενώ στις προδιαγραφές δίνεται 0.93

Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{\alpha\pi}} \cdot 100\%$$

Όπου $P_{\alpha\pi} = P_{cu} + P_{Al} + P_{fe} + P_{MHX} + P_{KAT}$

Οι απώλειες χαλκού P_{cu} είναι ανάλογες της υπολογισμένης αντίστασης R_s και οι απώλειες δρομέα P_{Al} είναι ανάλογες της αντίστασης R_r . Και οι δύο αυτές αντιστάσεις είναι ανάλογες του αριθμού των αυλακιών

Οι δε απώλειες σιδήρου P_{fe} εξαρτώνται από τον αριθμό των πόλων και τις διαστάσεις του στάτη, από την εξωτερική διάμετρό του D_{out} και από το μήκος του L .

Δηλαδή οι παραπάνω απώλειες εξαρτώνται από στοιχεία που υπολογίσθηκαν στα πρώτα στάδια της μελέτης και προκειμένου να μειωθούν (ώστε να αυξηθεί ο βαθμός απόδοσης) θα πρέπει να παρέμβουμε στον αριθμό των αυλακιών και στις διαστάσεις του στατη

2. Ο συντελεστής ισχύος υπολογίσθηκε 0.89 ενώ στις αρχικές προδιαγραφές δίνεται 0.85

Ο συντελεστής ισχύος υπολογίζεται από τη σχέση

$$\cos\varphi = \frac{P_n}{3 \cdot V_{ph} \cdot I_n \cdot \eta}$$

Παρατηρώντας την παραπάνω σχέση καταλαβαίνουμε ότι πρέπει να αυξηθεί ο βαθμός απόδοσης προκειμένου να μειωθεί ο συντελεστής ισχύος. Στο βαθμό απόδοσης μπορούμε να παρέμβουμε με τους τρόπους που περιγράφονται παραπάνω

3. Η ολίσθηση του κινητήρα υπολογίσθηκε 0.034 ενώ στις προδιαγραφές του κινητήρα δίνεται 0.012

Η ολίσθηση υπολογίζεται από τη σχέση

$$s = \frac{P_{Al}}{P_{AG}} = \frac{P_{Al}}{P_{out} + P_{Al} + P_{KAT} + P_{MHX}}$$

Επειδή $P_{MHX} = 0.008 \cdot P_{ov}$ και $P_{KAT} = 0.01 \cdot P_{ov}$, στις μηχανικές απώλειες και στις κατανεμημένες απώλειες δεν μπορούμε να παρέμβουμε. Όμως οι απώλειες δρομέα P_{Al} είναι ανάλογες της

αντίστασης R_r και μπορούμε με αλλαγή του αριθμού των αυλακιών να μεταβάλλουμε τις P_{Al} , οπότε και την ολίσθηση.

4. Η ονομαστική ροπή υπολογίσθηκε 445Nm ενώ στις προδιαγραφές δίνεται 434Nm. Είμαστε πολύ κοντά στην πραγματική τιμή οπότε δεν χρειάζεται κάποια παρέμβαση
5. Η ροπή εκκίνησης υπολογίσθηκε 902.901Nm ενώ στις προδιαγραφές δίνεται 959Nm. Είμαστε πολύ κοντά στην πραγματική τιμή οπότε δεν χρειάζεται κάποια παρέμβαση
6. Η ροπή ανατροπής υπολογίσθηκε 1636.58Nm ενώ στις προδιαγραφές δίνεται 1316Nm.

Η ροπή ανατροπής δίνεται από τη σχέση

$$T_{bk} = \frac{3 \cdot p_1}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2}{[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + C_1 \cdot X_2)^2}]^2}$$

Εξαρτάται δηλαδή από τις αντιστάσεις και τις επαγωγές του ισοδυνάμου κυκλώματος. Οι δε αντιστάσεις και επαγωγές εξαρτώνται από το αριθμό των αυλακιών τόσο του στάτη όσο και του δρομέα, τις οποίες πρέπει να τροποποιήσουμε προκειμένου να πλησιάσουμε περισσότερο τη ροπή των προδιαγραφών

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- § Stephen J. Chapman ‘‘Ηλεκτρικές μηχανές’’
- § Ion Boldea & Syed A. Nasar ‘‘The Induction Machines Desing Handbook’’, Second Edition
- § http://windingdiagrams.blogspot.gr/2014_06_01_archive.html
- § [http://alexander.ee.auth.gr:8083/eTHMMY/archive/106/custom Store/elecmach.pdf](http://alexander.ee.auth.gr:8083/eTHMMY/archive/106/custom_Store/elecmach.pdf)
- § http://www.electronics.teipir.gr/personalpages/papageorgas/download/mcu_embedded/XEIMERINO_2011/6_12_2011_i_o_motors_interrupts/motors/MOTORS/Industrial_Automation_05_Induction_Motors.pdf
- § http://hlektrologia.weebly.com/uploads/6/7/1/5/6715419/p209_284.pdf