

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριθμός 1516

**ΜΕΛΕΤΗ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΩΝ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
ΤΕΤΡΑΠΟΛΙΚΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ 15KW**

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΑ ΣΠΟΥΔΑΣΤΩΝ;

ΜΑΛΛΙΑΚΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΜΑΛΛΙΑΚΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΠΑΠΑΚΑΝΔΕΡΑΚΗΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος καλύπτουν το μεγαλύτερο όγκο εφαρμογών στη βιομηχανία. Το μεγάλο τους πλεονέκτημα σε σχέση με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι ότι μπορούν να προσφέρουν πολύ μεγαλύτερη ισχύ για το ίδιο μέγεθος κινητήρα, αρκετά μεγάλο βαθμό απόδοσης και ικανοποιητική κατανάλωση ρεύματος, με συνέπεια να επιλέγονται για εφαρμογές όπου έχουμε μηχανήματα πολύ μεγάλης ισχύος που εργάζονται στο βιομηχανικό πεδίο σε συνεχή βάση.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιείται η μελέτη ενός τετραπολικού επαγωγικού κινητήρα, ισχύος 15kW με 24 αυλάκια στον στάτη. Η μελέτη περιλαμβάνει τον υπολογισμό των διαστάσεων του στάτη, του δρομέα, των στοιχείων του ισοδυνάμου κυκλώματος, του ρεύματος μαγνήτισης, των απωλειών και του βαθμού απόδοσης και τέλος των ροπών εκκίνησης και ανατροπής του κινητήρα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ηλεκτροκινητήρες έχουν δύο μέλη, ένα σταθερό μέλος που λέγεται στάτης και ένα στρεφόμενο μέλος που λέγεται δρομέας. Ο δρομέας και ο στάτης χωρίζονται από ένα μικρό διάκενο αέρα. Το μήκος του διακένου αυτού είναι πολύ μικρό αν συγκριθεί με τη διάμετρο του δρομέα. Στους κινητήρες επαγωγής η τοποθέτηση των τυλιγμάτων συνίσταται στην τοποθέτηση πηνίων σε ομοιόμορφα διανεμημένα αυλάκια, τόσο στο στάτη όσο και στο δρομέα. Η απόσταση μεταξύ των πλευρών των τυλιγμάτων είναι συνήθως ίση με ένα απλό πολικό βήμα. Οι ομάδες των τυλιγμάτων είναι δυνατόν να συνδεθούν σε σειρά ή παράλληλα, κατ' αστέρα ή κατά τρίγωνο.

Οι κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος καλύπτουν το μεγαλύτερο όγκο εφαρμογών στη βιομηχανία. Το μεγάλο τους πλεονέκτημα σε σχέση με τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι ότι μπορούν να προσφέρουν πολύ μεγαλύτερη ισχύ για το ίδιο μέγεθος κινητήρα. Επίσης ο βαθμός απόδοσης τους είναι αρκετά μεγάλος και η κατανάλωση ρεύματος ικανοποιητική, με συνέπεια να επιλέγονται για εφαρμογές όπου έχουμε μηχανήματα πολύ μεγάλης ισχύος που εργάζονται στο βιομηχανικό πεδίο σε συνεχή βάση.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιείται η μελέτη ενός τετραπολικού επαγωγικού κινητήρα, ισχύος 15kW με 24 αυλάκια στον στάτη. Η μελέτη περιλαμβάνει τον υπολογισμό των διαστάσεων του στάτη, του δρομέα, των στοιχείων του ισοδυναμού κυκλώματος, του ρεύματος μαγνήτισης, των απωλειών και του βαθμού απόδοσης και τέλος των ροπών εκκίνησης και ανατροπής του κινητήρα

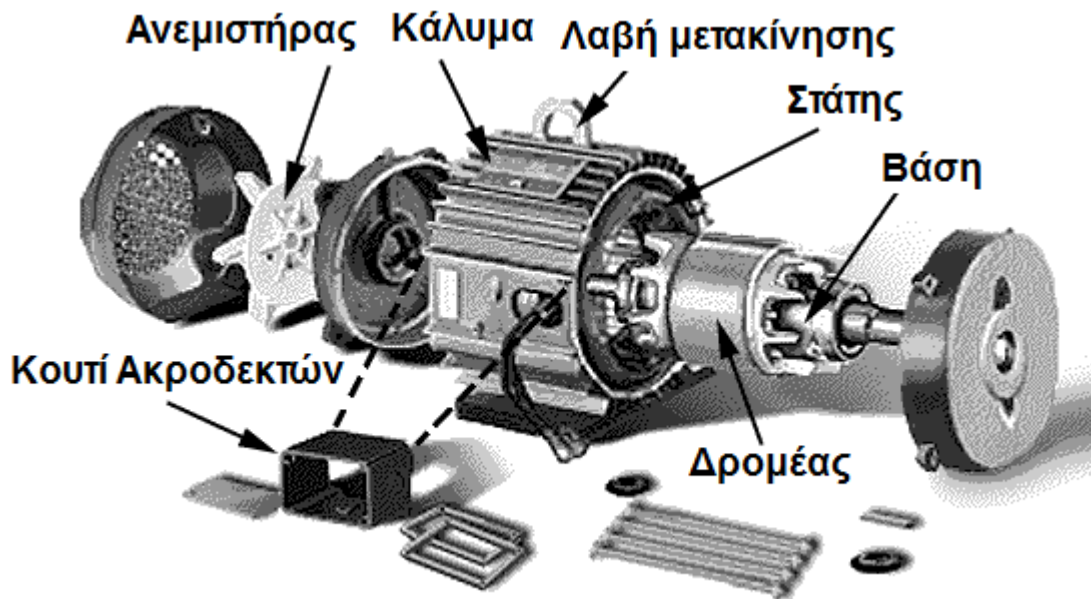
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	II
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	4
ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ	
ΜΗΧΑΝΩΝ	4
1.1. Γενικές Έννοιες.....	4
1.1.1. Ιδιότητες σιδηρομαγνητικών υλικών.....	4
1.1.2. Απώλειες ενέργειας στους σιδηρομαγνητικούς πυρήνες.....	4
1.1.3. Νόμος του Faraday.....	5
1.1.4. Δύναμη εξ' επαγωγής – Δύναμη Laplace.....	5
1.1.5. Τάση εξ' επαγωγής στα άκρα αγωγού που κινείται μέσα σε Μ.Π...6	
1.1.6. Ολική ροπή σε βρόχο	6
1.1.7. Τρόποι δημιουργίας στρεφόμενου Μ.Π.....	6
1.2. Επαγωγή ημιτονοειδούς τάσης στο δρομέα.....	7
1.3. Αρμονικές εγκοπών.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	11
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ	11
2.1. Γενικά χαρακτηριστικά ασύγχρονου κινητήρα	11
2.2. Η ανάπτυξη της επαγόμενης ροπής στους επαγωγικούς κινητήρες.....	11
2.3. Η έννοια της ολίσθησης του δρομέα	13
2.4. Η ηλεκτρική συχνότητα του δρομέα	14
2.5. Η ισχύς στους επαγωγικούς κινητήρες	15
2.5.1. Ηλεκτρική ισχύς εισόδου του επαγωγικού κινητήρα.....	15
2.5.2. Μηχανική ισχύς εξόδου του επαγωγικού κινητήρα.....	15
2.6. Απώλειες στον επαγωγικό κινητήρα	16
2.7. Διάγραμμα ροής ισχύος.....	19
2.8. Συντελεστής απόδοσης επαγωγικού κινητήρα	20
2.9. Χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας	20
2.10. Μεταβολή χαρακτηριστικής ροπής- ταχύτητας σε κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα	22
2.11. Μεταβολή χαρακτηριστικής ροπής- ταχύτητας σε κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα	23
2.12. Κλάσεις σχεδίασης (NEMA).....	23
2.13. Μέθοδοι εκκίνησης τριφασικών κινητήρων.....	26
2.13.1. Απευθείας εκκίνηση.....	26
2.13.2. Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή	26
2.13.3. Εκκίνηση με αντιστάσεις στο στάτη.....	27
2.13.4. Εκκίνηση με διακόπτη αστέρα-τριγώνου	28
2.13.5. Εκκίνηση με ομαλό εκκινητή (soft-starter)	29
2.14. Έλεγχος της ταχύτητας των ασύγχρονων κινητήρων.....	31
2.14.1. Έλεγχος ταχύτητας με μεταβολή του αριθμού των πόλων.	31
2.14.2. Έλεγχος ταχύτητας με μεταβολή της συχνότητας του δικτύου.	31
2.14.3. Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας	32
2.14.4. Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της αντίστασης του δρομέα.....	33
2.15. Προσδιορισμός των παραμέτρων στο ισοδύναμο κύκλωμα.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	35
ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	35

3.1	Στάτης.....	36
3.1.1	Διαστασιολόγηση του κινητήρα.....	36
3.1.2	Τυλίγματα στάτη.....	39
3.1.3	Υπολογισμός διαστάσεων αυλακιών στάτη.....	46
3.2	Δρομέας.....	53
3.2.1	Υπολογισμός των διαστάσεων των αγωγών του δρομέα.....	55
3.2.2	Υπολογισμός της διαμέτρου του άξονα.....	57
3.3	Ρεύμα μαγνήτισης.....	58
3.4	Υπολογισμός ισοδύναμου κυκλώματος.....	60
3.4.1	Υπολογισμός αντιστάσεων.....	60
3.4.2	Υπολογισμός επαγωγικών αντιδράσεων.....	63
3.5	Απώλειες και βαθμός απόδοσης.....	68
3.5.1	Υπολογισμός V_{TH} και R_{TH}	70
3.6	Υπολογισμός χαρακτηριστικών λειτουργίας.....	72
3.7	Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας.....	74
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	79
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	81

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε μία ασύγχρονη (επαγωγική) ηλεκτρική μηχανή η τάση του δρομέα αναπτύσσεται εξ επαγωγής στο κύκλωμα διέγερσης, αντί να προσφέρεται σε αυτό με κάποια ηλεκτρική σύνδεση. Το ακίνητο μέρος της επαγωγικής μηχανής είναι ο στάτης και το περιστρεφόμενο ο δρομέας. Μεταξύ των δύο αυτών τμημάτων της μηχανής υπάρχει διάκενο μεγέθους της τάξεως κλασμάτων του χιλιοστού. Μόνο σε περιπτώσεις πολύ μεγάλων κινητήρων μπορεί το μέγεθος του διακένου να φτάσει στη τάξη μερικών χιλιοστών.



Εικόνα 1: Τα μέρη μιας ασύγχρονης τριφασικής μηχανής

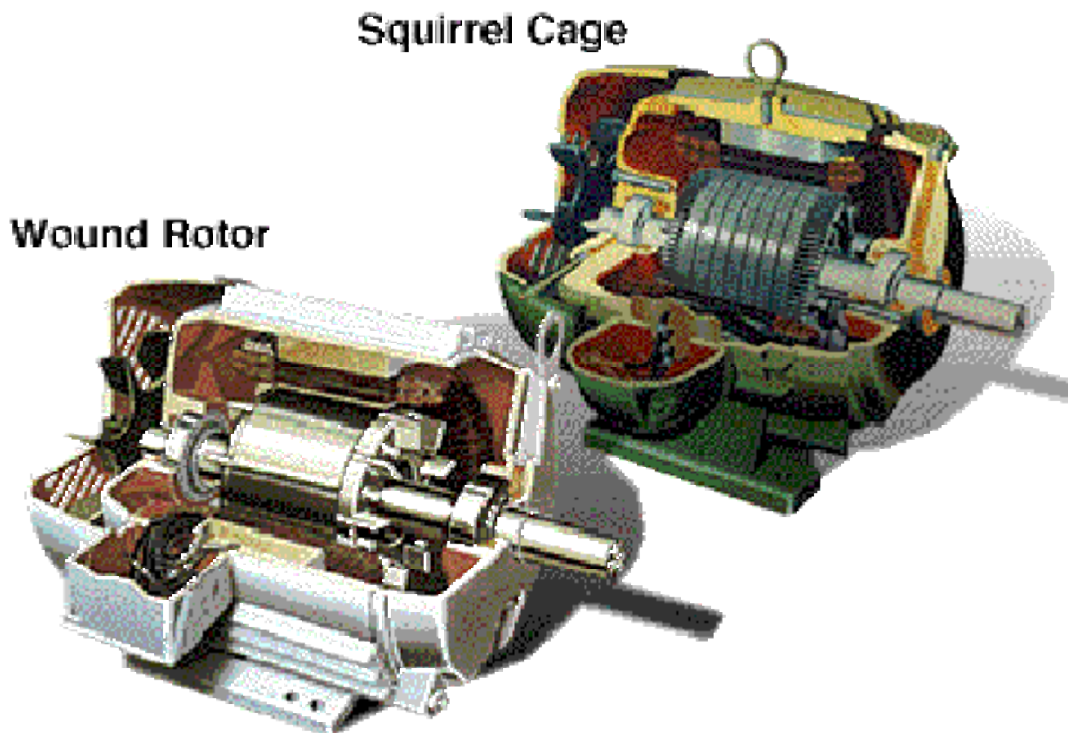
Η ασύγχρονη ηλεκτρική μηχανή αποτελείται από τα ενεργά και τα μη ενεργά μέρη. Τα ενεργά μέρη είναι οι περιελίξεις του στάτη και του δρομέα (φορείς τάσης και ρεύματος) και οι πυρήνες του στάτη και του δρομέα (φορείς της μαγνητικής ροής). Οι περιελίξεις τοποθετούνται στα αυλάκια που βρίσκονται στην εσωτερική περιφέρεια του πυρήνα του στάτη και στην εξωτερική περιφέρεια του πυρήνα του δρομέα. Οι πυρήνες αποτελούνται από πυριτιούχα δυναμοελάσματα, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω δινορρευμάτων. Τα δυναμοελάσματα αυτά στοιβάζονται σε πυρήνες που συμπιέζονται σε πρέσες και τοποθετούνται σφιχτά στο περίβλημα της μηχανής. Μια επαγωγική μηχανή έχει στάτη όμοιο με αυτόν μιας συνεχούς μηχανής. Ο στάτης του κινητήρα είναι κατασκευασμένος έτσι ώστε να έχει 3 διακριτά τυλίγματα (πηνία) που θα τροφοδοτηθούν από τις 3 φάσεις του τριφασικού δικτύου της ΔΕΗ (L1, L2, L3) μέσω κατάλληλου κιβώτιου ακροδεκτών του. Πρέπει να σημειώσουμε εδώ ότι η ονομασία των φάσεων του Κινητήρα, είναι αντικείμενο διαφόρων κανονισμών. Μια εποπτεία κανονισμών και ονομασιών εμφανίζεται στο πιο κάτω Πίνακα1. Σ' αυτόν, η εικόνα της **Σχηματικής Διάταξης τυλιγμάτων** δείχνει τα

πηνία του στάτη και της απολήξεις της και οι διπλανές στήλες την ΑΚΡΙΒΩΣ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΗ ονομασία κατά περίπτωση.

Πίνακας 1: Τυποποίηση συμβολισμών κιβωτίου ακροδεκτών ΑΤΚ με κανονισμούς...

Σχηματική Διάταξη τυλιγμάτων	Παλιός κανονισμός	Της κανονισμός	Μ. Βρετανίας	Αμερικής (USA) ANSI
	V D E	VDE – IEC	B S	
	U V W	U ₁ V ₁ W ₁	A ₂ B ₂ C ₂	T ₁ T ₂ T ₃
	Z X Y	W ₂ U ₂ V ₂	C ₁ A ₁ B ₁	T ₆ T ₄ T ₅

Οι δρομείς που τοποθετούνται στο εσωτερικό του στάτη μιας επαγωγικής μηχανής είναι δύο τύπων: **δρομείς βραχυκυκλωμένου κλωβού** (squirrel-cage rotor) και **δακτυλιοφόροι δρομείς** (wound rotor). Με βάση αυτούς τους δύο διαφορετικούς τύπους δρομέων, οι ασύγχρονες μηχανές χωρίζονται επίσης σε δύο τύπους: στις **ασύγχρονες μηχανές βραχυκυκλωμένου κλωβού ή δρομέα**, και στις **ασύγχρονες μηχανές δακτυλιοφόρου δρομέα**.



Εικόνα 2: Τα δύο είδη ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων

Ο δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού αποτελείται από μια σειρά αγωγίων ράβδων (μπάρες) τοποθετημένων χωρίς μόνωση στα αυλάκια της επιφάνειας του δρομέα και βραχυκυκλωμένων στα δυο τους άκρα μέσω μεγάλων δακτυλίων (shorting rings). Το υλικό του κλωβού είναι χαλκός ή ορείχαλκος ή χυτό αλουμίνιο. Το τελευταίο χρησιμοποιείται σε μηχανές μικρής και μέσης ισχύος, μέχρι 500 KW. Ο δεύτερος τύπος δρομέα, ο δακτυλιοφόρος, διαθέτει ολοκληρωμένο τριφασικό τύλιγμα, τοποθετημένο με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελεί το κατοπτρικό είδωλο του τυλίγματος του στάτη. Οι τρεις φάσεις του τυλίγματος συνδέονται συνήθως σε αστέρα, ενώ τα άκρα των αγωγών συνδέονται σε δακτυλίους και βραχυκυκλώνονται μέσω ψηκτρών που εφάπτονται στους δακτυλίους. Έτσι καθίσταται δυνατή η μέτρηση (στις ψήκτρες) των ρευμάτων του δρομέα, καθώς και η σύνδεση εξωτερικών αντιστάσεων στο κύκλωμα διέγερσης. Η τελευταία αυτή δυνατότητα δίνει το πλεονέκτημα επεξεργασίας της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας της μηχανής δακτυλιοφόρου δρομέα. Συγκριτικά λοιπόν, ο δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού υστερεί του δακτυλιοφόρου δρομέα στο ότι δεν προσφέρει τη δυνατότητα σύνδεσης εξωτερικών αντιστάσεων στο κύκλωμά του. Η έλλειψη όμως αυτή των -δακτυλίων ολίσθησης και ψηκτρών στους δρομείς βραχυκυκλωμένου κλωβού, η οποία ευθύνεται και για την αδυναμία σύνδεσης εξωτερικών αντιστάσεων στο κύκλωμά τους, περιορίζει τις τριβές και τις απαιτήσεις συντήρησής τους.

Τα μη ενεργά μέρη μιας ασύγχρονης ηλεκτρικής μηχανής είναι το περίβλημα, ο άξονας, τα έδρανα, τα πλέγματα, ο ανεμιστήρας και άλλα εξαρτήματα στήριξης, στερέωσης και μόνωσης. Το περίβλημα αποτελείται από τον μανδύα και τα πλευρικά καλύμματα, και κατασκευάζεται, στις περισσότερες μικρές μηχανές, από αλουμίνιο. Ο μανδύας έχει διαμήκη πτερύγια ψύξης για την καλύτερη απαγωγή της θερμότητας. Τα έδρανα των ασύγχρονων μηχανών είναι τοποθετημένα στις φωλιές των πλευρικών καλυμμάτων, ενώ στις πολύ μεγάλες μηχανές έχουν δική τους επιδαπέδια στήριξη. Τα έδρανα του άξονα της μηχανής διακρίνονται σε **έδρανα κύλισης** (ρουλεμάν) και σε **έδρανα ολίσθησης** (κουζινέτα). Τα πρώτα πλεονεκτούν των δεύτερων στην ευκολία τοποθέτησης, στο χαμηλότερο κόστος, στις λιγότερες απώλειες και στα ελάχιστα έξοδα συντήρησης. Από την άλλη μεριά όμως τα κουζινέτα είναι πιο αθόρυβα και αντέχουν σε μεγάλες φορτίσεις, γι' αυτό προτιμούνται σε πολύ μεγάλες μηχανές, αλλά και σε μικρές όταν η μείωση του θορύβου λειτουργίας των είναι υψηλής σημασίας. Ανάλογα με τον τρόπο έδρασης και στήριξης των ασύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών υπάρχει μια σειρά κατασκευαστικών μορφών (ή απλά κατασκευών) σύμφωνα με τις προδιαγραφές DIN IEC 34.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΩΝ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

1.1. Γενικές Έννοιες

1.1.1. Ιδιότητες σιδηρομαγνητικών υλικών

Τα μαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως στην κατασκευή των ηλεκτρικών μηχανών ονομάζονται σιδηρομαγνητικά και αποτελούνται από προσμίξεις σιδήρου με άλλα υλικά, όπως πυρίτιο, κοβάλτιο, νικέλιο, αλουμίνιο κλπ. Τα μαγνητικά υλικά παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην καλή λειτουργία μιας ηλεκτρικής μηχανής καθώς επιτρέπουν την δημιουργία στο εσωτερικό τους μεγάλης μαγνητικής ροής από σχετικά μικρές μαγνητεγερτικές δυνάμεις. Ταυτόχρονα θα πρέπει να παρουσιάζουν μικρές απώλειες ενέργειας (απώλειες σιδήρου). Στα σιδηρομαγνητικά υλικά η μαγνητική διαπερατότητα μ δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από την ένταση του Μ.Π.

1.1.2. Απώλειες ενέργειας στους σιδηρομαγνητικούς πυρήνες

Οι απώλειες υστέρησης οφείλονται στην ατομική δομή των σιδηρομαγνητικών υλικών (Μαγνητικές Περιοχές). Οι απώλειες λόγω δινορρευμάτων οφείλονται στην ανάπτυξη ρευμάτων στον πυρήνα λόγω του φαινομένου της επαγωγής (Νόμος του Faraday).

Απώλειες υστέρησης

Με την εφαρμογή ενός εξωτερικού Μ.Π. το υλικό μαγνητίζεται (σημείο c στο βρόχο υστέρησης – παραμένων μαγνητισμός). Για να απομαγνητιστεί το υλικό θα πρέπει να του δώσουμε ενέργεια:

- § Εφαρμόζοντας αντίθετο μαγνητικό πεδίο
- § Θερμαίνοντας το υλικό
- § Με μηχανικό τρόπο.

Το φαινόμενο της υστέρησης οφείλεται στην ύπαρξη των μαγνητικών περιοχών. Η ενέργεια που απαιτείται για τον προσανατολισμό των μαγνητικών περιοχών ονομάζεται **απώλειες υστέρησης**. Οι απώλειες υστέρησης σε κάθε περίοδο είναι ανάλογες του εμβαδού του βρόχου υστέρησης.

Απώλειες λόγω δινορρευμάτων

Η χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή επάγει τάση στο εσωτερικό του πυρήνα. Η τάση αυτή δημιουργεί ρεύματα με μορφή στροβίλων. Εξαιτίας των ρευμάτων αυτών προκαλείται κατανάλωση ενέργειας με μορφή θερμότητας. Εάν ο πυρήνας δεν είναι συμπαγής αλλά αποτελείται από ελάσματα τα ρεύματα περιορίζονται και οι απώλειες ενέργειας ελαχιστοποιούνται

1.1.3. Νόμος του Faraday

Σύμφωνα με τον Νόμο του Faraday, αν μέσα από μια σπείρα ενός πηνίου διέρχεται μαγνητική ροή, τότε στα άκρα της επάγεται τάση που είναι ανάλογη προς τον ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής ως προς το χρόνο:

$$e_{ind} = -\frac{dj}{dt}$$

Η τάση που επάγεται στο πηνίο έχει τέτοιο πρόσημο ώστε το ρεύμα που θα διαρρέει το πηνίο να δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο με φορά αντίθετη του πρώτου. (Κανόνας του Lenz)

Στην πραγματικότητα όλες οι σπείρες του πηνίου δεν διαρρέονται από την ίδια μαγνητική ροή. Στην περίπτωση αυτή η τάση εξ' επαγωγής στα άκρα του πηνίου θα είναι:

$$e_{ind} = \sum_{i=1}^N \frac{dj_i}{dt} = \frac{\sum_{i=1}^N dj_i}{dt} = \frac{d\sum_{i=1}^N j_i}{dt}$$

1.1.4. Δύναμη εξ' επαγωγής – Δύναμη Laplace

Όταν ένας ρευματοφόρος αγωγός βρίσκεται μέσα σε Μ.Π. τότε επάνω του ασκείται δύναμη:

$$\mathbf{F} = i \cdot (\mathbf{l} \times \mathbf{B})$$

Το μέτρο της δύναμης θα δίνεται από τη σχέση:

$$F = i \cdot l \cdot B \cdot \sin(\alpha)$$

Όπου θ είναι η γωνία που σχηματίζουν ο αγωγός και το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής.

1.1.5. Τάση εξ' επαγωγής στα άκρα αγωγού που κινείται μέσα σε Μ.Π.

Όταν ένας αγωγός κινείται μέσα σε ένα Μ.Π. τότε στα άκρα του επάγεται τάση:

$$e_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l}$$

Η πολικότητα της τάσης που επάγεται θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε η φορά του διανύσματος $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ να δείχνει το θετικό άκρο του αγωγού.

1.1.6. Ολική ροπή σε βρόχο

$$t_{tot} = 2iBlr \sin J$$

Η ολική ροπή εξαρτάται από:

1. Την ένταση του ρεύματος στο βρόχο.
2. Την Μαγνητική Επαγωγή.
3. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του βρόχου.
4. Τη γωνία μεταξύ F και r .

1.1.7. Τρόποι δημιουργίας στρεφόμενου Μ.Π.

1. Με την τοποθέτηση τριών τυλιγμάτων στο στάτη τα οποία να σχηματίζουν γωνία 120 μοίρες μεταξύ τους. Τα τυλίγματα τροφοδοτούνται από μια τριφασική τάση.
2. Με την τοποθέτηση ενός τυλίγματος στο δρομέα, την τροφοδότησή του με συνεχή τάση και την περιστροφή του.

1.2. Επαγωγή ημιτονοειδούς τάσης στο δρομέα

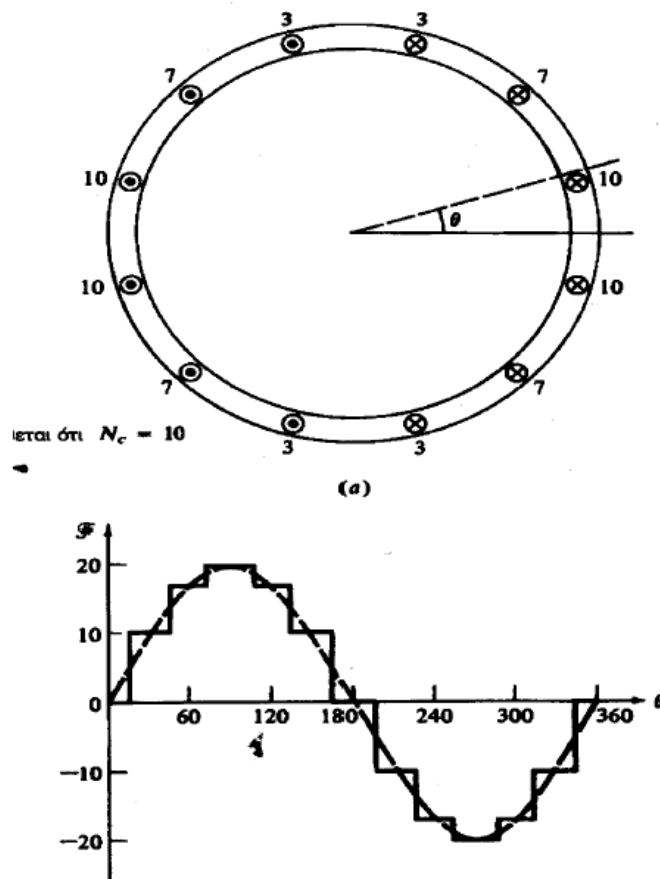
Η μαγνητική αντίσταση του διακένου ενός ασύγχρονου κινητήρα, είναι πολύ μεγαλύτερη από τη μαγνητική αντίσταση του στάτη και του δρομέα του. Έτσι το διάνυσμα της μαγνητικής επαγωγής \mathbf{B} του πεδίου έχει διεύθυνση κάθετη στην επιφάνεια του δρομέα, αφού με αυτόν τον τρόπο η διαδρομή της μαγνητικής ροής από το δρομέα στον στάτη είναι η συντομότερη δυνατή.

Για να επιτευχθεί επαγωγή ημιτονοειδούς τάσης σε μια τέτοια μηχανή, θα πρέπει η παραπάνω μαγνητική επαγωγή να μεταβάλλεται ημιτονοειδώς κατά μήκος της επιφάνειας του διακένου. Θα πρέπει επομένως η ένταση του μαγνητικού πεδίου \mathbf{H} και η μαγνητεγερτική δύναμη \mathbf{F} να μεταβάλλονται ημιτονοειδώς κατά μήκος αυτής της επιφάνειας.

Ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για την παραγωγή ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενης μαγνητεγερτικής δύναμης κατά μήκος του διακένου, είναι η ημιτονοειδής κατανομή των αγωγών του τυλίγματος της μηχανής στα αυλάκια της εσωτερικής επιφάνειας του στάτη. Ο αριθμός δηλαδή των αγωγών που τοποθετούνται σε κάθε αυλάκι, πρέπει να μεταβάλλεται ημιτονοειδώς ανάλογα με τη θέση του αυλακιού. Τα δε αυλάκια, πρέπει να είναι το δυνατόν περισσότερα σε πλήθος, και να βρίσκονται το δυνατόν κοντύτερα το ένα με το άλλο. Κατά την εφαρμογή του παραπάνω τρόπου σχεδίασης της κατανομής των αγωγών της περιέλιξης του στάτη ενός ασύγχρονου κινητήρα, ο αριθμός των αγωγών του τυλίγματος κάθε αυλακιού, δίνεται από τη σχέση

$$n_c = N_c \cdot \cos \theta$$

όπου N_c είναι ο αριθμός των αγωγών που τοποθετούνται στο αυλάκι που αντιστοιχεί σε γωνία, σύμφωνα με την εικόνα 3



Εικόνα 3: Ημιτονοειδής κατανομή αγωγών – Σύγκριση ιδανικής και πραγματικής κατανομής μαγνητεγερτικής δύναμης στο διάκενο

Ο σχεδιασμός του τυλίγματος του στάτη με σκοπό την επίτευξη ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενης επαγόμενης τάσης στο διάκενο, είναι στην πράξη ανέφικτος. Ο λόγος είναι ότι, από τη μία ο αριθμός των αυλακιών είναι πεπερασμένος, και από την άλλη ο αριθμός των αγωγών κάθε αυλακιού πρέπει να είναι ακέραιος. Κατά συνέπεια, η κατανομή της μαγνητεγερτικής δύναμης στο διάκενο είναι κατά προσέγγιση ημιτονοειδής, και η εμφάνιση ανώτερων αρμονικών αναπόφευκτη.

Από την άλλη μεριά, μια τέτοια κατά προσέγγιση ημιτονοειδής μεταβολή του αριθμού των αγωγών των αυλακιών του στάτη, επιφέρει δυσκολίες στην σχεδίαση και την κατασκευή. Έτσι, προτιμάται η κατασκευή τυλιγμάτων με ίσο αριθμό αγωγών σε κάθε αυλάκι (διανεμημένα τυλίγματα), η οποία όμως συνοδεύεται με εμφάνιση πολύ εντονότερων αρμονικών.

1.3. Αρμονικές εγκοπών

Η ομοιόμορφη εισαγωγή συστάδων των διανεμημένων τυλιγμάτων στα αυλάκια της εσωτερικής επιφάνειας του στάτη, δημιουργεί συμμετρικές μεταβολές στη μαγνητική αντίσταση και τη ροή του διακένου του κινητήρα, καθώς η μαγνητική αντίσταση του κάθε αυλακιού είναι μεγαλύτερη από αυτήν του αντίστοιχου μεταλλικού τμήματος του στάτη μεταξύ δυο αυλακιών. Έτσι η μαγνητική επαγωγή είναι μικρότερη κάτω από την επιφάνεια του αυλακιού. Οι μεταβολές της ροής αυξάνουν το περιεχόμενο της τάσης εξόδου σε αρμονικές. Αυτού του είδους οι αρμονικές ονομάζονται **αρμονικές εγκοπών**. Η συχνότητα των αρμονικών εγκοπών εξαρτάται από την απόσταση δύο γειτονικών αυλακιών της μηχανής, σύμφωνα με τη σχέση

$$V_{slot} = \frac{2 \cdot M \cdot S}{p} \pm 1$$

όπου

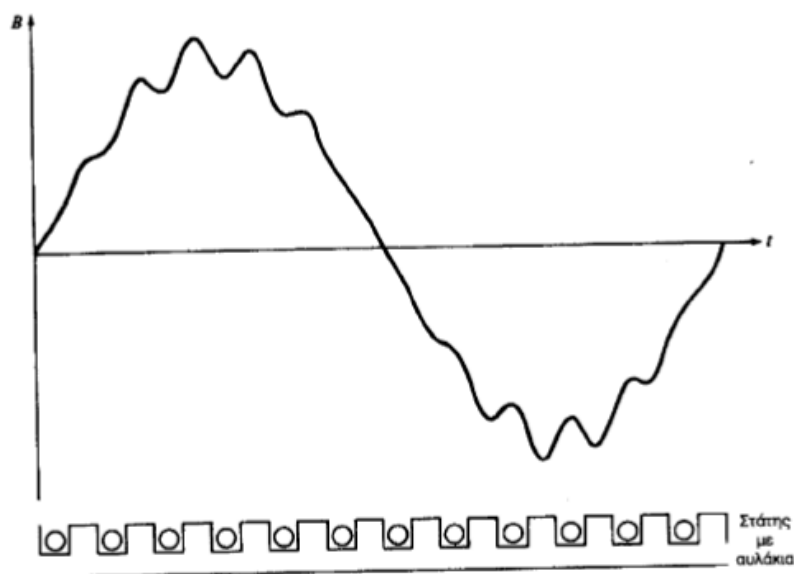
V_{slot} = η τάξη της αρμονικής

S = ο συνολικός αριθμός των αυλακιών του στάτη

M = ένας ακέραιος αριθμός

p = ο αριθμός των πόλων της μηχανής

Για $M=1$, λαμβάνουμε τις μικρότερης τάξης αρμονικές, που επηρεάζουν και περισσότερο τη λειτουργία της μηχανής.



Εικόνα 4: Η τάση εξόδου με αρμονικές εγκοπών

Μερικά από τα προβλήματα που δημιουργούν οι αρμονικές εγκοπών στους ασύγχρονους κινητήρες, είναι

- § Η εμφάνιση παρασιτικών ροπών κατά τη λειτουργία τους, εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των αρμονικών εγκοπών του στάτη και του δρομέα, οι οποίες σε αρκετές περιπτώσεις είναι δυνατό να επηρεάσουν σημαντικά τη χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας
- § Η ανάπτυξη κραδασμών και θορύβου στον κινητήρα,
- § Η αύξηση των απωλειών πυρήνα, λόγω των μεγάλων συχνοτήτων που παρουσιάζουν.

Η επίδραση των αρμονικών εγκοπών στη ροπή εξόδου ενός επαγωγικού κινητήρα εντείνεται επικίνδυνα, καθώς είναι δυνατή η εμφάνιση αρμονικών της ίδιας συχνότητας στο κύκλωμα διέγερσης του δρομέα. Για τη μείωση του πλάτους των αρμονικών εγκοπών εφαρμόζονται δύο τεχνικές: η εισαγωγή τυλιγμάτων κλασματικού αυλακιού (fractinal slot), και η εισαγωγή λοξών (skewed) αγωγών στο δρομέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

2.1. Γενικά χαρακτηριστικά ασύγχρονου κινητήρα

Ο ασύγχρονος ηλεκτρικός κινητήρας είναι ο πιο κοινός τύπος κινητήρα λόγω της απλής κατασκευής του και της ευκολίας που παρουσιάζει στη λειτουργία του, καθώς δεν έχει ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης αλλά οι τάσεις και τα ρεύματα επάγονται στη διέγερσή του σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας του μετασχηματιστή. Καθώς τροφοδοτείται με ισχύ μόνο το κύκλωμα του στάτη του, ο επαγωγικός κινητήρας ονομάζεται και **μηχανή απλής διέγερσης** (singly excited), σε αντιδιαστολή με τις σύγχρονες μηχανές που ονομάζονται **μηχανές διπλής διέγερσης** (doubly excited).

Στην πραγματικότητα ο επαγωγικός κινητήρας είναι ένας στρεφόμενος μετασχηματιστής. Όπως και σε έναν μετασχηματιστή, έτσι και στον επαγωγικό κινητήρα το πρωτεύον τύλιγμα (του στάτη) επάγει κάποια τάση στο δευτερεύον τύλιγμα (του δρομέα). Αντίθετα όμως απ' ότι συμβαίνει σ' ένα μετασχηματιστή, η συχνότητα του δευτερεύοντος δεν είναι απαραίτητα ίση μ' αυτή του πρωτεύοντος. Ο επαγωγικός κινητήρας, στην κανονική λειτουργία, περιστρέφεται με ταχύτητα που πλησιάζει την σύγχρονη, χωρίς όμως ποτέ να την αποκτά. Θα πρέπει πάντα να υφίσταται κάποια σχετική κίνηση που να εξασφαλίζει την επαγωγή τάσης στο κύκλωμα διέγερσης. Συγκεκριμένα η σχετική κίνηση των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα ευθύνεται για την ανάπτυξη της επαγόμενης τάσης στο δρομέα. Αυτή η τάση με τη σειρά της παράγει κάποιο ρεύμα στο δρομέα του κινητήρα, το οποίο αλληλεπιδρώντας με το πεδίο του στάτη παράγει την επαγόμενη ροπή του κινητήρα.

2.2. Η ανάπτυξη της επαγόμενης ροπής στους επαγωγικούς κινητήρες

Εξαιτίας του τριφασικού συστήματος τάσεων που εφαρμόζονται στο στάτη του κινητήρα οι αγωγοί του στάτη διαρρέονται από τριφασικό σύστημα ρευμάτων. Τα ρεύματα αυτά παράγουν το πεδίο του στάτη **B_s** που περιστρέφεται με ανθρωπολογιακή φορά και με ταχύτητα

$$n_{sync} = \frac{120 \cdot f_e}{P}$$

όπου f_e είναι η συχνότητα του συστήματος σε Hz και p ο αριθμός των πόλων της μηχανής. Το μαγνητικό πεδίο **B_s** καθώς διέρχεται πάνω από τους αγωγούς του δρομέα επάγει κάποια τάση στα άκρα τους. Η τάση εξ επαγωγής στα άκρα ενός συγκεκριμένου αγωγού του δρομέα θα είναι

$$e_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l}$$

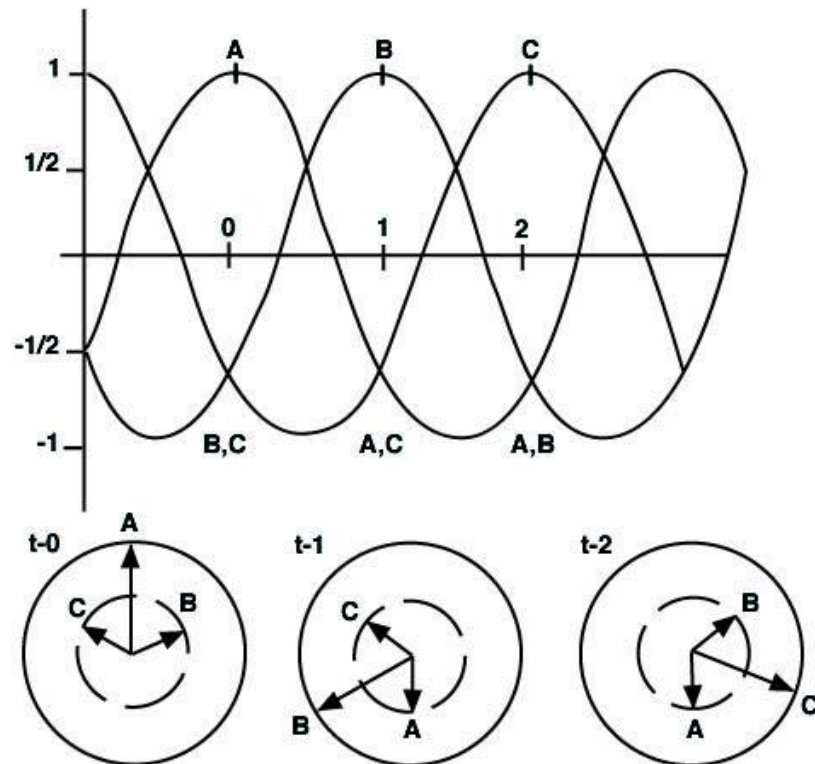
Όπου

\mathbf{u} =σχετική ταχύτητα των αγωγών του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο

\mathbf{B} =η μαγνητική επαγωγή του πεδίου του στάτη

\mathbf{l} =το μήκος του αγωγού του δρομέα

Η τάση στα άκρα των αγωγών του δρομέα, το οποίο προκαλείται από τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη, επάγει ρεύμα στους αγωγούς του δρομέα. Το ρεύμα αυτό θα παρουσιάζει μια καθυστέρηση φάσης ως προς την τάση του δρομέα, μιας και οι αγωγοί του δρομέα συνθέτουν κάποιο επαγωγικό φορτίο.



Εικόνα 5: Η τάση στα άκρα των αγωγών του δρομέα

Τελικά η επαγόμενη ροπή θα έχει ανθρωρολογιακή φορά, γεγονός που σημαίνει ότι ο δρομέας του κινητήρα θα επιταχύνεται κατά την ανθρωρολογιακή φορά, και θα δίνεται από τη σχέση

$$\tau_{ind} = k \cdot \dot{B}_R \times \dot{B}_S$$

Η σταθερά k της παραπάνω σχέσης, προκύπτει από την έκφραση της ροπής σε αγώγιμο πλαίσιο

$$\tau_{ind} = k \cdot \dot{H}_R \times \dot{B}_S$$

όπου K είναι μια σταθερά που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής. Επειδή η μαγνητική ένταση ισοδυναμεί με τον λόγο της αντίστοιχης μαγνητικής επαγωγής προς τη μαγνητική διαπερατότητα μ , τελευταία σχέση γράφεται

$$\tau_{ind} = \frac{K}{\mu} \cdot \dot{B}_R \times \dot{B}_S$$

Είδαμε τη σημασία της σχετικής κίνησης του δρομέα ως προς τα μαγνητικά πεδία στην επαγωγή της τάσεως στους αγωγούς του δρομέα του κινητήρα. Γενικά όσο μεγαλύτερη είναι η σχετική ταχύτητα μεταξύ πεδίων στάτη και δρομέα, τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση που αναπτύσσεται στο δρομέα της μηχανής. Η μεγαλύτερη σχετική κίνηση λοιπόν επιτυγχάνεται για ακίνητο δρομέα. Σ' αυτή την περίπτωση ο δρομέας ονομάζεται **ακινητοποιημένος** (blocked ή locked rotor) και η τάση που επάγεται στα τυλίγματά του είναι η μέγιστη δυνατή. Η ελάχιστη τάση επάγεται στα τυλίγματα του δρομέα για ταχύτητα περιστροφής του ίση με αυτή του πεδίου του στάτη του κινητήρα, δηλαδή για μηδενική σχετική κίνηση.

2.3. Η έννοια της ολίσθησης του δρομέα

Η σχετική κίνηση που προαναφέραμε περιγράφεται συνήθως από δύο μεγέθη: την ταχύτητα ολίσθησης και την ολίσθηση.

Η **ταχύτητα ολίσθησης** (slip speed) ορίζεται ως η διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από τη σύγχρονη ταχύτητα και δίνεται από τη σχέση

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

όπου

n_{slip} = η ταχύτητα ολίσθησης της μηχανής

n_{sync} = η ταχύτητα των μαγνητικών πεδίων

n_m = η μηχανική ταχύτητα του άξονα της μηχανής

Η **ολίσθηση** (slip) είναι ουσιαστικά η σχετική ταχύτητα εκφρασμένη σε εκατοστιαία ή σε ανά μονάδα (per-unit) βάση και ορίζεται από τη σχέση

$$s = \frac{n_{slip}}{n_{sync}} \times 100\%$$

η οποία μπορεί να εκφραστεί και μέσω της γωνιακής ταχύτητας (rad/s)

$$s = \frac{W_{sync} - W_m}{W_{sync}} \times 100\%$$

Η τιμή της ολίσθησης κυμαίνεται μεταξύ των οριακών τιμών $s=0$, για την περίπτωση που ο δρομέας της μηχανής περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, και $s=1$ για την περίπτωση που ο δρομέας είναι ακίνητος.

Τα παραπάνω μεγέθη δεν προσδιορίζουν μόνο την σχετική κίνηση πεδίων δρομέα - στάτη, αλλά και όλα τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν την επαγωγική λειτουργία του κινητήρα, δηλαδή τα μεγέθη εκείνα που συνοδεύουν την περιστροφική κίνηση του δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα. Τέτοια είναι η συχνότητα του δρομέα, η επαγόμενη τάση στο δρομέα, η αντίδραση του δρομέα, το ρεύμα του δρομέα κ.ά.

2.4. Η ηλεκτρική συχνότητα του δρομέα

Η συχνότητα του δρομέα κυμαίνεται μεταξύ των τιμών $f_r=0$, για την περίπτωση που ο δρομέα περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, και $f_r=f_e$ για την περίπτωση ακίνητου δρομέα. Για οποιαδήποτε άλλη ενδιάμεση τιμή ταχύτητας περιστροφής του, ο δρομέας θα έχει συχνότητα που θα δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$f_r = s \cdot f_e \Rightarrow f_r = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} \cdot f_e \Rightarrow f_r = (n_{sync} - n_m) \frac{P}{120 \cdot f_e} \cdot f_e \Rightarrow$$

$$\Rightarrow f_r = \frac{P}{120} \cdot (n_{sync} - n_m)$$

2.5. Η ισχύς στους επαγωγικούς κινητήρες

2.5.1. Ηλεκτρική ισχύς εισόδου του επαγωγικού κινητήρα

Η είσοδος ενός επαγωγικού κινητήρα είναι ένα τριφασικό σύστημα τάσεων και ρευμάτων. Η ηλεκτρική ισχύς εισόδου του P_{in} θα έχει τη μορφή τριφασικού συστήματος τάσεων και ρευμάτων, ενώ θα δίνεται από τη σχέση

$$P_{in} = \sqrt{3} \cdot V_T \cdot I_L \cdot \cos \theta$$

όπου

V_T = η ονομαστική τάση του κινητήρα

I_L = το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα

$\cos \theta$ = ο συντελεστής ισχύος λειτουργίας του κινητήρα

2.5.2. Μηχανική ισχύς εξόδου του επαγωγικού κινητήρα

Ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί ως στρεφόμενος μετασχηματιστής. Ενώ όμως σ'έναν κοινό μετασχηματιστή η ισχύς στο δευτερεύον τύλιγμα αποτελεί την ηλεκτρική ισχύ εξόδου, στον επαγωγικό κινητήρα δεν εμφανίζεται ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο του, καθώς το δευτερεύον τύλιγμα του επαγωγικού κινητήρα (δρομέας) είναι βραχυκυκλωμένο. Αντίθετα η ισχύς εξόδου του επαγωγικού κινητήρα είναι μηχανική. Η μηχανική ισχύς εξόδου P_{out} του επαγωγικού κινητήρα είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος προσδιορισμού της μηχανικής ισχύος εξόδου ενός επαγωγικού κινητήρα βασίζεται στη σχέση που συνδέει την μηχανική αυτή ισχύ με την ηλεκτρική ισχύ εισόδου και τις συνολικές απώλειες του κινητήρα. Έτσι αν γνωρίζουμε την ηλεκτρική ισχύ εισόδου και το σύνολο των απωλειών του κινητήρα (P_{ap}), μπορούμε να βρούμε την μηχανική ισχύ εξόδου από τη διαφορά των δύο παραπάνω μεγεθών, δηλαδή

$$P_{out} = P_{in} - P_{ap}$$

Ο δεύτερος τρόπος προσδιορισμού της μηχανικής ισχύος εξόδου του επαγωγικού κινητήρα προκύπτει από τη σχέση που συνδέει την παραπάνω ισχύ με την ροπή που ασκείται στον άξονα του δρομέα (t_{load}) και τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (ω_m). Με τη γνώση των παραπάνω τιμών ροπής και γωνιακής ταχύτητας, βρίσκουμε την τιμή της ισχύος εξόδου του επαγωγικού κινητήρα σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση

$$P_{out} = t_{load} \cdot \omega_m$$

2.6. Απώλειες στον επαγωγικό κινητήρα

Οι κατηγορίες απωλειών σε έναν επαγωγικό κινητήρα είναι οι ακόλουθες

1. Απώλειες χαλκού στο στάτη και στο δρομέα
2. Απώλειες πυρήνα ή απώλειες σιδήρου
3. Μηχανικές απώλειες
4. Κατανεμημένες απώλειες

Οι απώλειες χαλκού είναι οι απώλειες θερμότητας στους αγωγούς του στάτη και του δρομέα της μηχανής. Συγκεκριμένα οι απώλειες χαλκού στον τριφασικό στάτη (stator copper losses- SCL) ενός επαγωγικού στάτη δίνονται από τη σχέση

$$P_{SCL} = 3I_1^2 R_1$$

όπου:

R_1 = η συνολική ωμική αντίσταση των αγωγών της κάθε φάσης του στάτη

I_1 = το ρεύμα της κάθε φάσης του στάτη

Οι απώλειες χαλκού στο δρομέα (rotor copper losses- RCL) δίνονται από τη σχέση

$$P_{RCL} = 3I_R^2 R_R = 3I_2^2 R_2 = sP_{AG} = P_{conv} \cdot \left(\frac{1-s}{s}\right)$$

όπου:

R_R = η συνολική ωμική αντίσταση των αγωγών της κάθε φάσης του δρομέα

I_R = το ρεύμα της κάθε φάσης του δρομέα

s = η ολίσθηση

P_{AG} = η ισχύς του διακένου

P_{conv} = η μετατρεπόμενη μηχανική ισχύς

Οι ωμικές αντιστάσεις του στάτη και του δρομέα εξαρτώνται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα (όπως το μήκος κι τη διατομή των τυλιγμάτων του, την ποιότητα του χαλκού του, την κλάση μόνωσης) καθώς και από τη θερμοκρασιακή κατάστασή του.

Επίσης οι τιμές των ωμικών αντιστάσεων επηρεάζονται και από το επιδερμικό φαινόμενο.

Οι απώλειες πυρήνα P_{core} (ή αλλιώς σιδήρου) οφείλονται στα φαινόμενα υστέρησης και δινορρευμάτων που αναπτύσσονται στα σιδηρομαγνητικά υλικά των κινητήρων.

Οι απώλειες υστέρησης (hysteresis losses) $P_{core,h}$ αναφέρονται στη μαγνητική ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη μαγνήτιση του πυρήνα, δηλαδή την αναδιάταξη των μαγνητικών τμημάτων του όπως αυτή συμβαίνει σε κάθε περίοδο της εναλλασσόμενης τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα. Μπορεί ν' αποδειχτεί ότι οι απώλειες ενέργειας σε κάθε περίοδο είναι ανάλογες του εμβαδού που καλύπτει ο βρόχος υστέρησης. Όσο μικρότερη είναι η μέγιστη τιμή της μαγνητεγερτικής δύναμης που εφαρμόζεται στον πυρήνα, τόσο μικρότερο είναι το εμβαδό του βρόχου υστέρησης, άρα και οι αντίστοιχες απώλειες.

Οι απώλειες δινορρευμάτων (eddy current losses) $P_{core,e}$ αποτελούν μια ακόμα κατηγορία απωλειών προκαλούμενων από τις μεταβολές της επιβαλλόμενης μαγνητεγερτικής δύναμης σ' έναν πυρήνα. Οφείλονται στην ανάπτυξη δινορρευμάτων στον πυρήνα από τάσεις που επάγει μια χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή και είναι ουσιαστικά οι θερμικές απώλειες που καταναλώνονται στην αντίσταση του μετάλλου του πυρήνα. Εξαρτώνται από τη γεωμετρία του πυρήνα, την ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού του, την πυκνότητα του ρεύματος και το πάχος των δυναμοελασμάτων. Πρακτικά ο διαχωρισμός των απωλειών πυρήνα σε απώλειες υστέρησης και απώλειες δινορρευμάτων είναι πολύ δύσκολος. Γι' αυτό το λόγο οι απώλειες υστέρησης και οι απώλειες δινορρευμάτων δεν υπολογίζονται ανεξάρτητα, αλλά δίνονται στο σύνολό τους από τη σχέση των απωλειών πυρήνα \square

$$P_{core} = 3E_1^2 G_C = \frac{3E_1^2}{R_C}$$

όπου

E_1 είναι η εσωτερική τάση του στάτη (δηλαδή η τάση που προκύπτει στο στάτη μετά την πτώση τάσης στην αντίσταση και την αντίδραση διαρροής της περιέλιξής του)

R_C και G_C η ισοδύναμη αντίσταση και αγωγιμότητα του πυρήνα αντίστοιχα.

Οι μηχανικές απώλειες ενός επαγωγικού κινητήρα συνίστανται στις απώλειες λόγω τριβών μεταξύ των μηχανικών τμημάτων της μηχανής (friction losses) PF, και στις απώλειες εξαερισμού (windage losses) PW. Οι τελευταίες είναι οι απώλειες που προκύπτουν από τις τριβές των μηχανικών τμημάτων του κινητήρα με τον αέρα λόγω

περιστροφής. Για τις μηχανικές απώλειες χρησιμοποιείται ο συμβολισμός PF&W. Κατά προσέγγιση θεωρούνται ανάλογες του κύβου της περιστροφικής ταχύτητας του κινητήρα.

Τέλος στις κατανεμημένες απώλειες P_{stray} περιλαμβάνονται όλες οι απώλειες που δεν μπορούν να υπολογιστούν σε καμία από τις προηγούμενες κατηγορίες και συνήθως οφείλονται στην αύξηση της μαγνητικής ροής σκέδασης κατά την αύξηση φορτίου και στις υψίσυχνες διακυμάνσεις της ροής αυτής (οι διακυμάνσεις της ροής προέρχονται από την παραμόρφωση της ημιτονοειδούς ιδανικά κατανομής της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο, λόγω της κατανομής των αγωγών στα αυλάκια). Τέτοιες μη υπολογίσιμες απώλειες μπορεί να είναι

§ Απώλειες δινορρευμάτων στις περιελίξεις εξαιτίας του επιδερμικού φαινομένου που προκαλεί η μαγνητική ροή σκέδασης, με συνέπεια την μείωση της ενεργού διατομής των αγωγών και άρα την αύξηση της ωμικής των αντιστάσεως.

§ Απώλειες δινορρευμάτων λόγω της μαγνητικής ροής σκέδασης στις κεφαλές των τυλιγμάτων του στάτη, με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών πυρήνα και την πρόκληση απωλειών σιδήρου στο περίβλημα και σε άλλα μη ενεργά μέρη του κινητήρα. Οι απώλειες αυτές εξαρτώνται από τη γεωμετρία των κεφαλών του κινητήρα. Η τιμή τους προσδιορίζεται συμβατικά ως το 1% επί της ισχύος εξόδου του κινητήρα κατά τη λειτουργία με πλήρες φορτίο.

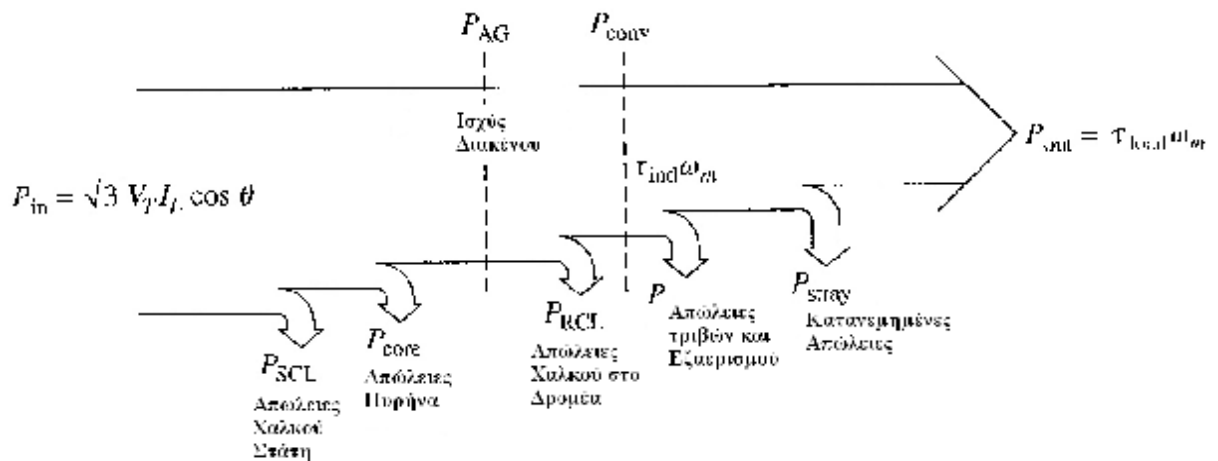
Οι μηχανικές απώλειες και οι απώλειες πυρήνα συνήθως υπολογίζονται μαζί και ονομάζονται απώλειες χωρίς φορτίο ή απώλειες της εν κενώ λειτουργίας.

Οι απώλειες πυρήνα, οι μηχανικές και οι κατανεμημένες απώλειες πολλές φορές προστίθενται όλες μαζί και ονομάζονται απώλειες περιστροφής (rotational losses). Ο λόγος είναι ότι οι τιμές των παραπάνω απωλειών εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Έτσι όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες τριβών, εξαερισμού και οι κατανεμημένες απώλειες. Από την άλλη μεριά οι απώλειες πυρήνα μειώνονται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα (όταν δηλαδή η n_m προσεγγίζει την n_{sync}).

Παρά την παραπάνω εξάρτηση των επιμέρους απωλειών περιστροφής από την ταχύτητα περιστροφής, η συνολική τιμή τους θεωρείται σταθερή ακόμα και για μεταβαλλόμενη περιστροφική ταχύτητα κινητήρα, αφού οι επιμέρους απώλειες μεταβάλλονται προς αντίθετες κατευθύνσεις.

2.7. Διάγραμμα ροής ισχύος

Η σχέση ανάμεσα στην ηλεκτρική ισχύ εισόδου, την μηχανική ισχύ εξόδου, καθώς και τις επιμέρους απώλειες του επαγωγικού κινητήρα αποδίδεται σχηματικά με το διάγραμμα ροής ισχύος



Εικόνα 6: Διάγραμμα ροής ισχύος επαγωγικού κινητήρα

Σύμφωνα με το διάγραμμα ροής ο κινητήρας τροφοδοτείται αρχικά με την ηλεκτρική ισχύ P_{in} . Οι πρώτες απώλειες της ισχύος εισόδου, εμφανίζονται στο τύλιγμα του στάτη του κινητήρα και είναι οι απώλειες χαλκού του στάτη. Στη συνέχεια χάνεται κάποιο ποσό ισχύος με την μορφή απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων στο στάτη (απώλειες πυρήνα). Η ισχύς που απομένει μεταφέρεται στο δρομέα του κινητήρα διαμέσου του διακένου, και γι' αυτό το λόγο ονομάζεται ισχύς διακένου (air-gap power) P_{AG} της μηχανής. Ένα μέρος της ισχύος διακένου, δηλαδή της ισχύος που μεταφέρεται μέσω του διακένου στο δρομέα, χάνεται με τη μορφή θερμικών απωλειών στους αγωγούς του δρομέα (απώλειες χαλκού δρομέα).

Σε αυτό το σημείο, μετά δηλαδή από τις θερμικές απώλειες του δρομέα, η ισχύς που απομένει μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική (P_{conv}). Η ισχύς αυτή, που μερικές φορές ονομάζεται αναπτυσσόμενη μηχανική ισχύς, δίνεται από τις σχέσεις

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL}$$

$$P_{conv} = t_{ind} - W_m$$

όπου t_{ind} είναι η ροπή που παράγεται κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος σε μηχανική. Αυτή η ροπή διαφέρει από εκείνη που είναι πραγματικά αξιοποιήσιμη στην έξοδο του κινητήρα, γεγονός που φαίνεται άλλωστε και από το διάγραμμα ροής ισχύος.

Πράγματι η P_{conv} μειώνεται από τις απώλειες τριβών και εξαερισμού, δηλαδή τις μηχανικές απώλειες του κινητήρα (PF&W), ενώ στο τέλος αφαιρούνται και οι κατανεμημένες απώλειες (P_{stray}). Το ποσό της μηχανικής ισχύος που απομένει αποτελεί την αξιοποιήσιμη μηχανική ισχύ εξόδου της μηχανής (P_{out}).

Λόγω της φύσης τους, οι απώλειες πυρήνα τοποθετούνται στο διάγραμμα ροής ισχύος σχετικά αυθαίρετα. Στην πραγματικότητα οι συνολικές απώλειες του πυρήνα δεν προέρχονται μόνο από το κύκλωμα του στάτη (όπως υποδηλώνεται από το συγκεκριμένο διάγραμμα), αλλά προέρχονται και από το κύκλωμα του δρομέα. Θα μπορούσαν λοιπόν να τοποθετηθούν στο διάγραμμα μετά τις απώλειες χαλκού του δρομέα.

Ο λόγος για τον οποίο σ' ένα διάγραμμα ροής ισχύος οι συνολικές απώλειες πυρήνα συνήθως τοποθετούνται στο κύκλωμα του στάτη (όπως έγινε και στο διάγραμμα του σχήματος μας), είναι ότι οι απώλειες αυτές, τις περισσότερες φορές, προέρχονται στο μεγαλύτερο ποσοστό τους από το στάτη. Κι αυτό διότι τις περισσότερες φορές ο κινητήρας περιστρέφεται με ταχύτητα πολύ κοντά στην σύγχρονη και κατά συνέπεια η σχετική ταχύτητα που αναπτύσσεται ανάμεσα στα μαγνητικά πεδία είναι πολύ μικρή. Έτσι οι απώλειες πυρήνα στο δρομέα είναι πολύ μικρές συγκριτικά με τις αντίστοιχες του στάτη.

2.8. Συντελεστής απόδοσης επαγωγικού κινητήρα

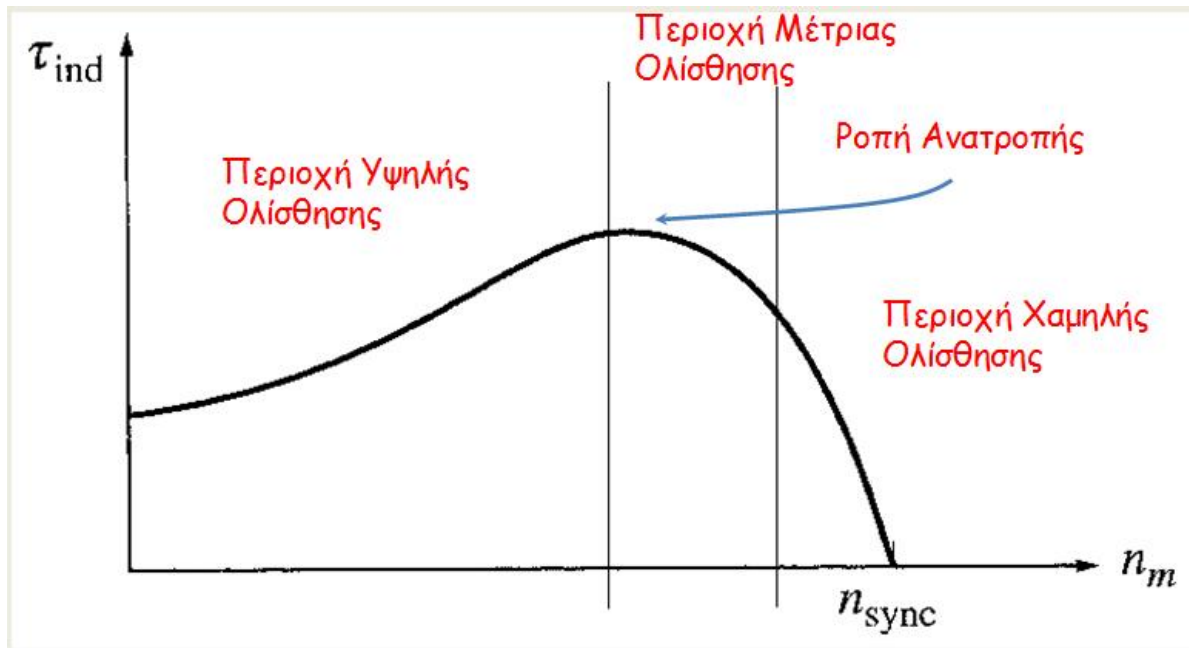
Ο συντελεστής απόδοσης ενός επαγωγικού κινητήρα είναι ίσος με το λόγο της ωφέλιμης μηχανικής ισχύος εξόδου του κινητήρα προς την ηλεκτρική ισχύ εισόδου του

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

2.9. Χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας

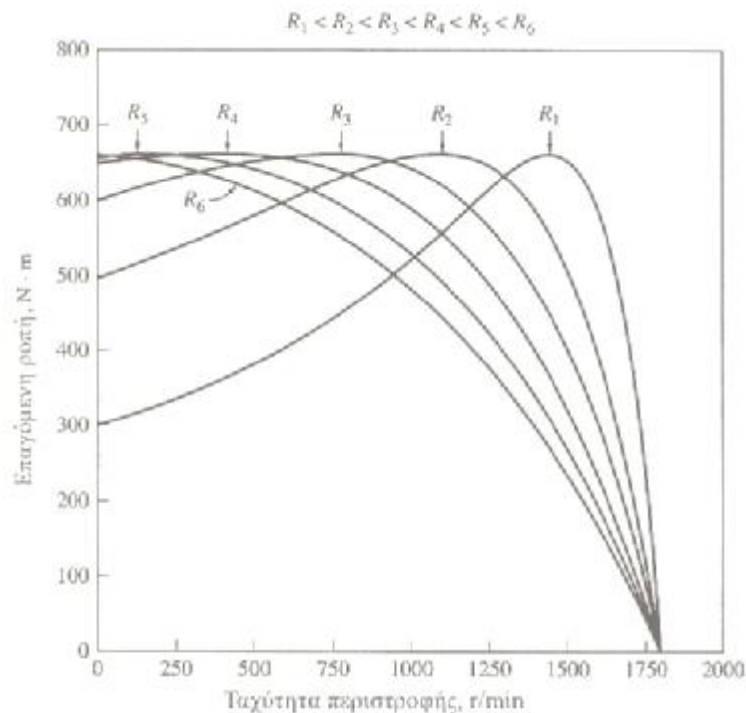
Όταν ο κινητήρας δουλεύει χωρίς φορτίο η ολίσθηση είναι μικρή και η σχετική κίνηση ανάμεσα στα μαγνητικά πεδία του στάτη και του δρομέα είναι πολύ μικρή. Η τάση που επάγεται στις ράβδους του δρομέα είναι μικρή και κατά συνέπεια είναι μικρό και το ρεύμα στο δρομέα. Το ρεύμα στο στάτη είναι αρκετά μεγάλο, ακόμα και όταν ο κινητήρας δουλεύει χωρίς φορτίο. Εάν προστεθεί φορτίο στον κινητήρα η ολίσθηση αυξάνεται, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα μειώνεται και αυξάνονται η τάση που επάγεται στις ράβδους του δρομέα, το ρεύμα του δρομέα και το ρεύμα του στάτη. Το μέτρο του μαγνητικού πεδίου του στάτη και η γωνία μεταξύ του στρεφόμενου

μαγνητικού πεδίου και του πεδίου του στάτη αυξάνονται με συνέπεια την αύξηση της ροπής. Αύξηση της γωνίας μεταξύ του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου και του πεδίου του στάτη σε τιμές μεγαλύτερες των 90 μοιρών τείνει να μειώσει τη ροπή



Εικόνα 7:Χαρακτηριστική ροπής- στροφών

2.10. Μεταβολή χαρακτηριστικής ροπής- ταχύτητας σε κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα



Εικόνα 8: Μεταβολή του διαγράμματος ροπής-στροφών σε σχέση με την αντίσταση του δρομέα

Στο κύκλωμα του δρομέα ενός τέτοιου κινητήρα είναι δυνατή η εισαγωγή αντιστάσεων, αφού τα άκρα του κυκλώματος του δρομέα μεταφέρονται στο εξωτερικό μέρος της μηχανής μέσω των δακτυλιδιών που διαθέτει. Καθώς η αντίσταση του δρομέα αυξάνεται, η ταχύτητα ανατροπής μειώνεται, ενώ η ροπή ανατροπής παραμένει σταθερή. Αυτό το πλεονέκτημα του κινητήρα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για την εκκίνηση πολύ ισχυρών φορτίων. Με την εισαγωγή μιας αντίστασης στο δρομέα, είναι δυνατή η ρύθμιση της μέγιστης ροπής ώστε αυτή να εμφανίζεται κατά την εκκίνηση του κινητήρα. Αφού το φορτίο αρχίσει να περιστρέφεται κανονικά, η πρόσθετη αντίσταση είναι δυνατόν να απομακρυνθεί, ώστε η μέγιστη ροπή να μετακινηθεί σε μία ταχύτητα πολύ κοντά στη σύγχρονη.

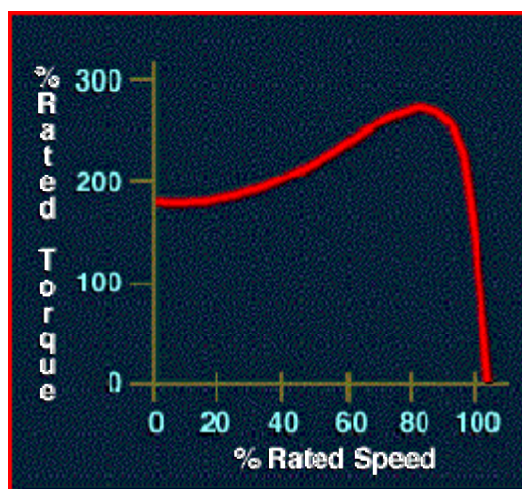
Ένας κινητήρας με μεγάλη αντίσταση δρομέα παρουσιάζει ικανοποιητική ροπή εκκίνησης αλλά η απόδοσή του είναι πολύ μικρή στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Αντίθετα ένας κινητήρας με μικρή αντίσταση στο δρομέα, παρουσιάζει μικρή ροπή εκκίνησης και μικρό ρεύμα εκκίνησης, αλλά η απόδοσή του στις κανονικές συνθήκες λειτουργίας είναι αρκετά υψηλή.

2.11. Μεταβολή χαρακτηριστικής ροπής- ταχύτητας σε κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα

Η αντίδραση διαρροής είναι η αντίδραση που οφείλεται στις γραμμές της μαγνητικής ροής του δρομέα για τις οποίες δεν υφίσταται σύζευξη με το τύλιγμα του στάτη. Γενικά όσο πιο απομακρυσμένη από το στάτη είναι η ράβδος ή το τμήμα της ράβδου του δρομέα, τόσο μεγαλύτερη είναι η αντίδραση διαρροής της ράβδου, αφού το ποσοστό της μαγνητικής ροής της ράβδου που φτάνει στο στάτη είναι μικρότερο. Έτσι, αν οι ράβδοι του δρομέα είναι τοποθετημένες κοντά στην επιφάνεια του δρομέα, θα παρουσιάζουν μικρή ροή διαρροής και η αντίσταση X_2 στο ισοδύναμο κύκλωμα θα έχει μικρή τιμή. Αντίθετα αν οι ράβδοι του δρομέα τοποθετηθούν βαθύτερα στη επιφάνειά του, θα παρουσιάζουν μεγαλύτερη ροή διαρροής και η αντίδραση X_2 θα είναι μεγαλύτερη.

2.12. Κλάσεις σχεδίασης (NEMA)

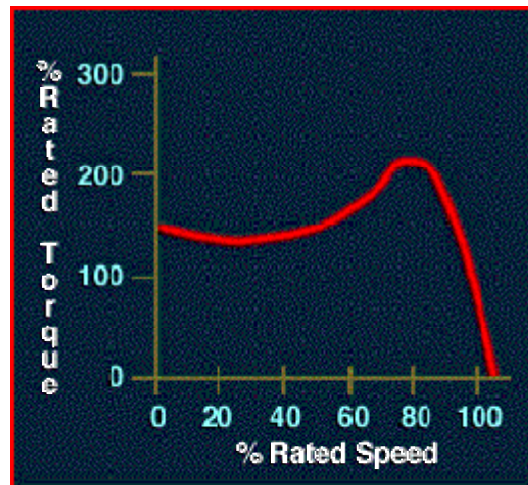
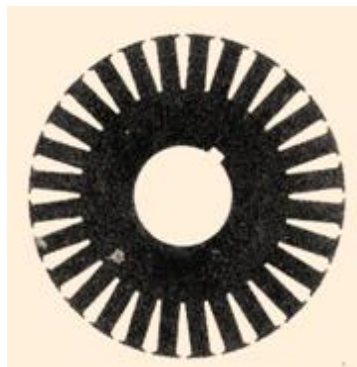
Κλάση A: Μεγάλες ράβδοι κοντά στην επιφάνεια



Εικόνα 9: Κατασκευαστική απεικόνιση και διάγραμμα ροπής-στροφών κινητήρα κλάσης A

- Τύλιγμα: Απλού Κλωβού
- Μέγιστη ροπή: $>2,5 \cdot T_{ov}$ σε ταχύτητα πάνω από $0,8n_s$
- Ολίσθηση: $> 0,2$
- Ρεύμα εκκίνησης: $5 \div 8I_{ov}$

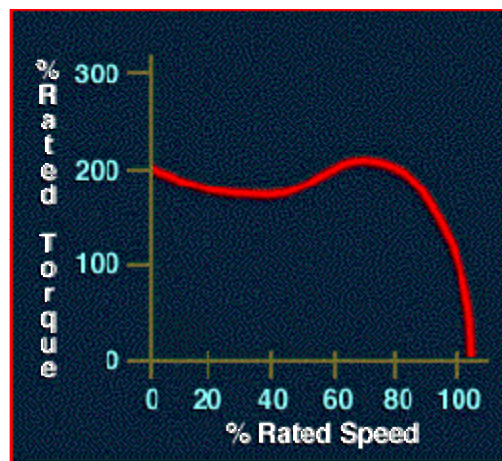
Κλάση B: Μεγάλες ράβδοι βαθιά στο δρομέα



Εικόνα 10: Κατασκευαστική απεικόνιση και διάγραμμα ροπής-στροφών κινητήρα κλάσης B

- Τύλιγμα: Διπλού κλωβού ή κλωβού με βαθιά αυλάκια
- Μέγιστη ροπή: $>2,5 \cdot T_{ov}$
- Ολίσθηση: Μικρή
- Ρεύμα εκκίνησης: 75% της κλάσης A

Κλάση C: Δρομέας διπλού κλωβού

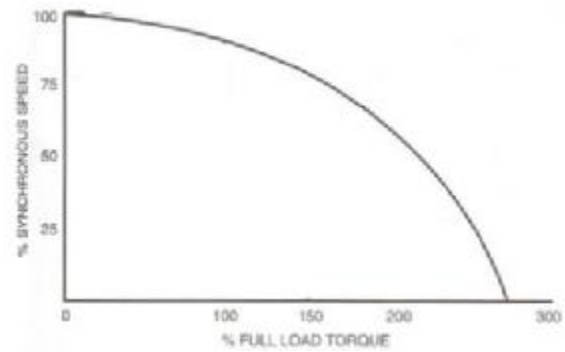
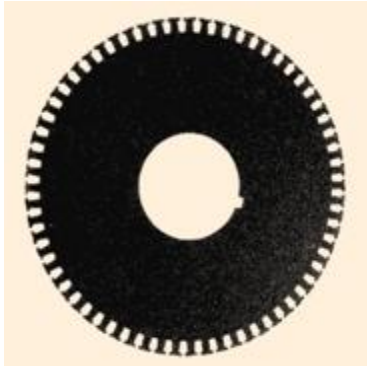


Εικόνα 11: Κατασκευαστική απεικόνιση και διάγραμμα ροπής-στροφών κινητήρα κλάσης C

- Τύλιγμα: Διπλού κλωβού
- Μέγιστη ροπή: Μεγαλύτερη σε σχέση με τις κλάσεις A και B

- Ολίσθηση: Μεγαλύτερη από τις κλάσεις A και B
- Ρεύμα εκκίνησης: Μικρότερο σε σχέση με τις κλάσεις A και B

Κλάση D: Μικρές ράβδοι κοντά στην επιφάνεια



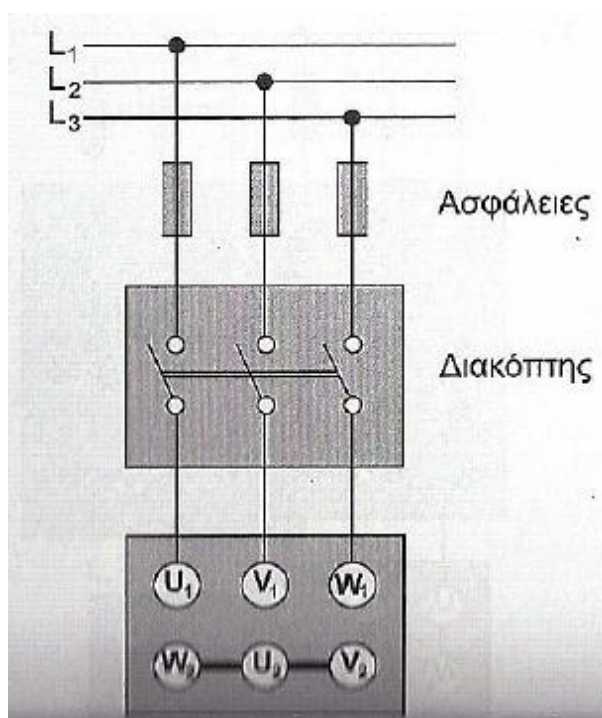
Εικόνα 12: Κατασκευαστική απεικόνιση και διάγραμμα ροπής-στροφών κινητήρα κλάσης D

- Τύλιγμα: απλού κλωβού
- Μέγιστη ροπή: Πολύ μεγάλη, τριπλάσια της ονομαστικής
- Ολίσθηση: $0,5 \div 0,11$
- Ρεύμα εκκίνησης: Χαμηλό

2.13. Μέθοδοι εκκίνησης τριφασικών κινητήρων

2.13.1. Απευθείας εκκίνηση

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε ορισμένες περιπτώσεις στη βιομηχανία και κυρίως για κινητήρες μικρής ισχύος της τάξης του 1,5-2KW. Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι πρώτον η απλή μεθόδός του και η υψηλή ροπή εκκίνησης. Ενώ το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το μεγάλο ρεύμα εκκίνησης.

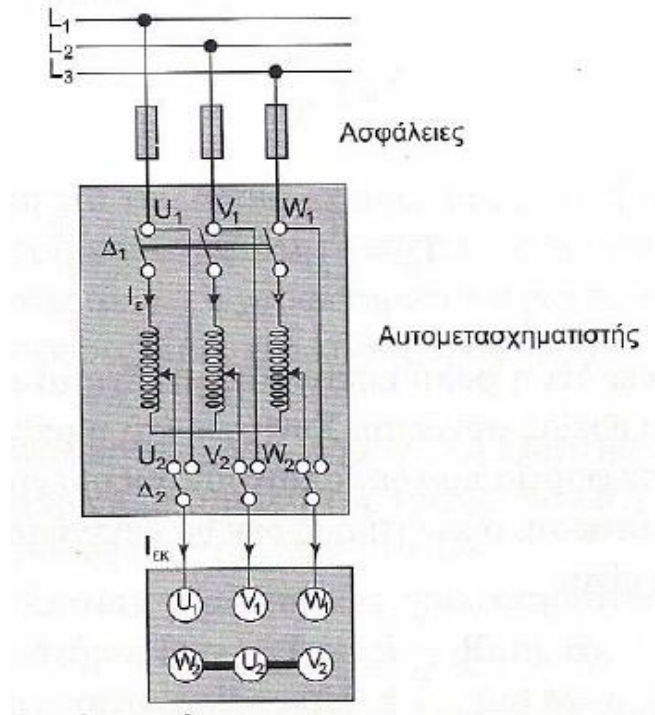


Εικόνα 13: Απευθείας εκκίνηση τριφασικού κινητήρα

2.13.2. Εκκίνηση με αυτομετασχηματιστή

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

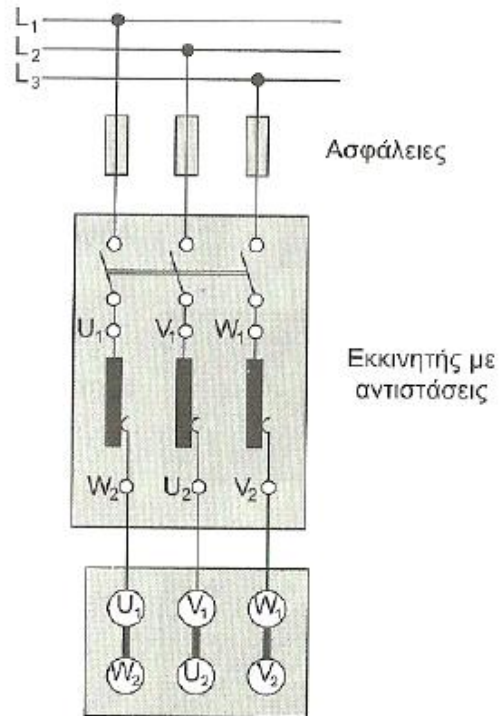
Με τη μέθοδο αυτή έχουμε ελαφρώς μεγαλύτερη ροπή εκκίνησης απ' ότι στην εκκίνηση με αντιστάσεις στο στάτη. Με τον αυτομετασχηματιστή η τάση παρέχεται κλιμακωτά και στη συνέχεια αποσυνδέουμε τον αυτομετασχηματιστή και συνδέουμε με τον κινητήρα απευθείας με το δίκτυο για την κανονική του λειτουργία.



Εικόνα 14: Εκκίνηση τριφασικού κινητήρα με αυτομετασχηματιστή

2.13.3. Εκκίνηση με αντιστάσεις στο στάτη

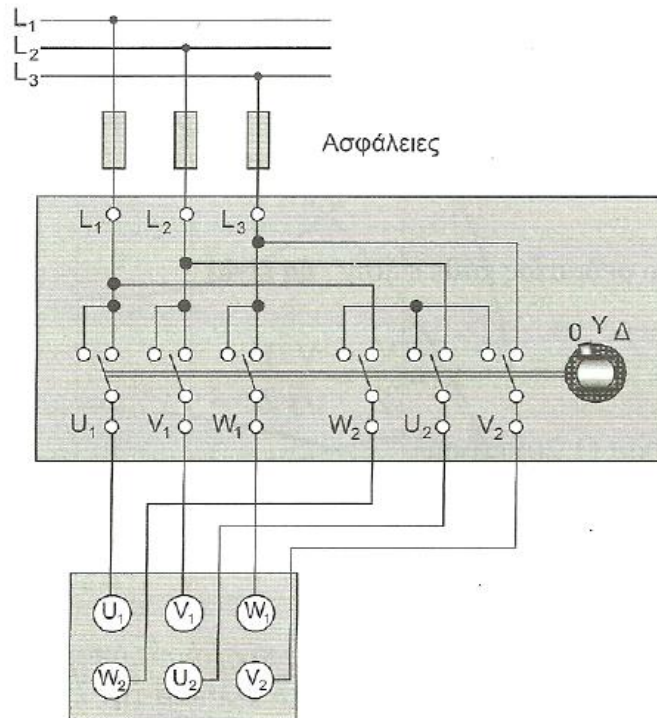
Χρησιμοποιείται εκκινητής που αποτελείται από τρεις αντιστάσεις οι οποίες παρεμβάλλονται στο κύκλωμα που τροφοδοτεί το στάτη του τριφασικού κινητήρα. Ο κινητήρας μ' αυτόν τον τρόπο ξεκινάει με ελαττωμένη τάση και συνεπώς και με ελαττωμένη ένταση. Προοδευτικά όσο αυξάνεται η ταχύτητα του κινητήρα αφαιρούνται 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 15: Εκκίνηση τριφασικού κινητήρα με χρήση αντιστάσεων στο στάτη

2.13.4. Εκκίνηση με διακόπτη αστέρα-τριγώνου

Η παραγόμενη ροπή 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.

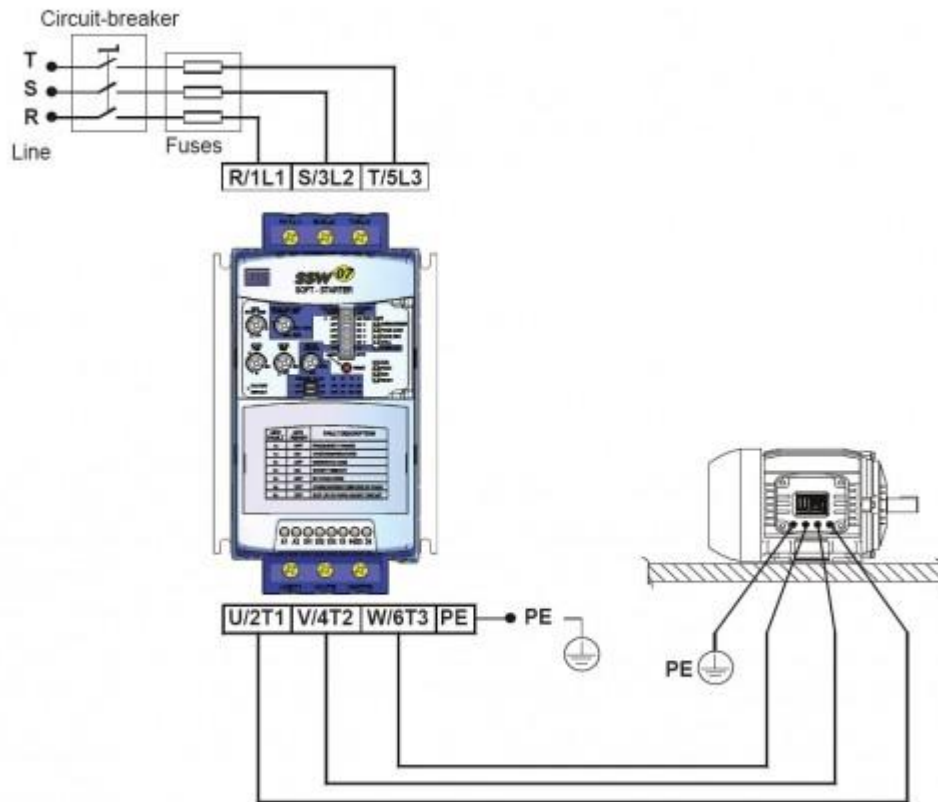


Εικόνα 16: Εκκίνηση τριφασικού κινητήρα με χρήση διακόπτη αστέρα-τριγώνου

2.13.5. Εκκίνηση με ομαλό εκκινητή (soft-starter)

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

Ένα από τα πλεονεκτήματα του ομαλού εκκινητή 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 17: Εκκίνηση τριφασικού κινητήρα με χρήση ομαλού εκκινητή

2.14. Έλεγχος της ταχύτητας των ασύγχρονων κινητήρων

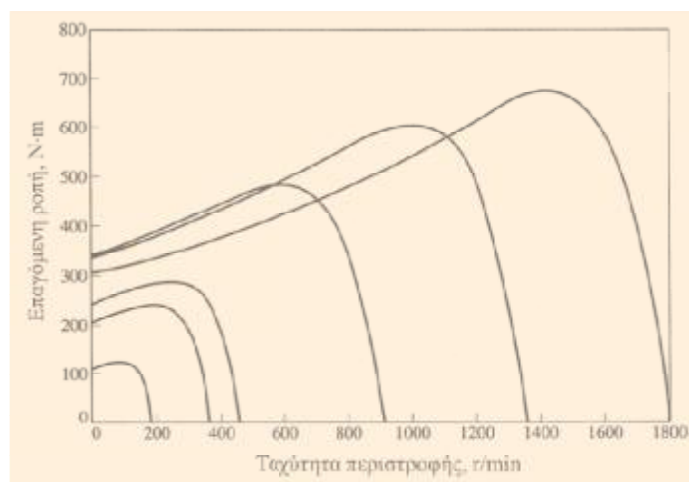
2.14.1. Έλεγχος ταχύτητας με μεταβολή του αριθμού των πόλων.

- § Μέθοδος διαδοχικών πόλων
- § Πολλαπλά τυλίγματα στο στάτη

2.14.2. Έλεγχος ταχύτητας με μεταβολή της συχνότητας του δικτύου.

Αν η συχνότητα που εφαρμόζεται στο στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα μεταβληθεί, ο ρυθμός περιστροφής των μαγνητικών του πεδίων μεταβάλλεται ανάλογα και το σημείο λειτουργίας χωρίς φορτίο στην καμπύλη ροπής- ταχύτητας μεταβάλλεται επίσης. Με τον έλεγχο μεταβλητής συχνότητας, η ταχύτητα του κινητήρα είναι δυνατό να ρυθμίζεται πάνω και κάτω από τη βασική ταχύτητα σε ένα μεγάλο εύρος ρύθμισης που ξεκινά από το 5% της βασικής ταχύτητας και φτάνει μέχρι και σε τιμές διπλάσιες της βασικής ταχύτητας. Όμως είναι σημαντικό να καθοριστούν κάποια όρια για την τάση και τη ροπή του κινητήρα κατά τη μεταβολή της ταχύτητάς του, ώστε η λειτουργία του να είναι ασφαλής.

- § Ρύθμιση ταχύτητας κάτω από τη βασική-Η τάση εισόδου ελαττώνεται γραμμικά με την ταχύτητα

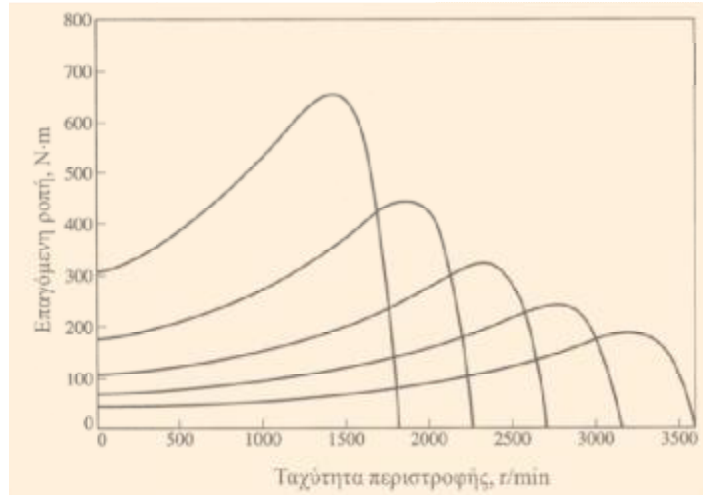


Εικόνα 18: Ρύθμιση ταχύτητας κάτω από τη βασική

Όταν ο κινητήρας περιστρέφεται με ταχύτητες μικρότερες της βασικής θα πρέπει η τάση που εφαρμόζεται στο στάτη του κινητήρα να περιορίζεται. Αν δεν ακολουθηθεί αυτή η διαδικασία ο χάλυβας του στάτη οδηγείται σε κορεσμό και το ρεύμα

μαγνήτισης του κινητήρα μπορεί να πάρει εξαιρετικά μεγάλες τιμές οπότε να καταστραφεί η μηχανή.

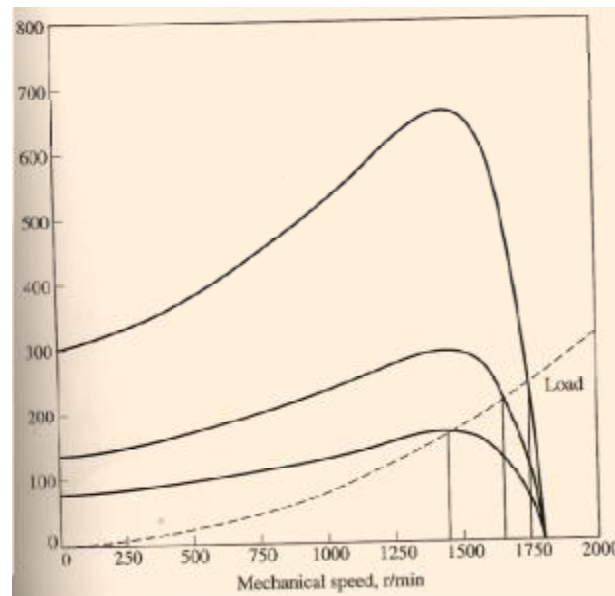
§ Ρύθμιση ταχύτητας πάνω από τη βασική-Η τάση εισόδου διατηρείται σταθερή



Εικόνα 19: Ρύθμιση ταχύτητας πάνω από τη βασική

Όταν η ηλεκτρική συχνότητα που εφαρμόζεται στον κινητήρα ξεπεράσει την ονομαστική συχνότητα, η τάση στο στάτη θα πρέπει να παραμείνει σταθερή με σκοπό την προστασία της μόνωσης του κινητήρα.

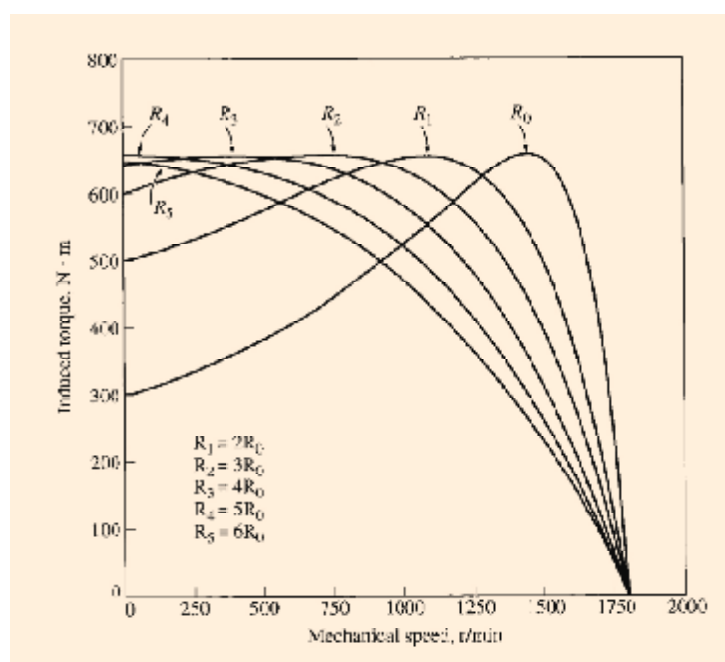
2.14.3. Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας



Εικόνα 20: Ρύθμιση της ταχύτητας με μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας

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

2.14.4. Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της αντίστασης του δρομέα



Εικόνα 21: Έλεγχος της ταχύτητας με μεταβολή της αντίστασης του δρομέα

Στους επαγωγικούς κινητήρες με δακτυλιοφόρο δρομέα είναι δυνατή η μεταβολή της μορφής της χαρακτηριστικής ροπής- ταχύτητας με την εισαγωγή πρόσθετων αντιστάσεων στο κύκλωμα του δρομέα της μηχανής. Μεταβολή της αντίστασης του δρομέα μεταβάλλει την ταχύτητα λειτουργίας του κινητήρα. Όμως η εισαγωγή πρόσθετων αντιστάσεων στο κύκλωμα του δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα μειώνει σημαντικά την απόδοση της μηχανής και έτσι μια τέτοια μέθοδος μεταβολής της ταχύτητας χρησιμοποιείται μόνο για σύντομες περιόδους λόγω των προβλημάτων απόδοσης που δημιουργεί.

2.15. Προσδιορισμός των παραμέτρων στο ισοδύναμο κύκλωμα

- § **Πείραμα χωρίς φορτίο:** Υπολογίζονται οι απώλειες περιστροφής του κινητήρα κι λαμβάνονται πληροφορίες σχετικά με το ρεύμα μαγνήτισης
- § **Πείραμα συνεχούς ρεύματος:** Υπολογίζεται η αντίσταση R_1 ανεξάρτητα από τις R_2, X_1, X_2
- § **Πείραμα ακινητοποιημένου δρομέα:** Υπολογίζεται η συνολική αντίσταση του κυκλώματος του κινητήρα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Στην παρακάτω μελέτη αναφέρονται τα βασικά βήματα για την σχεδίαση ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα . Το πρώτο βήμα είναι ο προσδιορισμός των τεχνικών προδιαγραφών του κινητήρα όπου κυκλοφορεί στην αγορά και έχει κατασκευαστεί από την εταιρία VALIADIS S.A . Στην συγκεκριμένη μελέτη οι προδιαγραφές είναι οι ακόλουθες:

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ: 15kW

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ: 1471στρ./λεπτό

ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (ΠΟΛΙΚΗ): 400V

ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ: 50Hz

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΑΣΕΩΝ: 3

ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑΣ: ΤΡΙΓΩΝΟ

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ: 0,847

ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ: 0,91

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗ:97,43N.m

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΡΕΥΜΑ:28,07A

ΡΟΠΗ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ:211,52N.m

ΡΟΠΗ ΑΝΑΤΡΟΠΗΣ:257N.m

ΟΛΗΣΘΗΣΗ:1,933%

ΚΛΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ: B

3.1 Στάτης

3.1.1 Διαστασιολόγηση του κινητήρα

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:

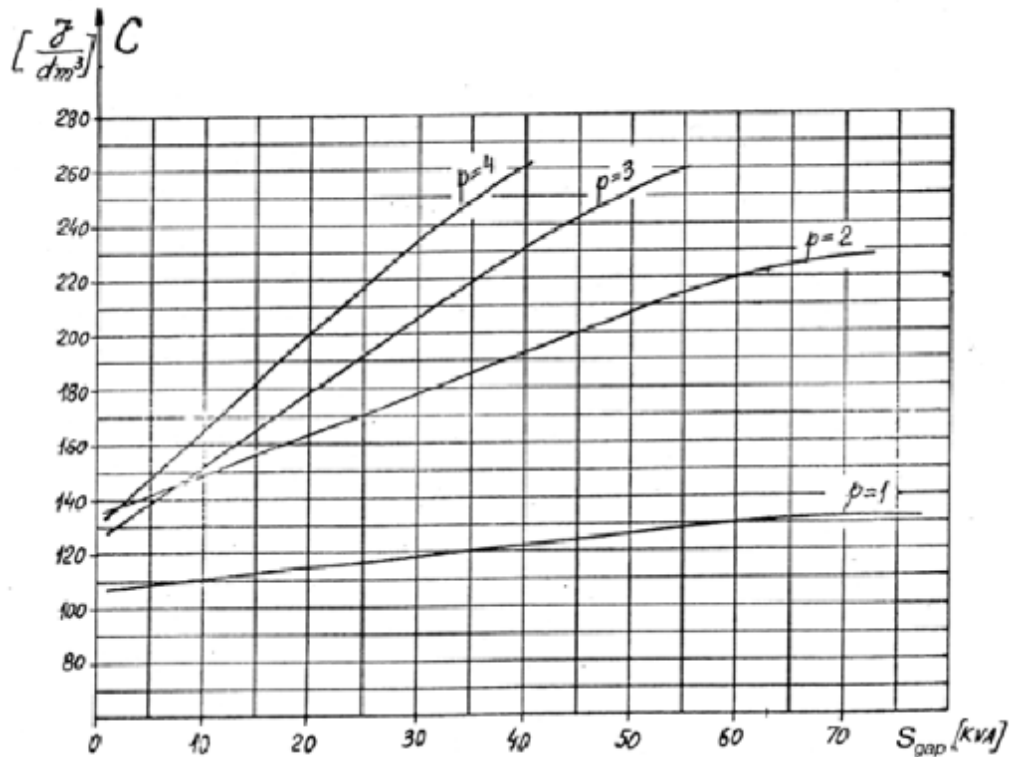
$$K_E = \frac{E_A}{V_\varphi} \approx 0.98 - 0.005 \cdot p_i = 0.98 - 0.005 \cdot 2 = 0.97$$

Άρα

$$S_{gap} = \frac{K_E \cdot P_n}{\eta_N \cdot \cos\varphi} = \frac{0.97 \cdot 15000W}{0.91 \cdot 0.847} = 18877.22VA \cong 18.877kVA$$

Ο συντελεστής λ είναι ο λόγος του μήκους του πυρήνα προς το πολικό βήμα και όταν πρόκειται για τετραπολικούς κινητήρες παίρνει τιμή μεταξύ 1.2 και 1.8. Στη συγκεκριμένη μελέτη επιλέγουμε τιμή $\lambda=1.5$.

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. Μπορεί όμως να υπολογιστεί και από την παρακάτω γραφική παράσταση η οποία ισχύει για μικρής ισχύος κινητήρες:



Εικόνα 22: Διάγραμμα υπολογισμού σταθεράς του Esson

Από το παραπάνω διάγραμμα παίρνουμε μία προσεγγιστική τιμή:

$$C_0 \approx 160 \times 10^3 \text{ J/m}^3$$

Αντικαθιστώντας όλα τα παραπάνω στην σχέση (1) υπολογίζουμε:

$$D_{IS} = \sqrt[3]{\frac{2p_i}{\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{p_i}{f} \cdot \frac{S_{gap}}{C_0}} \Rightarrow D_{IS} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 2}{\pi \cdot 1.5} \cdot \frac{2}{50} \cdot \frac{18877.2}{160 \cdot 10^3}} = 0.158 \text{ m} = 15.8 \text{ cm}$$

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

$$\lambda = \frac{L}{\tau} \rightarrow L = \lambda \cdot \tau \rightarrow L = \frac{\lambda \cdot \pi \cdot D_{IS}}{2 \cdot p_i} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 0.158}{2 \cdot 2} m = 0.186m = 18.6cm$$

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

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{IS}}{2 \cdot p_i} = \frac{3.14 \cdot 0.158m}{2 \cdot 2} = 0.124m = 12.4cm$$

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

$$\frac{D_{IS}}{D_{out}} = 0.62 \rightarrow D_{out} = \frac{D_{IS}}{0.62} = 0.255m = 25.5cm$$

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:

$$g = (0.1 + 0.012 \cdot \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3}m = (0.1 + 0.012 \cdot \sqrt[3]{15000}) \cdot 10^{-3}m = 0.396mm$$

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 0.4mm. 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.

3.1.2 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:

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

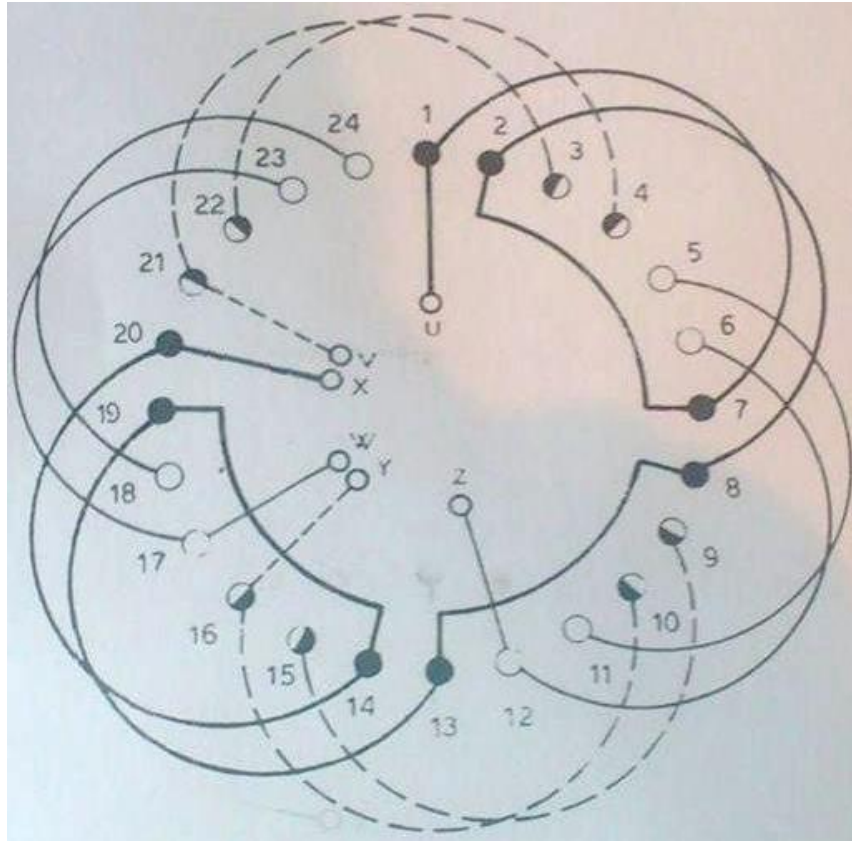
όπου p_i τα ζεύγη πόλων, m ο αριθμός των φάσεων και q ο αριθμός των αυλακιών ανά φάση και πόλο. Επιλέγουμε δύο αυλάκια ανά φάση και πόλο άρα:

$$N_S = 2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 3 = 24 \text{ αυλάκια}$$

Το πολικό βήμα θα είναι:

$$y_\pi = \frac{24}{2 \cdot 2} = 6 \text{ αυλάκια}$$

Θα φτιάξουμε ένα τυλίγμα με μια στρώση (ένα μάτσο ανά αυλάκι), με τρεις πραγματικούς και τρεις φανταστικούς πόλους, το οποίο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 23:Το τύλιγμα της Μηχανής. 24 αυλάκια, 4 πόλοι (2 πραγματικοί και 2 φανταστικοί)

Ο συντελεστής τυλίγματος δίνεται από την σχέση:

$$K_{\tau} = K_W = \frac{\sin \frac{q \cdot a}{2}}{q \cdot \sin \frac{a}{2}} = \frac{\sin \frac{2 \cdot 30}{2}}{2 \cdot \sin \frac{30}{2}} = 0.96$$

Όπου

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

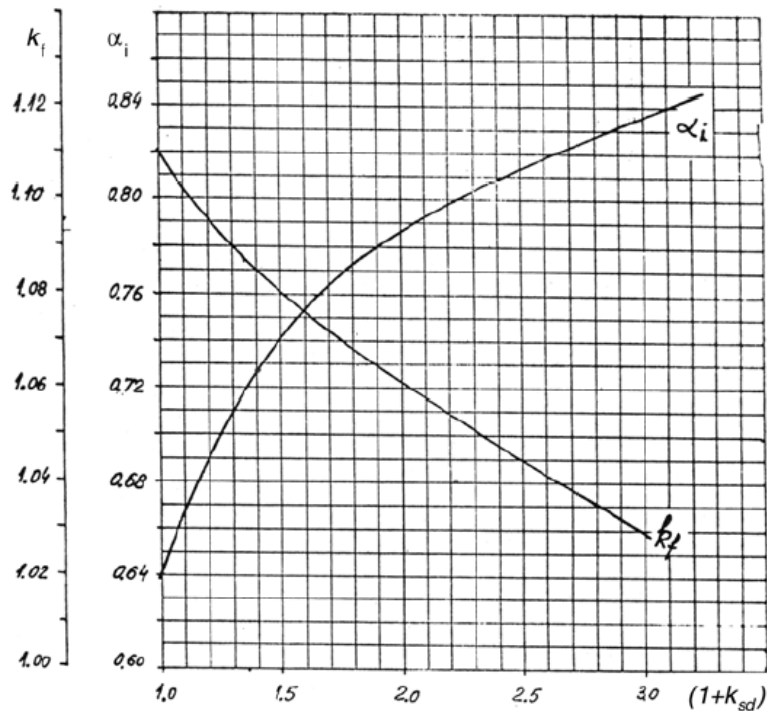
Όπου α_r : η γεωμετρική γωνία ($360^\circ/24$ αυλάκια= 15° στην περίπτωση μας).

$$\text{Αρά } \alpha = p_i \cdot \alpha_r = 2 \cdot 15 = 30$$

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 24: Διάγραμμα υπολογισμού της σταθεράς α_i

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

$\alpha_i=0.74$. Αναλυτικός υπολογισμός του $1+K_{ST}$ θα γίνει αργότερα σε άλλη φάση της μελέτης.

Για μηχανές με τέσσερις πόλους συνίσταται η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο να είναι μεταξύ 0.65-0.78T. Εμείς θα διαλέξουμε μια μαγνητική επαγωγή ίση με 0.65T. Άρα, η μαγνητική ροή στο διάκενο θα είναι ίση με:

$$\varphi = a_i \cdot \tau \cdot L \cdot B_g = 0.74 \cdot 0.124 \cdot 0.186 \cdot 0.65 = 11.09 \cdot 10^{-3} Wb$$

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 α_i την βρίσκουμε από την εικόνα και παίρνει τιμή 1,07.

Άρα:

$$W_i = \frac{K_E \cdot V_\varphi}{4 \cdot K_f \cdot K_\tau \cdot f \cdot \varphi} = \frac{0.97 \cdot 400}{4 \cdot 1.07 \cdot 0.96 \cdot 50 \cdot 11.09 \cdot 10^{-3}} \approx 170 \text{ σπειρες} / \text{φάση}$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον αριθμό αγωγών ανά αυλάκι:

$$n_s = \frac{\alpha_i \cdot W_i}{p_i \cdot q} = \frac{1 \cdot 170}{2 \cdot 2} \approx 43 \text{ αγωγοί} / \text{αυλάκι}$$

Ο συντελεστής α_i εκφράζει τον αριθμό των παράλληλων αγωγών που στην περίπτωση μας είναι 1.

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

$$I_{ov} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_n \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{15000W}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.847 \cdot 0.91} = 28A$$

Το ρεύμα της φάσης είναι

$$I_{ov,\varphi} = \frac{I_{ov}}{\sqrt{3}} = 16.16A$$

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

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

Για κινητήρες τεσσάρων πόλων συνίσταται η πυκνότητα ρεύματος να βρίσκεται μεταξύ 4 και 7 A/mm²

Όσο μεγαλώνει η πυκνότητα του ρεύματος, μειώνεται η διατομή των αγωγών αλλά μεγαλώνουν οι απώλειες χαλκού. Επιλέγουμε μια πυκνότητα ρεύματος ίση με 5 A/mm², για να μην έχουμε μεγάλες απώλειες και υπολογίζουμε την διατομή:

$$A_{co} = \frac{I_{ov}}{J_{cos}} = \frac{16.16A}{5 A/mm^2} = 3.232mm^2$$

Η διάμετρος του αγωγού θα είναι ίση με:

$$d_{cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{co}}{\pi}} = 2.03mm$$

Αν η διάμετρος είναι μεγαλύτερη από 1,3mm τότε για κινητήρες μικρής ισχύος επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε παράλληλους κλάδους μικρότερης διαμέτρου. Μετά από δοκιμές καταλήξαμε να χρησιμοποιήσουμε 3 παράλληλους κλάδους διότι έτσι η διάμετρος του αγωγού θα είναι μικρότερη από 1,3mm.

$$d_{cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{cu}}{a_p \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3.232}{3 \cdot \pi}} = 1.17mm$$

Έτσι επιλέγεται από τον πίνακα η αμέσως επόμενη τυποποιημένη διάμετρο η οποία είναι 1.18mm

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

3.1.3 Υπολογισμός διαστάσεων αυλακιών στάτη

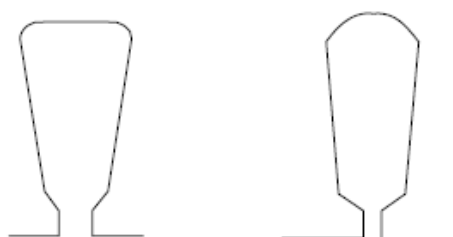
Από την στιγμή που γνωρίζουμε την διατομή των αγωγών και τον αριθμό τους, μπορούμε να υπολογίσουμε τη απαιτούμενη διατομή των αυλακιών του στάτη από την σχέση:

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

Όπου K_{fill} είναι μια σταθερά (fill factor) η οποία εξαρτάται από το πάχος της μόνωσης που χρησιμοποιούμε, για τον συγκεκριμένο κινητήρα ισχύος 15kW θα επιλέξουμε τιμή 0,44. Επίσης σύμφωνα με τον πίνακα για διάμετρο του στάτη 1,18mm έχουμε διάμετρο 1,2345mm του μονωτικού υλικού. Ο συντελεστής a_i δηλώνει τους παράλληλους κλάδους που χρησιμοποιούμε όπου στην περίπτωσή μας είναι 3. Οπότε η διατομή των αυλακιών θα είναι ίση με:

$$A_{su} = \frac{\pi \cdot d_{cu}^2 \cdot a_i \cdot n_s}{4 \cdot K_{fill}} = \frac{\pi \cdot 1.2345^2 \cdot 3 \cdot 43}{4 \cdot 0.44} = 350.74mm^2$$

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



Εικόνα 25:Μορφή αυλακιών στάτη

Το επόμενο σχήμα απεικονίζει αναλυτικά τις διαστάσεις που θα πρέπει να υπολογιστούν. Κάποιες από τις διαστάσεις αυτές

υπολογίζονται εμπειρικά από την βιομηχανική εμπειρία. Πιο συγκεκριμένα:

$b_{os}=2-3\text{mm}$, επιλέγουμε $2,5\text{mm}$.

$h_{os}=0.5-1\text{mm}$, επιλέγουμε 0.5mm .

$h_w=1-4\text{mm}$, επιλέγουμε 1mm .

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

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

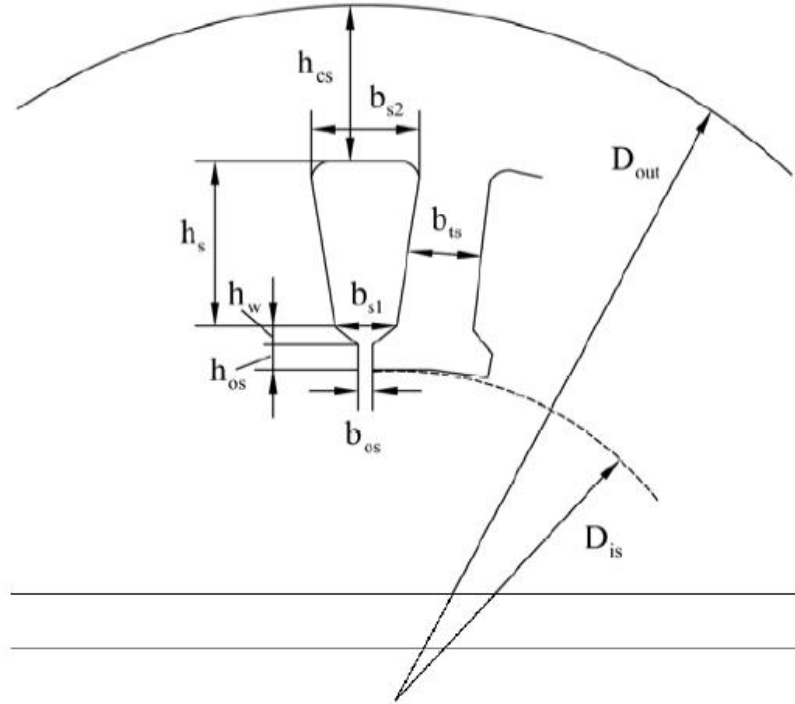
Αριστερά είναι η μαγνητική ροή στο διάκενο και δεξιά η μαγνητική ροή στο «δόντι» του αυλακιού. Ο K_{Fe} είναι ένας συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τα αποτελέσματα της μόνωσης μεταξύ των μεταλλικών φύλλων από τα οποία αποτελείται ο στάτης και B_{ts} είναι η μαγνητική επαγωγή στον στάτη, η οποία συνίσταται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

$$b_{ts} = \frac{B_g \cdot \tau_s \cdot L}{B_{ts} \cdot L \cdot K_{Fe}} = \frac{0.65 \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{1.55 \cdot 0.96} = 8.7365 \cdot 10^{-3} \text{m}$$

Όπου

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

Θα πρέπει να τονιστεί ότι το πλάτος του δοντιού δεν θα πρέπει να είναι μικρότερο από 3.5mm για κατασκευαστικούς λόγους.



Εικόνα 26: Οι διαστάσεις που πρέπει να υπολογιστούν

Από την γεωμετρία του αυλακιού προκύπτει ότι:

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

$$= \frac{\pi \cdot (158 + 2 \cdot 0.5 + 2 \cdot 1) \cdot 10^{-3}}{24} - 8.7365 \cdot 10^{-3}$$

$$\Rightarrow b_{s1} = 12.33 \cdot 10^{-3} m = 12.33 mm$$

Επίσης:

$$b_{s2} = \sqrt{4 \cdot A_{su} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{N_s}\right) + b_{s1}^2} = \sqrt{4 \cdot 350.74 \cdot \tan\left(\frac{\pi}{24}\right) + 12.33^2} mm$$

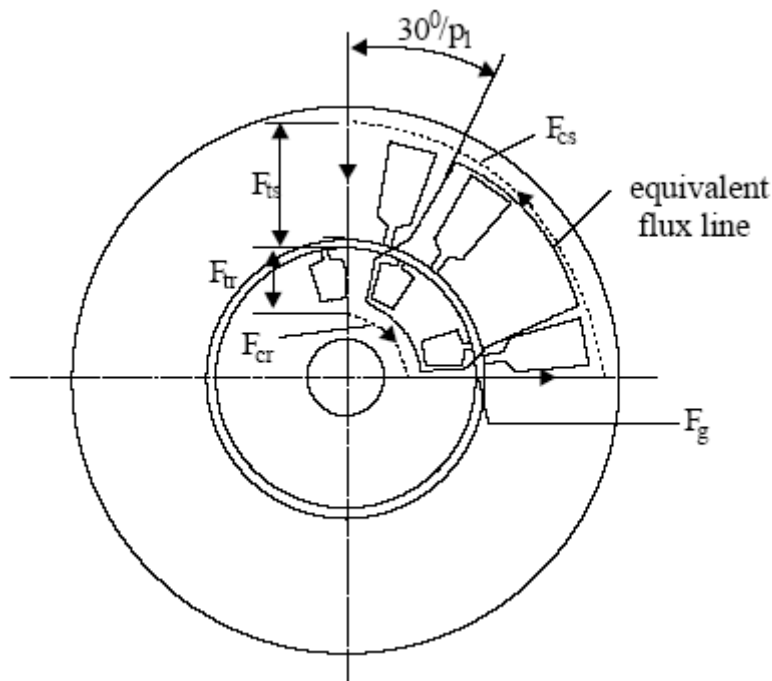
$$= 18.35 mm$$

$$A_{su} = h_s \cdot \frac{(b_{s1} + b_{s2})}{2} \rightarrow h_s = \frac{2 \cdot A_{su}}{(b_{s1} + b_{s2})} \rightarrow h_s = \frac{2 \cdot 350.74}{(12.33 + 18.35)} = 22.86 mm$$

Στη συνέχεια, θα υπολογίσουμε τον συντελεστή $1+K_{st}$ (tooth saturation factor), στον οποίο αυθαίρετα είχαμε δώσει μία τιμή ίση με 1.5. 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 στάτη, στον δρομέα και στο διάκενο αντίστοιχα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα



Εικόνα 27:Οι μαγνητεγερτικές δυνάμεις στο στάτη και στο δρομέα

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

$$F_{mg} = K_c \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_o}$$

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:

$$F_{mg} = K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0} = 1,2 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,65}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 248,4At$$

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:

$$F_{mts} = H_{ts}(h_s + h_{os} + h_w) = 2460 \cdot (22.86 + 0.5 + 1) \cdot 10^{-3} = 59.9256At$$

Η μαγνητεγερτική δύναμη στον δρομέα υπολογίζεται από την σχέση:

$$F_{mtr} = K_{st} \cdot F_{mg} - F_{mts} = 0.5 \cdot 248.4 - 59.9256 = 64.2744At$$

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

$$h_{cs} = \frac{D_{out} - (D_{IS} + 2 \cdot (h_{os} + h_w + h_s))}{2} = \frac{255 - (158 + 2 \cdot (0.5 + 1 + 22.86))}{2}$$

$$\rightarrow h_{cs} = \frac{255 - 206.72}{2} \rightarrow h_{cs} = 24.14mm$$

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:

$$B_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot h_{cs}} = \frac{11.09 \cdot 10^{-3} Wb}{2 \cdot 0.186m \cdot 24.14 \cdot 10^{-3}m} = 1.235T$$

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 μειώσουμε την εξωτερική διάμετρο του στάτη.

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

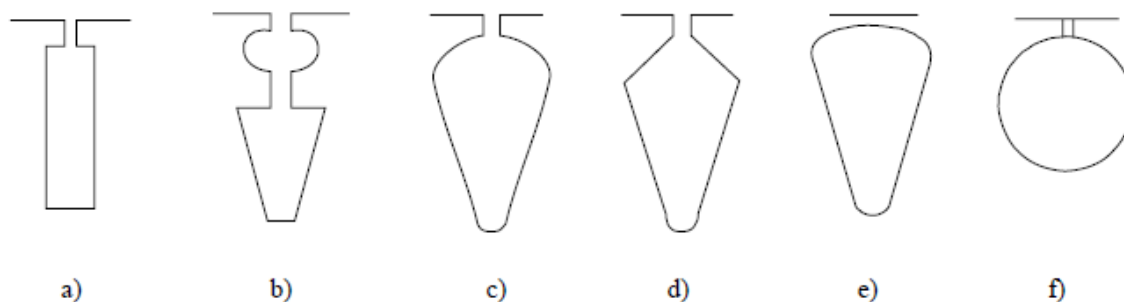
$$h_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot B_{cs}} = \frac{11.09 \cdot 10^{-3} Wb}{2 \cdot 0.186m \cdot 1.5T} = 19.875mm$$

Άρα η εξωτερική διάμετρος θα πρέπει να μειωθεί κατά $2 \cdot (24.14 - 19.875)mm = 8.53mm = 0.853cm$. Άρα η εξωτερική διάμετρος της μηχανής θα είναι:

$$D_{out} = 25.5cm - 0.853cm = 24.647cm = 246.47mm$$

3.2 Δρομέας

Αρχικά θα υπολογίσουμε τη μορφή και τον αριθμό των αγωγών του δρομέα. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι τυπικές μορφές των αγωγών του δρομέα:



Εικόνα 28: 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

Διαλέγουμε 16 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 :

$$K_I = 0.8 \cdot \cos\varphi + 0.2 = 0.8 \cdot 0.847 + 0.2 = 0.8776$$

Το $\cos\varphi$ είναι ο συντελεστής ισχύος της μηχανής που θέλουμε να επιτύχουμε (0.847 στην περίπτωση μας). Άρα:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_i \cdot K_{w1} \cdot I_{1n} \cdot K_I}{N_r} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 170 \cdot 0.96 \cdot 16.16 \cdot 0.8776}{16} = 867.94A$$

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:

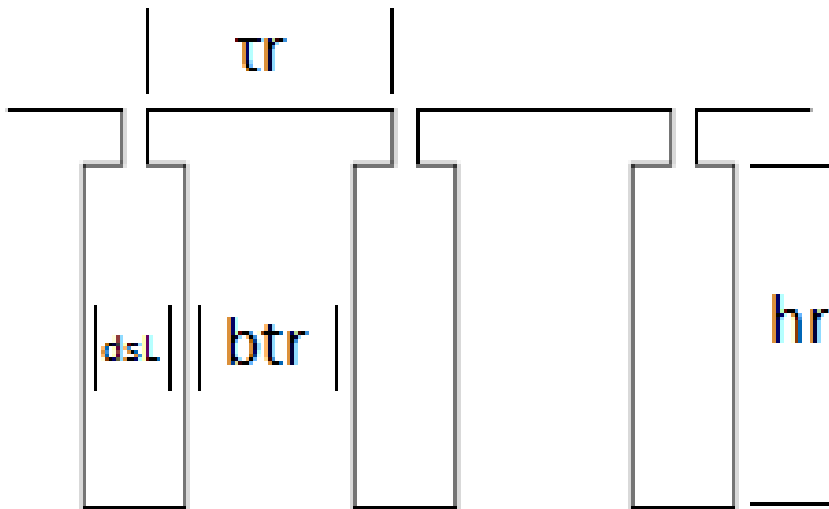
$$A_b = \frac{867.94A}{3.42 A/mm^2} = 253.78mm^2$$

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

$$I_{er} = \frac{I_b}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p_i}{N_r}} = \frac{867.94A}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 3}{16}} = 781.125A$$

Η διατομή του δακτυλίου βραχυκύκλωσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$A_{er} = \frac{I_{er}}{J_{er}} = \frac{781.125A}{0.8 \cdot 3.42 A/mm^2} = 285.5mm^2$$



Εικόνα 29: Οι βασικές διαστάσεις των αγωγών του δρομέα.

3.2.1 Υπολογισμός των διαστάσεων των αγωγών του δρομέα.

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

$$\tau_r = \frac{\pi \cdot (D_{is} - 2g)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (158 - 2 \cdot 0.4)}{16} = 30.85mm$$

Θεωρώντας ότι η μαγνητική επαγωγή στο «δόντι» του δρομέα είναι ίση με 1,55T 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:

$$b_{tr} = \frac{B_g \cdot \tau_r}{K_{fe} \cdot B_{tr}} = \frac{0.65T \cdot 30.85 \cdot 10^{-3}}{0.96 \cdot 1.55T} = 13.476 \cdot 10^{-3}mm$$

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

$$D_{re} = D_{is} = 158mm$$

Άρα η περιφέρεια του δρομέα θα είναι:

$$C = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot \frac{158}{2} = 496.12mm$$

Από το σχήμα των αγωγών προκύπτει ότι:

$$d_{SL} = \tau_r - b_{tr} = 30.85mm - 13.476mm = 17.374mm$$

Το βάθος του αγωγού θα είναι:

$$h_r = \frac{A_b}{d_{SL}} = \frac{253.78 mm^2}{17.374mm} = 14.6mm$$

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 1.55T τότε από τον πίνακα 3 για το υλικό που χρησιμοποιούμε η ένταση του μαγνητικού πεδίου θα είναι 1760A/m. Άρα η μαγνητεγερτική δύναμη που απαιτείται είναι ίση με:

$$F_{mtr} = H_{tr} \cdot (h_r + h_{or} + d_{SL}) = 1760 \cdot A/m \cdot (14.6 + 0.5 + 17.374) \cdot 10^{-3}m \\ = 57.15At$$

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:

$$h_{cr} = \frac{\Phi}{2} \cdot \frac{1}{L \cdot B_{cr}} = \frac{11.09 \cdot 10^{-3}Wb}{2 \cdot 0.186m \cdot 1.6T} = 18.63mm$$

3.2.2 Υπολογισμός της διαμέτρου του άξονα

Στη 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:

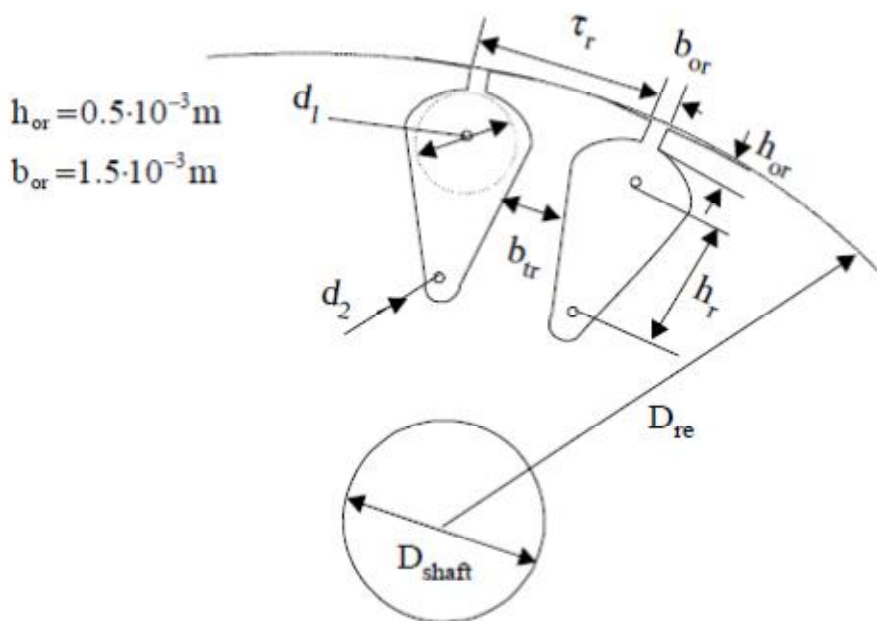
$$D_{shaft} \leq D_{is} - 2 \cdot (h_r + h_{or} + h_{cr}) - 2 \cdot g$$

$$\Rightarrow D_{shaft} \leq 158 - 2 \cdot (14.6 + 0.5 + 18.63) - 2 \cdot 0.4 = 89.74mm$$

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

$$T = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{15000W}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1471}{60} \cdot (1 - 0.02)} = 99.4Nm$$

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



Εικόνα 30: Γενική μορφή του δρομέα και του άξονα του.

3.3 Ρεύμα 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:

$$\gamma_1 = \frac{b_{os}^2}{5 \cdot g + b_{os}} = \frac{2.5^2}{5 \cdot 0.4 + 2.5} = 1.39$$

$$\gamma_2 = \frac{b_{or}^2}{5 \cdot g + b_{or}} = \frac{1.5^2}{5 \cdot 0.4 + 1.5} = 0.643$$

Άρα:

$$K_{c1} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1} = \frac{20}{20 - 1.39} = 1.075$$

$$K_{c2} = \frac{\tau_r}{\tau_r - \gamma_2} = \frac{30.85}{30.85 - 0.643} = 1.0213$$

$$K_C = K_{c1} \cdot K_{c2} = 1.075 \cdot 1.0213 = 1.098$$

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.

Για $B_{cs}=1,5T$ και $B_{cr}=1,6T$ από τον πίνακα 3 οι εντάσεις του μαγνητικού πεδίου στον στάτη και στον δρομέα είναι $H_{cs}=1340A/m$ και $H_{cr}=2460A/m$ αντίστοιχα.

$$F_{mcs} = C_{cs} \frac{\pi \cdot (D_{out} - h_{cs})}{2 \cdot p_i} \cdot H_{cs} = 0.358 \frac{\pi \cdot (246.47 - 19.875) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 2} \cdot 1340 = 85.33At$$

$$F_{mcr} = C_{cr} \frac{\pi \cdot (D_{shaft} + h_{cr})}{2 \cdot p_i} \cdot H_{cr} = 0.316 \frac{\pi \cdot (89.74 + 18.63) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 2} \cdot 2460 = 66.13At$$

Όπου

$$C_{CS} = 0.88 \cdot e^{-0.4 \cdot B_{cs}^2} = 0.88 \cdot e^{-0.4 \cdot 1.5^2} = 0.358$$

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

Οπότε

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

$$2 \cdot \left(1.098 \cdot 0.4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0.65}{1.256 \cdot 10^{-6}} + 59.9256 + 64.2744 + 85.33 + 66.13 \right) = 1005.9At$$

$$1 + K_{st} = \frac{F_{1m}}{2 \cdot F_{mg}} = \frac{1005.9}{2 \cdot 248.4} = 2.024$$

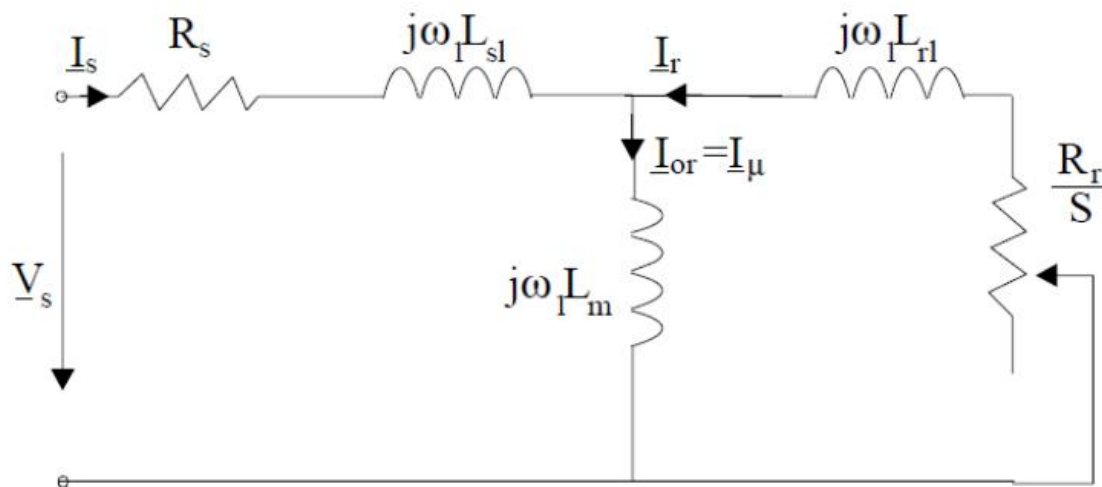
Και τελικά το ρεύμα μαγνήτισης δίνεται από τη σχέση

$$I_{\mu} = \frac{\pi \cdot \frac{F_{1m}}{2} \cdot p_i}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot K_{wi} \cdot W_i} = \frac{3.14 \cdot \frac{1005.9}{2} \cdot 2}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot 0.96 \cdot 170} = 4.56A$$

$$i_{\mu} = \frac{I_{\mu}}{I_{ov}} = \frac{4.56}{16.16} = 28.22\%$$

3.4 Υπολογισμός ισοδύναμου κυκλώματος

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός επαγωγικού κινητήρα είναι το παρακάτω:



Εικόνα 31:Το ισοδύναμο κύκλωμα

3.4.1 Υπολογισμός αντιστάσεων

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 (ενδεικτική θερμοκρασία λειτουργίας του κινητήρα) 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 4 πόλων δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση

$$l_{end} = 2 \cdot y - 0.02$$

Όπου y είναι το βήμα του τυλίγματος. Στην περίπτωση μας ισχύει

$$\frac{y}{\tau} = \frac{7}{9} \Rightarrow y = \frac{7}{9} \cdot \tau = \frac{7}{9} \cdot 0.124 = 0.0964m$$

$$l_{end} = 2 \cdot y - 0.02 = 2 \cdot 0.0964 - 0.02 = 0.1728m$$

Στους 20°C η ειδική αντίσταση χαλκού είναι ίση με

$$\rho_{20} = 1,78 \times 10^{-8} \Omega m.$$

Στους 80°C (ενδεικτική περίπτωση θερμοκρασίας κατά τη λειτουργία της μηχανής) υπολογίζεται από τον τύπο:

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

Το συνολικό μήκος του τυλίγματος κάθε φάσης θα είναι:

$$l_c = 2 \cdot (L + l_{end}) = 2 \cdot (0.186 + 0.1728) = 0.7176m$$

Η αντίσταση τυλιγμάτων στάτη θα είναι ίση με

$$R_s = \rho_{co} \cdot \frac{l_c \cdot W_i}{A_{co} \cdot a_i} = 2.17 \cdot 10^{-8} \Omega m \cdot \frac{0.7176m \cdot 170}{3.232 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot 1} = 0.819 \Omega$$

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

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

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:

$$b = h_r + h_{or} + d_{SL} = 14.6 + 0.5 + 17.374 = 32.474 \text{ mm}$$

$$D_{er} = D_{re} - 3,5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot g = 0.158 - 0.0035 - 2 \cdot 0.0004 = 0.1537 \text{ m}$$

Άρα το μήκος του δακτυλίου βραχυκύκλωσης είναι:

$$l_{er} = \frac{\pi \cdot (D_{er} - b)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (0.1537 - 0.032474)}{16} = 23.79 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την σταθερά K_R από την σχέση:

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

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

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:

$$\beta_s = \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_o}{2 \cdot \rho_{Al}}} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 50 \cdot 1.25 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3.1 \cdot 10^{-8}}} = 79.565 \text{ m}^{-1}$$

$$\xi = \beta_s \cdot h_r \cdot \sqrt{s} = 79.565 \text{ m}^{-1} \cdot 0.0146 \text{ m} \cdot 1 = 1.162$$

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

$$\begin{aligned} \rho_{Al} = \rho_{80} &= \rho_{20} \cdot \left(1 + \frac{1}{273} \cdot (80 - 20)\right) = 3.1 \cdot 10^{-8} \cdot \left(1 + \frac{1}{273} \cdot (80 - 20)\right) \\ &= 3.78 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m} \end{aligned}$$

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

$$3.78 \cdot 10^{-8} \cdot \left[\frac{0.186 \cdot 1.162}{253.78 \cdot 10^{-6}} + \frac{23.79 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 285.5 \cdot 10^{-6} \cdot \sin^2 \left(\frac{2\pi}{16} \right)} \right] = 42.95 \cdot 10^{-6} \Omega$$

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:

$$R_2 = \frac{4 \cdot m}{N_r} \cdot (W_1 \cdot K_{w1})^2 \cdot R_{be}^{80} = \frac{4 \cdot 3}{16} \cdot (170 \cdot 0.96)^2 \cdot 42.95 \cdot 10^{-6} = 0.86 \Omega$$

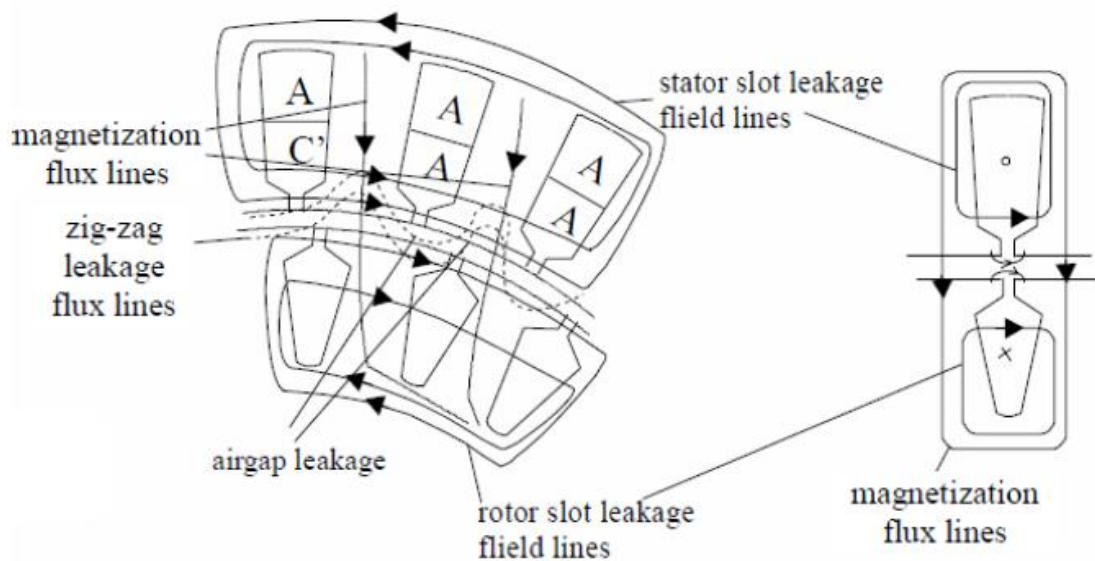
3.4.2 Υπολογισμός επαγωγικών αντιδράσεων

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 32: Η αμοιβαία ροή και η ροή σκέδασης στο εσωτερικό ενός επαγωγικού κινητήρα

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:

$$\begin{aligned} \lambda_s &= \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{h_s}{b_{s1} + b_{s2}} + \frac{2 \cdot h_w}{b_{os} + b_{s1}} + \frac{h_{os}}{b_{os}} \right] \cdot \left(\frac{1 + 3\beta}{4} \right) \\ &= \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{22.86}{12.33 + 18.35} + \frac{2 \cdot 1}{2.5 + 12.33} + \frac{0.5}{2.5} \right] \cdot \left(\frac{1 + 3 \cdot 7/9}{4} \right) = 0.693 \end{aligned}$$

Ο συντελεστής λ_{ds} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda_{ds} = \frac{0.9 \cdot \tau_s \cdot q^2 \cdot K_w^2 \cdot C_s \cdot \gamma_{ds}}{K_c \cdot g \cdot (1 + K_{st})}$$

Όπου

$$C_s = 1 - 0.033 \cdot \frac{b_{os}^2}{g \cdot \tau_s} = 1 - 0.033 \cdot \frac{2.5^2}{0.4 \cdot 20} = 0.974$$

Και

$$\gamma_{ds} = (0.18 \cdot \sin\varphi_1 + 1.26) \cdot 10^{-2}$$

Με

$$\varphi = \pi \cdot (6\beta - 5.5) = \pi \left(6 \cdot \frac{7}{9} - 5.5 \right) = -2.616 \text{ rad ή } -150^\circ$$

Οπότε

$$\begin{aligned} \gamma_{ds} &= (0.18 \cdot \sin\varphi_1 + 1.26) \cdot 10^{-2} = (0.18 \cdot \sin(-150^\circ) + 1.26) \cdot 10^{-2} \\ &= 1.17 \cdot 10^{-2} \end{aligned}$$

Άρα

$$\begin{aligned} \lambda_{ds} &= \frac{0.9 \cdot \tau_s \cdot q^2 \cdot K_{w1}^2 \cdot C_s \cdot \gamma_{ds}}{K_c \cdot g \cdot (1 + K_{sd})} = \frac{0.9 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot 2^2 \cdot 0.96^2 \cdot 0.974 \cdot 1.17 \cdot 10^{-3}}{1.2 \cdot 0.4 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 0.5)} \\ &= 0.105 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \lambda_{er} &= 0.67 \cdot \frac{q}{L} \cdot (l_{end} - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau) \\ &= 0.67 \cdot \frac{2}{0.186} \cdot \left(0.1728 - 0.64 \cdot \frac{7}{9} \cdot 0.124 \right) \Rightarrow \lambda_{er} = 0.8 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} X_{SL} &= 2 \cdot \mu_0 \cdot \omega_1 \cdot L \cdot \frac{W_i^2}{p_1 \cdot q} \cdot (\lambda_s + \lambda_{ds} + \lambda_{er}) \\ &= 2 \cdot 1.256 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0.186 \cdot \frac{170^2}{2 \cdot 2} \cdot (0.693 + 0.105 + 0.8) \\ &= 1.694 \Omega \end{aligned}$$

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

$$\lambda_r = 0.66 + \frac{2 \cdot h_r}{3 \cdot d_{SL}} + \frac{h_{or}}{b_{or}} = 0.66 + \frac{2 \cdot 14.6}{3 \cdot 17.374} + \frac{0.5}{1.5} = 1.554$$

$$\lambda_{dr} = \frac{0.9 \cdot \tau_r \cdot \gamma_{dr}}{K_c \cdot g} \cdot \left(\frac{N_r}{6 \cdot p_1}\right)^2$$

Ο συντελεστής γ_{dr} δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma_{dr} = 9 \cdot \left(\frac{6 \cdot p_i}{N_r}\right)^2 \cdot 10^{-2} = 9 \cdot \left(\frac{6 \cdot 2}{16}\right)^2 \cdot 10^{-2} = 50.625 \cdot 10^{-3}$$

Άρα

$$\lambda_{dr} = \frac{0.9 \cdot \tau_r \cdot \gamma_{dr}}{K_c \cdot g} \cdot \left(\frac{N_r}{6 \cdot p_1}\right)^2 = \frac{0.9 \cdot 30.85 \cdot 50.625 \cdot 10^{-3}}{1.2 \cdot 0.4} \cdot \left(\frac{16}{6 \cdot 2}\right)^2 = 5.2$$

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

$$\begin{aligned} \lambda_{er} &= \frac{2.3 \cdot (D_{er} - b)}{N_r \cdot L \cdot 4 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot P_1}{N_r}\right)} \cdot \log \frac{4.7 \cdot (D_{er} - b)}{b + 2a} \\ &= \frac{2.3 \cdot (153.7 - 32.474)}{16 \cdot 186 \cdot 4 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot 2}{16}\right)} \cdot \log \frac{4.7 \cdot (153.7 - 32.474)}{32.474 + 2 \cdot 8.79} = 0.16894 \end{aligned}$$

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

$$\alpha = \frac{A_{er}}{b} = \frac{285.5 \text{ mm}^2}{32.474 \text{ mm}} = 8.79 \text{ mm}$$

Στη συνέχεια θα υπολογίσουμε τον συντελεστή επιδερμικού φαινομένου K_X (skin effect coefficient for leakage reactance) από τη σχέση (Όπου $\xi=1.162$)

$$K_x = \frac{3 \cdot [\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)]}{2 \cdot \xi \cdot [\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)]} = \frac{3 \cdot [5.06 - 0.04055]}{2 \cdot 1.162 \cdot [5.157 - 0.999]} = 1.445$$

Η επαγωγική αντίδραση του δρομέα θα είναι ίση με:

$$\begin{aligned} X_{be} &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot L \cdot (\lambda_r \cdot K_X + \lambda_{dr} + \lambda_{er}) \\ &= 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1.256 \cdot 10^{-6} \cdot 0.186 \cdot (1.554 \cdot 1.445 + 5.2 + 0.16894) \\ &= 558.56 \cdot 10^{-6} \Omega \end{aligned}$$

Η ανηγμένη στο στάτη επαγωγική αντίδραση του δρομέα θα είναι:

$$X_2 = 4 \cdot m \cdot \frac{(W_1 \cdot K_w)^2}{N_r} \cdot X_{be} = 4 \cdot 3 \cdot \frac{(170 \cdot 0.96)^2}{16} \cdot 558.56 \cdot 10^{-6} \Omega = 11.158 \Omega$$

Οι παραπάνω τιμές είναι για ακινητοποιημένο δρομέα. Για ονομαστική ταχύτητα οι τιμές διαφοροποιούνται λίγο κυρίως λόγω εξάλειψης του επιδερμικού φαινομένου. Μπορούν να υπολογιστούν αναλυτικά.

Απομένει ο υπολογισμός της αντίδρασης μαγνήτισης από τη σχέση:

$$X_m = \sqrt{\left(\frac{V_{ph}}{I_\mu}\right)^2 - R_s^2} - X_{sl} = \sqrt{\left(\frac{400}{4.56}\right)^2 - 0.819^2} - 1.694 = 86.02 \Omega$$

3.5 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:

$$P_{cu} = 3 \cdot I_{ov}^2 \cdot R_s = 3 \cdot 16.16^2 \cdot 0.819 = 641.635W$$

Απώλειες στον δρομέα:

$$\begin{aligned} P_{Al} &= 3 \cdot I_{rn}^2 \cdot R_r = 3 \cdot K_f^2 \cdot I_n^2 \cdot R_r = 3 \cdot 0.8776^2 \cdot 16.16^2 \cdot 0.86 \\ &= 518.91W \end{aligned}$$

Οι μηχανικές απώλειες υπολογίζονται προσεγγιστικά από την εμπειρική σχέση:

$$P_{MHX} = 0.008 \cdot P_{ov} = 0.008 \cdot 15000W = 120W$$

Οι κατανεμημένες απώλειες υπολογίζονται και αυτές εμπειρικά από τη σχέση:

$$P_{KAT} = 0.01 \cdot P_{ov} = 0.01 \cdot 15000W = 150W$$

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 και παίρνει τιμές (1,6-1,8). Η παράμετρος G_{t1} είναι το

βάρος των δοντιών του πυρήνα (stator tooth weight) και υπολογίζεται από τη σχέση:

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

$$\Rightarrow G_{t1} = 7800 \cdot 36 \cdot 8.7365 \cdot 10^{-3} \cdot (22.86 + 1 + 0.5) \cdot 10^{-3} \cdot 0.186 \cdot 0.96 = 10.67 \text{kg}$$

$$p_{t1} = K_t \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1.3} \cdot B_{ts}^{1.7} \cdot G_{t1} = 1.7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1.3} \cdot 1.55^{1.7} \cdot 10.67 = 114.63 \text{W}$$

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:

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

$$\Rightarrow G_{y1} = 7800 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [0.24647^2 - (0.24647 - 2 \cdot 0.019875)^2] \cdot 0.186 \cdot 0.96 \Rightarrow G_{y1} = 19.695 \text{W}$$

Άρα οι απώλειες στον υπόλοιπο πυρήνα θα είναι:

$$p_{y1} = K_y \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1.3} \cdot B_{cs}^{1.7} \cdot G_{y1} = 1.7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1.3} \cdot 1.55^{1.7} \cdot 19.695 \text{W}$$

$$= 200.115 \text{W}$$

Οι συνολικές απώλειες σιδήρου θα είναι ίσες με:

$$P_{fe} = p_{t1} + p_{y1} = 114.63 + 200.115 = 314.745 \text{W}$$

Οι συνολικές απώλειες του κινητήρα θα είναι:

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

$$= 641.635 + 518.91 + 314.745 + 120 + 150 = 1745.29 \text{W}$$

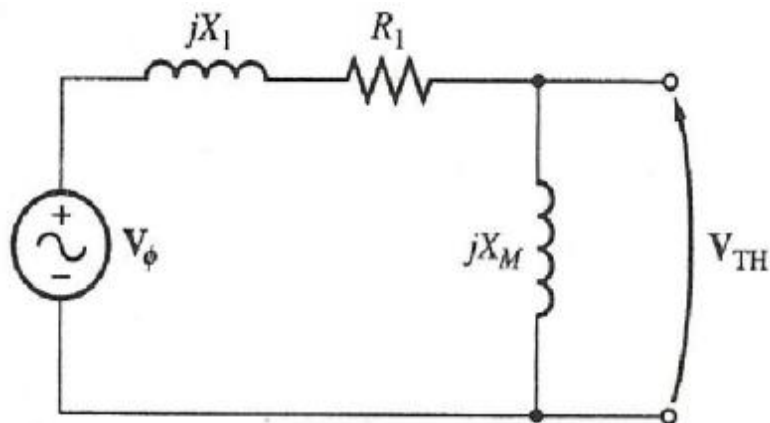
Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα θα είναι:

$$\eta = \frac{15000 \text{W}}{15000 + 1745.29} \cdot 100\% = 0.8957\%$$

3.5.1 Υπολογισμός V_{TH} και R_{TH}

Στην συνέχεια θα υπολογίσουμε την τάση Thevenin (V_{TH}) και την αντίσταση Thevenin (R_{TH}).

Αυτά τα στοιχεία θα πρέπει να υπολογιστούν για να μπορέσουμε να κατασκευάσουμε την χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα.



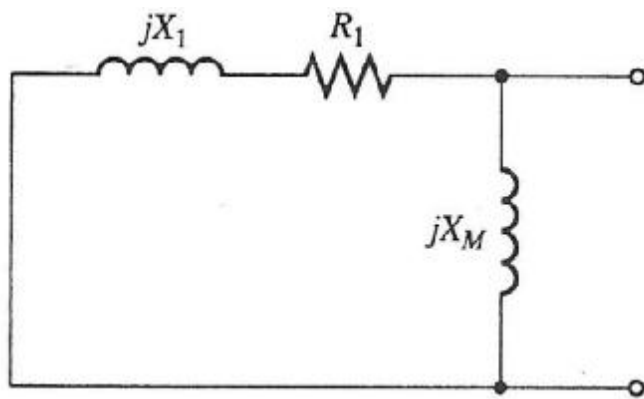
Εικόνα 33: Η ισοδύναμη τάση κατά Thevenin του κυκλώματος εισόδου ενός επαγωγικού κινητήρα.

Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται τα ανοικτά άκρα του κυκλώματος ως προς τα οποία υπολογίζεται η τάση Thevenin από την σχέση:

$$V_{TH} = V_{ph} \cdot \frac{X_m}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2}} = 400 \cdot \frac{86.02}{\sqrt{0.819^2 + (1.694 + 86.02)^2}} = 392.257\Omega$$

Η αντίσταση R_{TH} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R_{TH} = R_1 \cdot \left(\frac{X_m}{X_1 + X_m}\right)^2 = 0.819 \cdot \left(\frac{86.02}{1.694 + 86.02}\right)^2 = 0.7876\Omega$$



Εικόνα 34. Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση κατά Thevenin του κυκλώματος εισόδου.

3.6 Υπολογισμός χαρακτηριστικών λειτουργίας

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

$$I_0 = \frac{P_{fe} + P_{MHX} + 3 \cdot I_\mu^2 \cdot R_s}{3 \cdot V_{ph}} = \frac{799.153 + 360 + 3 \cdot 4.56^2 \cdot 0.819}{3 \cdot 400} = 1.0085A$$

Η ολίσθηση υπολογίζεται από την σχέση:

$$\begin{aligned} P_{Al} = s \cdot P_{AG} \rightarrow s &= \frac{P_{Al}}{P_{AG}} = \frac{P_{Al}}{P_{out} + P_{Al} + P_{KAT} + P_{MHX}} \\ &= \frac{518.91}{15000 + 518.91 + 120 + 150} = 0.0328 \end{aligned}$$

$$n_m = (1 - s) \cdot n_{sync} = (1 - 0.0328) \cdot 1500 = 1450.8 \text{ rpm}$$

Η ονομαστική ροπή είναι ίση με:

$$T_n = \frac{15000W}{2\pi \cdot \frac{50}{2} (1 - 0.0328)} = 98.78Nm$$

Η ροπή ανατροπής υπολογίζεται από την σχέση:

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

Όπου

$$C_1 = 1 + \frac{X_{sl}}{X_m} = 1 + \frac{1.694}{86.02} = 1.0197$$

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

$$\begin{aligned}
T_{bk} &= \frac{3 \cdot p_1}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2}{[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + C_1 \cdot X_2)^2}]^2} \\
&= \frac{3 \cdot 2}{2 \cdot 2\pi \cdot 50} \cdot \frac{400^2}{[0.819 + \sqrt{0.819^2 + (1.694 + 1.0197 \cdot 11.158)^2}]^2} \\
&= 109.845 Nm
\end{aligned}$$

Το ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα είναι ίσο με:

$$\begin{aligned}
I_{LR} &= \frac{V_{ph}}{\sqrt{(R_s + R_r)^2 + (X_{sl} + X_{rl})^2}} = \frac{400}{\sqrt{(0.819 + 0.86)^2 + (1.694 + 11.158)^2}} \\
&= 30.86 A
\end{aligned}$$

Η ροπή εκκίνησης είναι ίση με:

$$T_{LR} = \frac{3 \cdot I_{LR}^2 \cdot R_r}{\omega_s} \cdot p_i = \frac{3 \cdot (30.86)^2 \cdot 0.86}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cdot 2 = 15.65 Nm$$

Τέλος ο **συντελεστής ισχύος** της μηχανής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\cos\varphi = \frac{P_n}{3 \cdot V_{ph} \cdot I_n \cdot \eta} = \frac{15000}{3 \cdot 400 \cdot 16.16 \cdot 0.8957} = 0.8636$$

3.7 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας

Έχοντας υπολογίσει παραπάνω τις τιμές των αντιστάσεων και τις επαγωγικές αντιδράσεις του κινητήρα καθώς και την τάση με την αντίσταση κατά Thevenin, περνάμε στο τελευταίο κομμάτι της μελέτης όπου είναι η κατασκευή της χαρακτηριστικής λειτουργίας του κινητήρα.

Θα χρησιμοποιήσουμε για ταχύτητα $n_m=1471\text{rpm}$ (βλέπε παράρτημα).

Άρα θα πρέπει να υπολογίσουμε την επαγόμενη ροπή (τ_{ind}) για διάφορες τιμές της ολίσθησης, όπως και την ροπή ανατροπής (τ_{max}).

Ο τύπος της επαγόμενης ροπής είναι:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}}$$

Όπου P_{AG} είναι η ισχύς που διέρχεται από το κύκλωμα του στάτη στο κύκλωμα του δρομέα μέσω του διακένου και υπολογίζεται:

$$P_{AG} = \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{S}\right)}{\left(R_{TH} + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}$$

Οπότε

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

- Για $s=1$, $n_m=0$

$$\begin{aligned}\tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{S}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left[\left(R_{TH} + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \\ &= \frac{3 \cdot 392.257^2 \cdot \left(\frac{0.86}{1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[\left(0.7876 + \frac{0.86}{1}\right)^2 + (1.694 + 11.158)^2 \right]} \\ &= 15.06 Nm\end{aligned}$$

Αυτή είναι και η ροπή εκκίνησης.

- Για $s=0,9$ $n_m=150$ rpm

$$\begin{aligned}\tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{S}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left[\left(R_{TH} + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \\ &= \frac{3 \cdot 392.257^2 \cdot \left(\frac{0.86}{0.9}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[\left(0.7876 + \frac{0.86}{0.9}\right)^2 + (1.694 + 11.158)^2 \right]} \\ &= 16.7 Nm\end{aligned}$$

- Για $s=0,8$ $n_m=300$ rpm

$$\begin{aligned}\tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{S}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left[\left(R_{TH} + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \\ &= \frac{3 \cdot 392.257^2 \cdot \left(\frac{0.86}{0.8}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[\left(0.7876 + \frac{0.86}{0.8}\right)^2 + (1.694 + 11.158)^2 \right]} \\ &= 18.74 Nm\end{aligned}$$

- Γ_{1α} s=0,7 n_m=450rpm

$$\begin{aligned}\tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{S}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left[\left(R_{TH} + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \\ &= \frac{3 \cdot 392.257^2 \cdot \left(\frac{0.86}{0.7}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[\left(0.7876 + \frac{0.86}{0.7}\right)^2 + (1.694 + 11.158)^2 \right]} \\ &= 21.29Nm\end{aligned}$$

- Γ_{1α} s=0,6 n_m=600rpm

$$\begin{aligned}\tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{S}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left[\left(R_{TH} + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \\ &= \frac{3 \cdot 392.257^2 \cdot \left(\frac{0.86}{0.6}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[\left(0.7876 + \frac{0.86}{0.6}\right)^2 + (1.694 + 11.158)^2 \right]} \\ &= 24.77Nm\end{aligned}$$

- Γ_{1α} s=0,5 n_m=750rpm

$$\begin{aligned}\tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{S}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left[\left(R_{TH} + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \\ &= \frac{3 \cdot 392.257^2 \cdot \left(\frac{0.86}{0.5}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[\left(0.7876 + \frac{0.86}{0.5}\right)^2 + (1.694 + 11.158)^2 \right]} \\ &= 29.49Nm\end{aligned}$$

- Για $s=0,4$ $n_m=900$ rpm

$$\begin{aligned}\tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{S}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left[\left(R_{TH} + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \\ &= \frac{3 \cdot 392.257^2 \cdot \left(\frac{0.86}{0.4}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[\left(0.7876 + \frac{0.86}{0.4}\right)^2 + (1.694 + 11.158)^2 \right]} \\ &= 36.37Nm\end{aligned}$$

- Για $s=0,3$ $n_m=1050$ rpm

$$\begin{aligned}\tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{S}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left[\left(R_{TH} + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \\ &= \frac{3 \cdot 392.257^2 \cdot \left(\frac{0.86}{0.3}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[\left(0.7876 + \frac{0.86}{0.3}\right)^2 + (1.694 + 11.158)^2 \right]} \\ &= 47.21Nm\end{aligned}$$

- Για $s=0,2$ $n_m=1200$ rpm

$$\begin{aligned}\tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{S}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left[\left(R_{TH} + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \\ &= \frac{3 \cdot 392.257^2 \cdot \left(\frac{0.86}{0.2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[\left(0.7876 + \frac{0.86}{0.2}\right)^2 + (1.694 + 11.158)^2 \right]} \\ &= 66.17Nm\end{aligned}$$

- Για $s=0,1$ $n_m=1350rpm$

$$\begin{aligned}\tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s}\right)}{\omega_{sync} \cdot \left[\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \\ &= \frac{3 \cdot 392.257^2 \cdot \left(\frac{0.86}{0.1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[\left(0.7876 + \frac{0.86}{0.1}\right)^2 + (1.694 + 11.158)^2 \right]} \\ &= 99.82Nm\end{aligned}$$

Η ολίσθηση ανατροπής είναι:

$$s_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} = \frac{0.86}{\sqrt{0.7876^2 + (1.694 + 11.158)^2}} = 0.06679$$

$$\begin{aligned}n_m &= (1 - s) \cdot n_{sync} = (1 - 0.06679) \cdot 1500 \\ &= 1399.815rpm\end{aligned}$$

Η ροπή ανατροπής είναι:

$$\begin{aligned}\tau_{ind} &= \frac{3 \cdot V_{TH}^2}{2 \cdot \omega_{sync} \cdot \left[R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \right]} \\ &= \frac{3 \cdot 392.257^2}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1500}{60} \cdot \left[0.7876 + \sqrt{0.7876^2 + (1.694 + 11.158)^2} \right]} \\ &= 215.176Nm\end{aligned}$$

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τους υπολογισμούς της μελέτης παραθέτουμε τον παρακάτω συγκριτικό πίνακα

Προδιαγραφές αρχικού κινητήρα		Προδιαγραφές μελετηθέντος κινητήρα	
Συντελεστής ισχύος (cosφ)	0.847	Συντελεστής ισχύος (cosφ)	0.8635
Βαθμός απόδοσης (η)	0.91	Βαθμός απόδοσης (η)	0.9215
Ονομαστική ροπή T_n	97.43Nm	Ονομαστική ροπή T_n	98.78 Nm
Ροπή εκκίνησης T_{LR}	211.52Nm	Ροπή εκκίνησης T_{LR}	15.65 Nm
Ροπή ανατροπής T_{bk}	257Nm	Ροπή ανατροπής T_{bk}	109.845 Nm
Ολίσθηση (s)	1.933%	Ολίσθηση (s)	3.28%

Σε σχέση με τον αρχικό κινητήρα εντοπίζεται σημαντική διαφορά στη ροπή εκκίνησης, στη ροπή ανατροπής και στην ολίσθηση. Τόσο η ροπές όσο και η ολίσθηση εξαρτώνται από την αντίσταση του δρομέα, όπως φαίνεται από τους παρακάτω τύπους

Η ροπή εκκίνησης:

$$T_{LR} = \frac{3 \cdot I_{LR}^2 \cdot R_r}{\omega_s}$$

Και η ολίσθηση

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

$$\text{Με } P_{Al} = 3 \cdot I_{rn}^2 \cdot R_r$$

Η αντίσταση του δρομέα (R_r) υπολογίζεται από τη σχέση

$$R_2 = \frac{4 \cdot m}{N_r} \cdot (W_1 \cdot K_{w1})^2 \cdot R_{be}^{80}$$

Από την οποία φαίνεται πως η τιμή της R_r εξαρτάται από τα αυλάκια του δρομέα, τα οποία είχαν επιλεγεί $N_r=16$ ενώ στον αρχικό κινητήρα είχαν επιλεγεί $N_r=28$

Επιπλέον η ροπή ανατροπής δίνεται από τον τύπο

$$\begin{aligned}
 T_{bk} &= \frac{3 \cdot p_1}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2}{[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + C_1 \cdot X_2)^2}]^2} \\
 &= \frac{3 \cdot 2}{2 \cdot 2\pi \cdot 50} \cdot \frac{400^2}{[0.819 + \sqrt{0.819^2 + (1.694 + 1.0197 \cdot 11.158)^2}]^2} \\
 &= 109.845 Nm
 \end{aligned}$$

και εξαρτάται από την ανηγμένη στο στάτη επαγωγική αντίδραση του δρομέα

$$X_2 = 4 \cdot m \cdot \frac{(W_1 \cdot K_w)^2}{N_r} \cdot X_{be}$$

Η οποία όπως φαίνεται εξαρτάται από τα αυλάκια του δρομέα, τα οποία είχαν επιλεγεί $N_r=16$ ενώ στον αρχικό κινητήρα είχαν επιλεγεί $N_r=28$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- STEPHEN J. CHAPMAN «ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC», 3η ΕΚΔΟΣΗ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2003
- ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ, ΣΤΕΛΙΟΣ ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ
- § <http://www.rmsindustrial.com.au/weg-ssw07-soft-starter-110kw-200a-415v-3phase>
- § <http://elpaso.apogee.net/md/mfamen.asp>
- § http://hlektrologia.weebly.com/uploads/6/7/1/5/6715419/p209_284.pdf