

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριθμός 1532

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗ
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ
ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ
15kW**

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ: ΤΡΙΑΝΤΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ, Α.Μ.5909

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ-ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ ΙΟΥΝΙΟΣ 2016

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες τις σύγχρονες μηχανές και τις ασύγχρονες ή επαγωγικές μηχανές. Στις σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές το ρεύμα διέγερσης παράγεται από ανεξάρτητες πηγές συνεχούς ρεύματος. Αντίθετα στις ασύγχρονες το ρεύμα διέγερσης παράγεται επαγωγικά στους αγωγούς του δρομέα (αρχή λειτουργίας μετασχηματιστή). Για αυτόν ακριβώς τον λόγο οι ασύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές αναφέρονται συχνά και ως επαγωγικές. Οι ασύγχρονες μηχανές συναντώνται κυρίως ως ασύγχρονοι κινητήρες, με αποτέλεσμα να βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στις ηλεκτρικές κινήσεις, στις οποίες χρησιμοποιούνται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 80%.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το ακίνητο μέρος της επαγωγικής μηχανής είναι ο στάτης και το περιστρεφόμενο ο δρομέας. Κατασκευαστικά ο στάτης στην εσωτερική του περιφέρεια αποτελείται από αυλάκια στα οποία τοποθετούνται οι περιελίξεις. Ο δρομέας επίσης αποτελείται από περιελίξεις που τοποθετούνται στην εξωτερική του περιφέρεια.

Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες τις σύγχρονες μηχανές και τις ασύγχρονες ή επαγωγικές μηχανές. Στις σύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές το ρεύμα διέγερσης παράγεται από ανεξάρτητες πηγές συνεχούς ρεύματος. Αντίθετα στις ασύγχρονες το ρεύμα διέγερσης παράγεται επαγωγικά στους αγωγούς του δρομέα (αρχή λειτουργίας μετασχηματιστή). Για αυτόν ακριβώς τον λόγο οι ασύγχρονες ηλεκτρικές μηχανές αναφέρονται συχνά και ως επαγωγικές. Οι ασύγχρονες μηχανές συναντώνται κυρίως ως ασύγχρονοι κινητήρες, με αποτέλεσμα να βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στις ηλεκτρικές κινήσεις, στις οποίες χρησιμοποιούνται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 80%. Η υπό μελέτη μηχανή ανήκει στην κατηγορία των ασύγχρονων ή επαγωγικών μηχανών και για την ακρίβεια είναι ένας επαγωγικός κινητήρας.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία μελετάται ένας επαγωγικός κινητήρας τεσσάρων πόλων, ισχύος 15kW με 48 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

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	I
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	II
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	6
ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ	6
1.1. Γενικά περί ηλεκτρικών επαγωγικών μηχανών.....	6
1.2. Κατασκευαστική Στοιχεία των Επαγωγικών Μηχανών.....	6
1.3. Αρχή λειτουργίας.....	9
1.4. Απώλειες και διάγραμμα ροής ισχύος.....	10
1.5. Το Ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα.....	11
1.6. Χαρακτηριστική Ταχύτητας-Ροπής.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	15
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ	15
2.1. Κλάσεις των επαγωγικών κινητήρων.....	15
2.2. Έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων.....	15
2.3. Διατάξεις εκκίνησης τριφασικών κινητήρων.....	17
2.4. Ρύθμιση στροφών τριφασικών κινητήρων.....	19
2.5. Πέδηση τριφασικών κινητήρων.....	20
2.6. Συντήρηση τριφασικών κινητήρων.....	20
2.7. Πιθανές βλάβες τριφασικών κινητήρων.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	24
ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	24
3.1 Στοιχεία κινητήρα.....	24
3.2 Διαστασιολόγηση του κινητήρα.....	24
3.3 Τυλίγματα στάτη.....	28
3.4 Υπολογισμός διαστάσεων αυλακιών στάτη.....	34
3.5 Δρομέας.....	40
3.6 Υπολογισμός των διαστάσεων άξονα.....	43
3.7 Υπολογισμός Ρεύματος Μαγνήτισης.....	44
3.8 Αντιστάσεις και αντιδράσεις κινητήρα.....	48
3.9 Υπολογισμός Αντιδράσεων Κινητήρα.....	51
3.10 Απώλειες και βαθμός απόδοσης.....	56
3.11 Υπολογισμών των χαρακτηριστικών λειτουργίας.....	59
3.12 Συμπεράσματα.....	61

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ηλεκτρική μηχανή είναι η διάταξη που έχει τη δυνατότητα να μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική και αντίστροφα. Μια τέτοια διάταξη όταν χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική ονομάζεται γεννήτρια ενώ όταν χρησιμοποιείται για την αντίστροφη μετατροπή ονομάζεται κινητήρας.



Μια μηχανή η οποία έχει τη δυνατότητα να μετατρέπει ενέργεια και προς τις δύο κατευθύνσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως γεννήτρια είτε ως κινητήρας ανάλογα με τις ανάγκες του και την εφαρμογή για την οποία προορίζεται. Σχεδόν όλες οι υπάρχουσες γεννήτριες και κινητήρες μετατρέπουν ενέργεια από τη μια μορφή στην άλλη μέσω της δράσης ενός μαγνητικού πεδίου. Οι δύο παραπάνω κατηγορίες ηλεκτρικών μηχανών συναντώνται παντού στη σύγχρονη ζωή. Στο σύγχρονο σπίτι οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι το βασικό εξάρτημα των περισσότερων ηλεκτρικών συσκευών. Βρίσκονται στα ψυγεία, στους καταψύκτες, στα πλυντήρια, στα μίξερ, στα συστήματα κλιματισμού, στους ανεμιστήρες και άλλες παρεμφερείς οικιακές συσκευές. Στους χώρους εργασίας και τη βιομηχανική παραγωγή κινούν σχεδόν όλα τα εργαλεία. Τα τελευταία χρόνια διευρύνεται η χρήση τους σε ηλεκτρικά και υβριδικά αυτοκίνητα. Φυσικά οι γεννήτριες είναι απαραίτητες για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που κινεί τους παραπάνω κινητήρες.

Οι λόγοι για την ευρεία χρήση των ηλεκτρικών μηχανών είναι πάρα πολλοί. Η ηλεκτρική ενέργεια είναι μια καθαρή, αλλά και πολύ αποτελεσματική μορφή ενέργειας. Ένας ηλεκτροκινητήρας έχει μεγάλο βαθμό απόδοσης, δεν αποβάλλει καυσαέρια και δεν χρειάζεται συνεχή τροφοδοσία με καύσιμα όπως ένας κινητήρας εσωτερικής καύσεως, πράγμα που τον κάνει κατάλληλο για χώρους όπου τα καυσαέρια θα πρέπει να αποφευχθούν. Ακόμη η θερμότητα και η μηχανική ενέργεια

μετατρέπονται σε ηλεκτρική πολύ μακριά από την περιοχή της χρήσης τους . Η μεταφορά της ενέργειας γίνεται εύκολα με αγωγούς και έτσι μπορεί εύκολα και καθαρά να χρησιμοποιηθεί στο σπίτι, στο γραφείο και στο εργοστάσιο. Οι μετασχηματιστές βοηθούν στην όλη διαδικασία μειώνοντας της απώλειες ενέργειας ανάμεσα στα σημεία παραγωγής και κατανάλωσης της .

Η κατηγοριοποίηση των ηλεκτρικών μηχανών μπορεί να γίνει με βάση τη δομή και τη μέθοδο τροφοδοσίας του δρομέα τους. Βασικά είδη ηλεκτρικών μηχανών:

- Σύγχρονες Μηχανές
- Ασύγχρονες (ή Επαγωγικές) Μηχανές
- Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος

Ειδικές κατηγορίες ηλεκτρικών μηχανών:

- Universal κινητήρες
- Βηματικοί κινητήρες
- Πιεζοηλεκτρικοί κινητήρες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

1.1. Γενικά περί ηλεκτρικών επαγωγικών μηχανών

Οι ηλεκτρικές μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες: τις σύγχρονες μηχανές και τις ασύγχρονες μηχανές ή μηχανές επαγωγής. Το ρεύμα διέγερσης των σύγχρονων μηχανών παράγεται από ανεξάρτητες πηγές Σ.Ρ ενώ το ρεύμα διέγερσης των επαγωγικών μηχανών παράγεται επαγωγικά (αρχή λειτουργίας μετασχηματιστή) στα τυλίγματα διέγερσης τους. Αυτού του είδους οι μηχανές έλαβαν την ονομασία επαγωγικές λόγω του ότι η τάση στο δρομέα (που παράγει το ρεύμα διέγερσης και το πεδίο του δρομέα) ουσιαστικά επάγεται στο κύκλωμα διέγερσης αντί να προσφέρεται σε αυτό με κάποια ηλεκτρική σύνδεση.

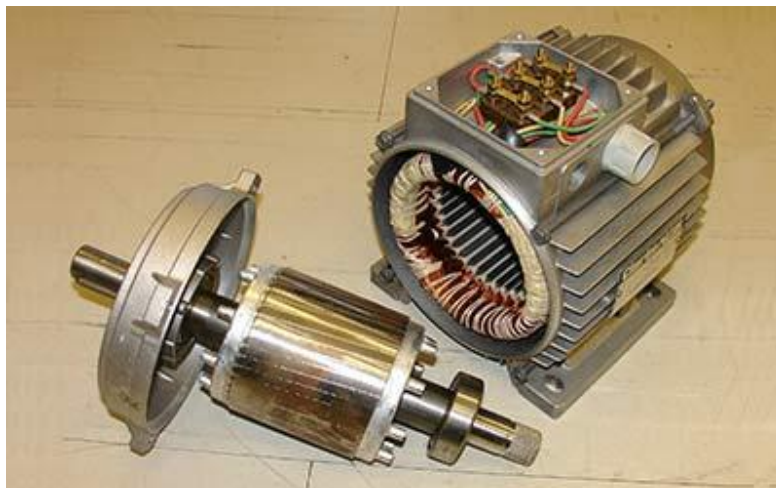
Η ουσιαστική διαφορά ενός επαγωγικού κινητήρα είναι το γεγονός ότι για να κινηθεί δεν είναι απαραίτητο να τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα διέγερσης. Η επαγωγική μηχανή μπορεί να λειτουργεί και σαν κινητήρας και σαν γεννήτρια. Όμως κατά τη λειτουργία της ως γεννήτρια παρατηρούνται πολλά μειονεκτήματα, πράγμα που την κάνει να χρησιμοποιείται σπάνια ως γεννήτρια. Συνέπεια τούτου είναι όλες οι επαγωγικές μηχανές να αναφέρονται ως επαγωγικοί κινητήρες.

1.2. Κατασκευαστική Στοιχεία των Επαγωγικών Μηχανών

Οι στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές είτε αυτές είναι γεννήτριες, είτε είναι κινητήρες έχουν μια ανάλογη δομή καθώς κατά βάση συνιστούν στρεφόμενα πηνία ειδικής κατασκευής και ποικίλου μεγέθους. Κατασκευάζονται με τυλίγματα απόσβεσης και ονομάζονται επαγωγικές μηχανές (induction machines). Αυτή η ονομασία οφείλεται στο γεγονός ότι μια επαγωγική μηχανή η τάση στο δρομέα (που παράγει το ρεύμα διέγερσης και το πεδίο του δρομέα) ουσιαστικά επάγεται στα τυλίγματά του, αντί να προσδίδεται σε αυτό με κάποια ηλεκτρική σύνδεση. Η ειδοποιός διαφορά ενός επαγωγικού κινητήρα είναι ότι για να κινηθεί δεν είναι απαραίτητο με συνεχές ρεύμα διέγερσης. Αν και η επαγωγική μηχανή μπορεί να λειτουργήσει και ως κινητήρας και ως γεννήτρια, τα μειονεκτήματα όταν λειτουργεί ως γεννήτρια είναι πολλά και έτσι σπάνια χρησιμοποιείται με αυτόν τον τρόπο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα όλες οι επαγωγικές μηχανές να αναφέρονται ως επαγωγικοί κινητήρες. Οι κινητήρες με τη σειρά τους παρά την αρκετά εκτεταμένη διάκρισή τους σε διάφορες κατηγορίες και υποκατηγορίες έχουν κάποια κοινά

στοιχεία δομής. Μια παραδοσιακή δομή των ηλεκτροκινητήρων παρουσιάζεται στην παρακάτω παράγραφο.

Οι ηλεκτροκινητήρες έχουν δύο μέλη, ένα σταθερό μέλος που λέγεται στάτης (stator) και ένα στρεφόμενο μέλος που λέγεται δρομέας (rotor). Επειδή θέλουμε να έχουμε μειωμένη τη μαγνητική αντίσταση των δρόμων της μαγνητικής ροής, οι πυρήνες του στάτη και του δρομέα κατασκευάζονται από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή μονωμένων μεταξύ τους ελασμάτων. Αυτό αποσκοπεί στην ελάττωση των απωλειών δινορρευμάτων. Κάνοντας μια γενική περιγραφή μπορούμε να πούμε πως ο δρομέας είναι βασικά ένας κύλινδρος και ο στάτης ένας κούφιος κύλινδρος. Ο δρομέας και ο στάτης χωρίζονται από ένα μικρό διάκενο αέρα. Το μήκος του διακένου αυτού είναι πολύ μικρό αν συγκριθεί με τη διάμετρο του δρομέα. Το τυλίγμα τυμπάνου βρίσκεται είτε στο στάτη, είτε στο δρομέα. Το μαγνητικό κύκλωμα συμπληρώνεται μέσα από το σιδηρομαγνητικό υλικό του άλλου κύριου μέλους της μηχανής. Στο μέλος αυτό τοποθετούνται τα πηνία διέγερσης ή τυλίγματα πεδίου που ενεργούν σαν κύριες πηγές μαγνητικής ροής. Στους κινητήρες επαγωγής η τοποθέτηση των τυλιγμάτων συνίσταται στην τοποθέτηση πηνίων σε ομοιόμορφα διανεμημένες αύλακες, τόσο στο στάτη όσο και στο δρομέα. Η απόσταση μεταξύ των πλευρών του πηνίου είναι συνήθως ίση με ένα απλό πολικό βήμα. Για να σχηματισθεί ένα πλήρες τυλίγμα τοποθετούνται όμοια πηνία σε άλλα ζευγάρια αυλακών και στη συνέχεια όλα τα πηνία συνδέονται μεταξύ τους σε ομάδες. Οι ομάδες των πηνίων μπορεί τότε να συνδεθούν σε σειρά ή παράλληλα και σε τριφασικές μηχανές κατ' αστέρα ή κατά τρίγωνο. Μερικά τυλίγματα είναι διπλού στρώματος. Σε τέτοια τυλίγματα κάθε αύλακα περιέχει δύο πλευρές πηνίου, μια στην κορυφή και μια στον πυθμένα της. Κάθε πηνίο έχει μια πλευρά σε πάνω μέρος και την άλλη σε κάτω μέρος αύλακας. Ένας τυπικός στάτης και δρομέας φαίνεται στη παρακάτω εικόνα.



Η περιέλιξη που βρίσκεται στα αυλάκια του δρομέα χαρακτηρίζει και το είδος της επαγωγικής μηχανής:

- Επαγωγική μηχανή με δρομέα βραχυκυκλωμένου κλωβού: Αποτελείται από μία σειρά αγώγιμων ράβδων που είναι τοποθετημένες σε αυλάκια της επιφάνειας του δρομέα και βραχυκυκλωμένες στα δύο άκρα τους μέσω μεγάλων δακτυλίων.



- Επαγωγική μηχανή με δακτυλιοφόρο δρομέα: Διαθέτει ολοκληρωμένο τριφασικό τυλίγμα όπου είναι τοποθετημένο ώστε να αποτελεί το κατοπτρικό είδωλο του τυλίγματος του στάτη. Οι τρεις φάσεις συνδέονται συνήθως σε αστέρα, ενώ τα άκρα των αγωγών συνδέονται σε δακτυλίους. Οι αγωγοί του δρομέα βραχυκυκλώνονται μέσω ψηκτρών που εφάπτονται στους δακτυλίους. Άρα τα ρεύματα του δακτυλιοφόρου δρομέα μπορούν να μετρηθούν στις ψήκτρες κι ακόμη είναι δυνατή η σύνδεση εξωτερικών αντιστάσεων στο κύκλωμα διέγερσης.



Λόγω της τελευταίας δυνατότητας είναι εφικτή η επεξεργασία της χαρακτηριστικής ροπής-ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα.

Τα μη ενεργά μέρη της μηχανής είναι το περίβλημα, ο άξονας, τα έδρανα, τα πλέγματα, ο ανεμιστήρας και άλλα εξαρτήματα στήριξης, στερέωσης και μόνωσης.

1.3. Αρχή λειτουργίας

Κατά τη λειτουργία μιας ηλεκτρικής μηχανής ως κινητήρας παρέχεται ηλεκτρική ενέργεια στο κύριο τύλιγμα της μηχανής, που λέγεται τύλιγμα τυμπάνου και αποδίδεται μηχανική ενέργεια εξόδου πάνω σε μια περιστρεφόμενη άτρακτο (δρομέας). Μια εξωτερικά επιβαλλόμενη ηλεκτρική τάση V οδηγεί ένα ρεύμα i μέσα στο τύλιγμα τυμπάνου ενάντια σε μια εσωτερικά επαγόμενη αντιηλεκτρεγερτική δύναμη e . Το τύλιγμα τυμπάνου γίνεται έτσι ικανό να απορροφά ηλεκτρική ενέργεια με ρυθμό $e \times i$. Το πεδίο ζεύξεως ασκεί μια στιγμιαία ηλεκτρομαγνητική ροπή $T_{πεδ}$ πάνω στο περιστρεφόμενο μέλος της μηχανής που λέγεται δρομέας (ρότορας). Αν ο δρομέας στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω , τότε η στιγμιαία ισχύς εξόδου που αποδίδεται στην άτρακτο θα είναι $T_{πεδ} \times \omega$. Η εξωτερικά εφαρμοζόμενη ροπή φορτίου $T_{εξ}$ δρα με φορά αντίστροφη από εκείνη της περιστροφής και καθιστά το φορτίο ικανό ν' απορροφά μηχανική ενέργεια. Ισχύει προφανώς ότι:

$$T_{πεδ} - T_{εξ} = J \times d\omega/dt$$

Όπου J είναι η ροπή αδρανείας του δρομέα και του μηχανικού του φορτίου (η κίνηση του οποίου είναι ο τελικός σκοπός της ύπαρξης του κινητήρα).

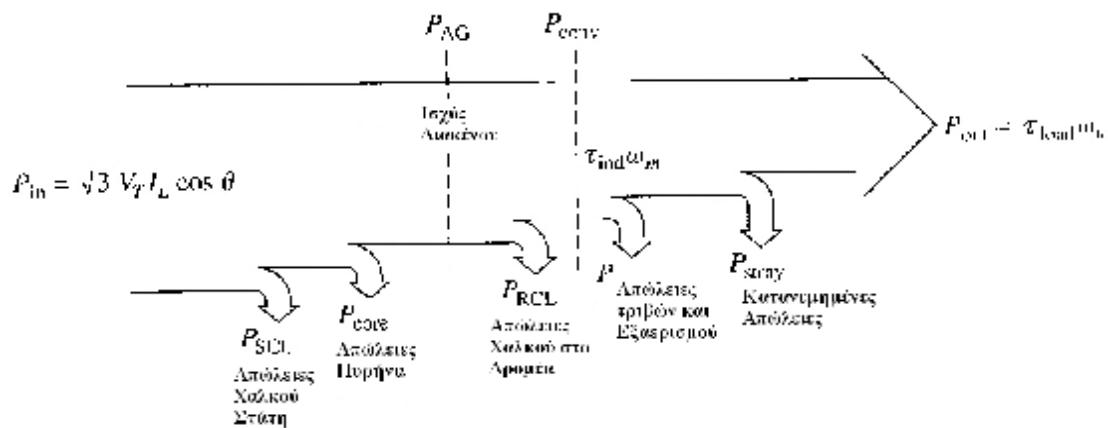
Όταν $T_{πεδ} = T_{εξ}$ τότε $d\omega/dt = 0$ και η μηχανή περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα. Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας έχουμε ότι:

$$(T_{πεδ} \times \omega) = (e \times i)$$

Κατά τη λειτουργία μιας ηλεκτρικής μηχανής σαν γεννήτριας παρέχεται ηλεκτρική ενέργεια στην άτρακτο της ηλεκτρικής μηχανής από μια πρωτεύουσα κινητήρια μηχανή (prime mover) και ηλεκτρική ενέργεια εξόδου είναι διαθέσιμη στους ακροδέκτες του τυλίγματος τυμπάνου. Η πρωτεύουσα κινητήρια μηχανή μπορεί να είναι για παράδειγμα, είτε ένας αμοστρόβιλος σ' ένα θερμικό σταθμό παραγωγής, είτε ένας υδροστρόβιλος σε έναν υδροηλεκτρικό σταθμό παραγωγής, είτε μια εμβολοφόρα μηχανή εσωτερικής καύσεως σ' ένα απομονωμένο ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος. Τέλος, κατά τη λειτουργία μιας ηλεκτρικής μηχανής σαν πέδης, η μηχανή τροφοδοτείται και με μηχανική και με ηλεκτρική ενέργεια. Η ολική ενέργεια εισόδου χάνεται μέσα στη μηχανή με μορφή απωλειών και έτσι η μηχανή λειτουργεί σαν πέδη και φρενάρι.

1.4. Απώλειες και διάγραμμα ροής ισχύος

Η σχέση ανάμεσα στην ηλεκτρική ισχύ εισόδου και στην μηχανική ισχύ εξόδου ενός επαγωγικού κινητήρα παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής ισχύος.



Απώλειες χαλκού στάτη $P_{SCL} = 3I_1^2 R_1$

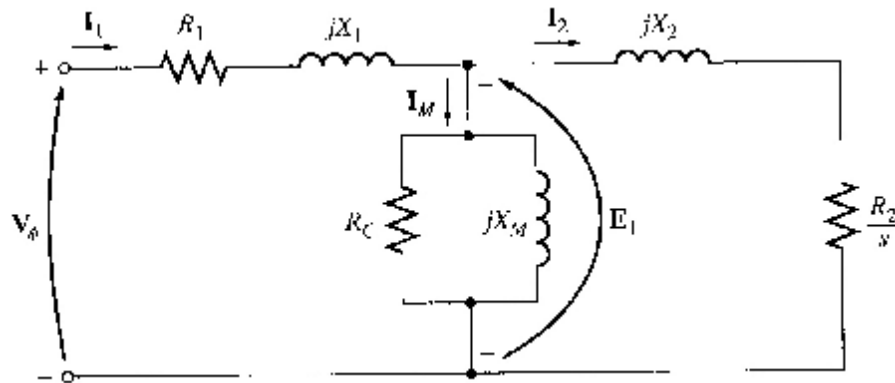
Απώλειες υστέρησης και δινορρευσμάτων	P_{core} (δίνονται)
Ισχύς διακένου	$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} - P_{core}$
Απώλειες χαλκού δρομέα	$P_{RCL} = 3I_2^2 R_2$ ή $P_{RCL} = sP_{AG}$
Μηχανική ισχύς	$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL}$ ή $P_{conv} = (1-s) \cdot P_{AG}$
Επαγόμενη ροπή	$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m}$ ή $\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}}$
Ροπή εξόδου ή ροπή φορτίου	$\tau_{out} = \frac{P_{out}}{\omega_m}$

Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα τόσο μεγαλύτερες είναι οι απώλειες τριβών, εξαερισμού και οι κατανεμημένες απώλειες. Από την άλλη, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του κινητήρα (πιο κοντά στην ns), τόσο λιγότερες είναι οι απώλειες πυρήνα. Δηλαδή όσο μικρότερη είναι η ολίσθηση, τόσο μικρότερη είναι η τιμή των απωλειών στο δρομέα της μηχανής. Στη περίπτωση που ο κινητήρας δεν περιστρέφεται, η ολίσθηση είναι $s=1$ και η ισχύς διακένου καταναλώνεται εξ ολοκλήρου στο κύκλωμα του δρομέα μιας και η ισχύς εξόδου είναι μηδενική.

1.5. Το Ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα

Η λειτουργία του κινητήρα βασίζεται στις τάσεις και στα ρεύματα που παράγονται εξ επαγωγής στο δρομέα και οφείλονται στο μαγνητικό πεδίο του στάτη. Επειδή κατά την παραγωγή των τάσεων και των ρευμάτων ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί εντελώς όμοια με έναν μετασχηματιστή, το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα μοιάζει αρκετά με αυτό του μετασχηματιστή. Ο επαγωγικός κινητήρας ονομάζεται και μηχανή απλής διέγερσης επειδή τροφοδοτείται με ισχύ μόνο από το κύκλωμα του στάτη. Επειδή ο επαγωγικός κινητήρας δεν διαθέτει ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης, στο ισοδύναμο κύκλωμά του δεν

υπάρχει εσωτερική πηγή τάσης, όμοια με την εσωτερική τάση E_a των σύγχρονων μηχανών.



R_1 : ωμική αντίσταση στάτη

R_2 : ωμική αντίσταση δρομέα

X_1 : αντίδραση διαρροής

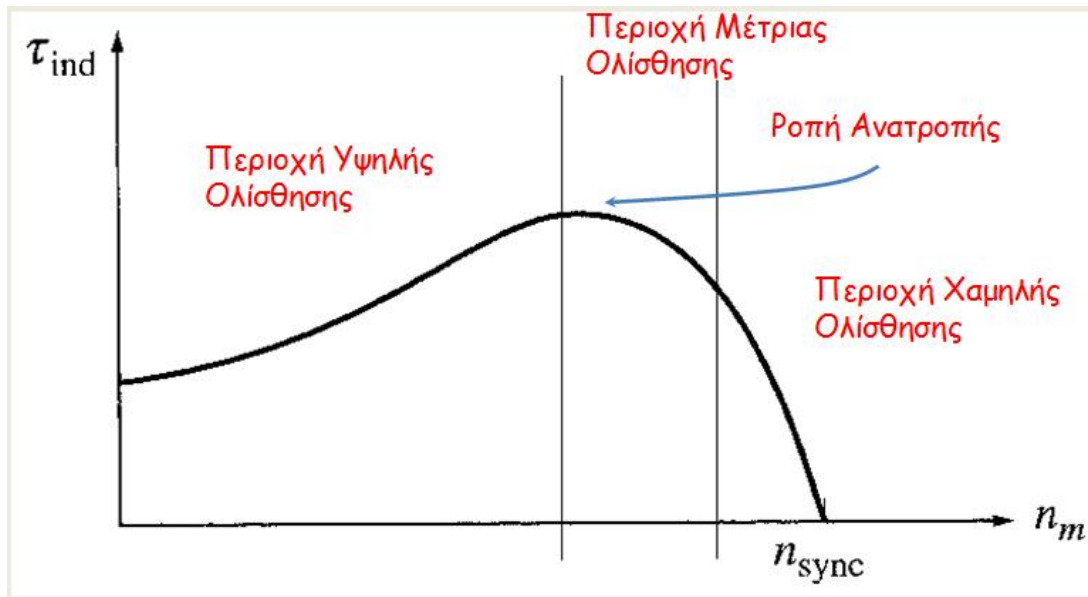
X_2 : επαγωγική αντίδραση δρομέα

R_c : απώλειες πυρήνα

X_M : αντίσταση μαγνήτισης

1.6. Χαρακτηριστική Ταχύτητας-Ροπής

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



Περιοχή χαμηλής ολίσθησης

Η ολίσθηση του κινητήρα αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με την αύξηση του φορτίου και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα μειώνεται σχεδόν γραμμικά με το φορτίο. Σε αυτή την περιοχή λειτουργίας η αντίδραση του δρομέα είναι αμελητέα και έτσι ο συντελεστής ισχύος του δρομέα είναι προσεγγιστικά μοναδιαίος, ενώ το ρεύμα δρομέα αυξάνεται γραμμικά με την ολίσθηση.

Περιοχή μέτριας ολίσθησης

Στην περιοχή αυτή η συχνότητα του δρομέα είναι υψηλότερη από ότι στην προηγούμενη περιοχή, ενώ το μέτρο της αντίδρασης του δρομέα είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την αντίστασή του. Το ρεύμα του δρομέα δεν αυξάνεται τόσο απότομα, όπως στην προηγούμενη περιοχή και ο συντελεστής ισχύος αρχίζει να μειώνεται. Ο κινητήρας αποκτά τη μέγιστη ροπή του (ροπή ανατροπής) στο σημείο όπου για μια σημαντική αύξηση του φορτίου η αύξηση του ρεύματος εξουδετερώνεται από τη μείωση του συντελεστή ισχύος στο δρομέα.

Περιοχή υψηλής ολίσθησης

Σε αυτή την περιοχή η επαγόμενη ροπή μειώνεται με την αύξηση του φορτίου, καθώς η αύξηση του ρεύματος στο δρομέα επικαλύπτεται από τη μείωση του συντελεστή ισχύος στο δρομέα.

Σχόλια για την καμπύλη ροπής ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων

- § Η επαγόμενη ροπή του ασύγχρονου κινητήρα είναι μηδέν στη σύγχρονη ταχύτητα.
- § Μεταξύ των σημείων λειτουργίας χωρίς φορτίο και υπό πλήρες φορτίο η καμπύλη ροπής ταχύτητας είναι σχεδόν γραμμική.
- § Υπάρχει μια μέγιστη επιτρεπτή ροπή που είναι αδύνατον να ξεπεραστεί και ονομάζεται ροπή ανατροπής.
- § Η ροπή εκκίνησης του κινητήρα είναι λίγο μεγαλύτερη από τη ροπή σε πλήρη φόρτιση.
- § Η ροπή του κινητήρα για συγκεκριμένη ολίσθηση μεταβάλλεται με το τετράγωνο της τάσης εισόδου.
- § Αν ο δρομέας του επαγωγικού κινητήρα περιστρέφεται με ταχύτητα μεγαλύτερη από τη σύγχρονη, η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια μετατρέποντας μηχανική ισχύ σε ηλεκτρική.
- § Αν αντιμεταθέσουμε δυο φάσεις, η φορά περιστροφής του στρεφόμενου Μ.Π. αντιστρέφεται και η επαγόμενη ροπή γίνεται αντίθετη προς τη φορά περιστροφής του δρομέα με αποτέλεσμα το απότομο σταμάτημα του κινητήρα (ακαριαία πέδηση).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

2.1. Κλάσεις των επαγωγικών κινητήρων

Οι κινητήρες με βραχυκυκλωμένο δρομέα χωρίζονται σε τέσσερις κλάσεις ανάλογα με τη συμπεριφορά τους κατά την εκκίνηση αλλά και κατά την κανονική τους λειτουργία.

Στην πρώτη κλάση, οι κινητήρες παρουσιάζουν κανονικό ρεύμα εκκίνησης και κανονική ροπή εκκίνησης. Το ρεύμα εκκίνησης είναι 5-8 φορές μεγαλύτερο του ονομαστικού, ενώ η μέγιστη ροπή είναι 2,5 φορές μεγαλύτερη της ονομαστικής και σε ταχύτητα μεγαλύτερη κατά 0,8 φορές της σύγχρονης ταχύτητας ns (στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου). Η ολίσθηση κυμαίνεται περίπου στο 0,2.

Στη δεύτερη κλάση, οι κινητήρες παρουσιάζουν ρεύμα εκκίνησης μειωμένο κατά 25% του ρεύματος εκκίνησης της πρώτης κλάσης. Η ροπή εκκίνησης είναι ίδια με αυτήν της πρώτης κλάσης. Η ολίσθηση είναι μικρή.

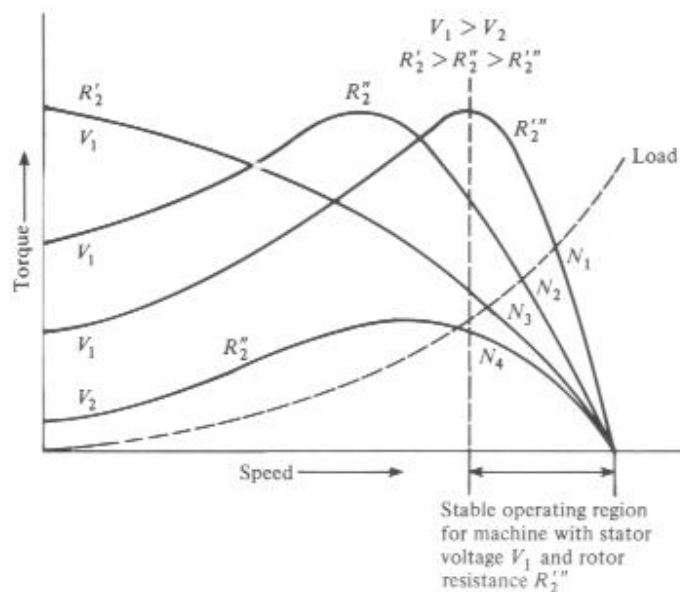
Στην τρίτη κλάση, οι κινητήρες παρουσιάζουν ακόμη πιο μικρό ρεύμα εκκίνησης και ακόμη πιο μεγάλη ροπή εκκίνησης. Η ολίσθηση είναι μεγάλη. Λόγω της μεγάλης τους ροπής, χρησιμοποιούνται για την οδήγηση φορτίων με ισχύ που κυμαίνεται από 10PS έως 300PS.

Στην τέταρτη κλάση, οι κινητήρες παρουσιάζουν αρκετά χαμηλό ρεύμα εκκίνησης και πολύ μεγάλη ροπή εκκίνησης. Η ροπή είναι πάνω από τρεις φορές μεγαλύτερη της ονομαστικής και αποδίδεται σε χαμηλές ταχύτητες. Η ολίσθηση κυμαίνεται από 0,5 έως 0,11.

2.2. Έλεγχος της ταχύτητας των επαγωγικών κινητήρων

Οι κινητήρες επαγωγής εξαιτίας της απλότητάς τους βρίσκουν πολλές εφαρμογές. Παρόλα αυτά έχουν το μειονέκτημα, σε αντίθεση με του dc κινητήρες, ότι η ταχύτητα με την οποία στρέφονται δεν μπορεί να μεταβάλλεται επαρκώς σε ένα μεγάλο εύρος τιμών, για διάφορες καταστάσεις λειτουργίας. Στην παρούσα παράγραφο θα γίνει μια αναφορά στους δυνατούς τρόπους ελέγχου των στροφών επαγωγικών κινητήρων.

- Μέθοδος αλλαγής του αριθμού των πόλων: Σε αυτή την μέθοδο τα τυλίγματα του στάτορα είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε αλλάζοντας τις συνδέσεις στα διάφορα πηνία, οι άκρες των οποίων βρίσκονται έξω από τον κινητήρα, μπορούμε να αλλάζουμε τον αριθμό των πόλων με ένα ρυθμό 2:1. Αυτό έχει ως συνέπεια δύο διαφορετικές σύγχρονες ταχύτητες.
- Μέθοδος μεταβολής της συχνότητας: Γνωρίζουμε πως η σύγχρονη ταχύτητα είναι ανάλογη της συχνότητας. Επομένως αν είναι δυνατόν να μεταβάλλουμε την συχνότητα τροφοδοσίας της τάσης, τότε αλλάζουμε και την σύγχρονη ταχύτητα του κινητήρα. Παράλληλα όμως, η μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή είναι αντιστρόφως ανάλογη της σύγχρονης ταχύτητας. Επομένως αν επιθυμούμε (σχεδόν) σταθερή μέγιστη ροπή, θα πρέπει να αυξάνουμε ταυτόχρονα και την τάση και την συχνότητα τροφοδοσίας για να πετύχουμε τελικά αύξηση των στροφών
- Μέθοδος μεταβολής της ολίσθησης: Η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής σε κινητήρα επαγωγής μπορεί να γίνει κατανοητή με το παρακάτω σχήμα



Έλεγχος στροφών με αλλαγή της ολίσθησης

Η διακεκομμένη καμπύλη δείχνει την χαρακτηριστική στροφών-ροπής του φορτίου. Η συνεχόμενες καμπύλες είναι οι χαρακτηριστικές στροφών-ροπής του κινητήρα για διάφορες συνθήκες λειτουργίας, όπως

είναι διαφορετικές αντιστάσεις ρότορα R_2', R_2'', R_2''' και διαφορετικές τάσεις στάτορα V_1, V_2 . Άρα, αφού έχουμε 4 διαφορετικές καμπύλες στροφών-ροπής, ο κινητήρας μπορεί να δουλέψει σε οποιαδήποτε από τις τέσσερις ταχύτητες N_1, N_2, N_3, N_4 . Πρέπει να σημειώσουμε πως ευσταθές σημείο λειτουργίας είναι δεξιά του σημείου μέγιστης ροπής. Στην πράξη η ολίσθηση μπορεί να μεταβληθεί με μία από τις παρακάτω μεθόδους:

- **Μεταβολή της τάσης του στάτορα:** Αφού η αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης, μπορούμε να έχουμε διαφορετικές καμπύλες στροφών-ροπής για διαφορετικές τάσεις τροφοδοσίας. Επομένως για δεδομένη αντίσταση ρότορα (π.χ. R_2') έχουμε δύο διαφορετικές καμπύλες λειτουργίας, για δύο διαφορετικές τάσεις τροφοδοσίας, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Επομένως ο κινητήρας μπορεί να σε N2 ή N4 στροφές. Ο αριθμός των στροφών μπορεί να μεταβάλλεται συνεχώς, εάν υπάρχει δυνατότητα συνεχούς μεταβολής της τάσης τροφοδοσίας. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή σε κινητήρες τύπου κλωβού και τυλίγματος δρομέα με δακτυλίους.
- **Μεταβολή της αντίστασης ρότορα:** Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε κινητήρες τυλιγμένου δρομέα με δακτυλίους. Η επίδραση της εισαγωγής εξωτερικών αντιστάσεων φαίνεται στο προηγούμενο σχήμα. Για το δεδομένο φορτίο υπάρχουν 3 ευσταθείς καταστάσεις λειτουργίας. Με συνεχή μεταβολή των εξωτερικών αντιστάσεων πετυχαίνουμε συνεχή μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα.

2.3. Διατάξεις εκκίνησης τριφασικών κινητήρων

Όσον αφορά τις μεθόδους εκκίνησης ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα, διακρίνουμε τις εξής:

- **Με απευθείας εκκίνηση** σε κινητήρες μικρής ισχύος μέχρι 1,5PS. Το ρεύμα εκκίνησης είναι έξι φορές μεγαλύτερο του ονομαστικού με αποτέλεσμα να έχω πτώση τάσης στο δίκτυο. Η ροπή εκκίνησης είναι μιάμιση φορά μεγαλύτερη της ονομαστικής. Η εκκίνηση του κινητήρα μπορεί να γίνει και με φορτίο.
- **Εκκίνηση με διακόπτη αστέρα – τριγώνου**, χειροκίνητο ή αυτόματο. Κατά την εκκίνηση, τα τυλίγματα των τριών φάσεων στο στάτη συνδέονται σε διάταξη αστέρα. Το κάθε τύλιγμα τροφοδοτείται με τη φασική τάση 220V του δικτύου, πετυχαίνοντας έτσι μικρότερο ρεύμα εκκίνησης. Όταν ο κινητήρας φτάσει σε κάποιο οριακό αριθμό στροφών, αρχίζει και τροφοδοτείται με τη πολική τάση 380V του δικτύου, λόγω της αλλαγής της σύνδεσης των τυλιγμάτων των φάσεων από διάταξη αστέρα σε διάταξη τριγώνου. Αποδεικνύεται ότι το ρεύμα

εκκίνησης στη διάταξη αστέρα είναι τρεις φορές μικρότερο από αυτό στη διάταξη τριγώνου.

- **Εκκίνηση με τη χρήση αντιστάσεων** στη γραμμή τροφοδοσίας των τυλιγμάτων των τριών φάσεων στο στάτη. Η εκκίνηση του κινητήρα γίνεται με μειωμένη τάση άρα και μειωμένη ένταση του ρεύματος. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του κινητήρα, αρχίζουμε και μειώνουμε την ωμική τιμή των αντιστάσεων και μόλις ο κινητήρας φτάσει στην ονομαστική του ταχύτητα, οι αντιστάσεις τίθενται εκτός δικτύου. Το ρεύμα εκκίνησης είναι 4,5 φορές μεγαλύτερο του ονομαστικού, ενώ η ροπή εκκίνησης είναι 0,75 φορές μεγαλύτερη της ονομαστικής.
- **Εκκίνηση με τη χρήση ενός αυτομετασχηματιστή.** Ο κινητήρας τροφοδοτείται αρχικά με μειωμένη τάση. Όταν ο κινητήρας φτάσει στο 80% της ονομαστικής του ταχύτητας, ο αυτομετασχηματιστής τίθεται εκτός τάσης δικτύου και η τροφοδοσία του κινητήρα γίνεται απευθείας από το δίκτυο. Το ρεύμα εκκίνησης είναι 3,5 φορές μεγαλύτερο του ονομαστικού, ενώ η ροπή εκκίνησης είναι 0,8 φορές μεγαλύτερη της ονομαστικής.
- **Εκκίνηση με τη χρήση ενός ηλεκτρονικού εκκινητή.** Ανάλογα με τη ροπή του φορτίου, ρυθμίζουμε τη τάση τροφοδοσίας του κινητήρα, πετυχαίνοντας ικανοποιητικό ρεύμα εκκίνησης και ικανοποιητική ροπή εκκίνησης. Το ρεύμα εκκίνησης μπορεί να κυμανθεί από δύο έως πέντε φορές μεγαλύτερο του ονομαστικού, ενώ η ροπή εκκίνησης μπορεί να κυμανθεί έως και μία φορά μεγαλύτερη της ονομαστικής. Ο εκκινητής διαθέτει έναν μικροεπεξεργαστή, ο οποίος ελέγχει και βελτιώνει διαρκώς κάποιες βασικές παραμέτρους του εκκινητή και του κινητήρα όπως είναι η ρύθμιση του χρόνου εκκίνησης και σταματήματος του κινητήρα, η επιτήρηση της τάσης του δικτύου, η υπερθέρμανση του κινητήρα, το ρεύμα του κινητήρα, ο έλεγχος των σφαλμάτων.

2.4. Ρύθμιση στροφών τριφασικών κινητήρων

Όσον αφορά τη ρύθμιση των στροφών του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα, αυτή μπορεί να επιτευχθεί με δύο βασικούς τρόπους:

- **Με την αλλαγή των αριθμού των ζευγών των μαγνητικών πόλων.** Αυτή μπορεί να επιτευχθεί με τρεις τρόπους:
 - Με την μέθοδο των διαδοχικών πόλων κατά την οποία ο αριθμός των μαγνητικών πόλων διπλασιάζεται, εάν αλλάξουμε τη συνδεσμολογία στα τυλίγματα διέγερσης. Εδώ πετυχαίνουμε το πολύ δύο ταχύτητες λειτουργίας του κινητήρα.
 - Με τη χρήση πολλαπλών τυλιγμάτων στο στάτη. Με τη αυτή τη μέθοδο πετυχαίνουμε ενδιάμεσες ταχύτητες. Ο συνδυασμός αυτής της μεθόδου και της προηγούμενης μπορεί να μας δώσει μέχρι και τέσσερις ταχύτητες λειτουργίας σε έναν κινητήρα. Δυστυχώς τα πολλαπλά τυλίγματα στο στάτη αυξάνουν το κόστος του κινητήρα και χρησιμοποιούνται μόνο αν είναι τελείως απαραίτητα
- **Με τη μεταβολή της συχνότητας της τάσης τροφοδοσίας του κινητήρα.** Μεταβάλλοντας τη συχνότητα, μεταβάλλουμε τη ταχύτητα περιστροφής του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη (σύγχρονη ταχύτητα n_s). Εν συνεχεία, προκαλείται μετατόπιση της καμπύλης ροπής – στροφών του κινητήρα. Αλλάζοντας έτσι το σημείο λειτουργίας του, μεταβάλλονται οι στρόφες του. Βέβαια, όταν μεταβάλλουμε τη συχνότητα, θα πρέπει να μεταβάλλουμε και τη τάση τροφοδοσίας του κινητήρα, έτσι ώστε να μην αυξάνεται το ρεύμα, όταν μειώνουμε τη συχνότητα.

Για τη συνεχή μεταβολή της συχνότητας χρησιμοποιείται ο **ηλεκτρονικός ρυθμιστής στροφών**. Τα μέρη από τα οποία αποτελείται είναι η μονάδα ελέγχου, η ανορθωτική διάταξη, το φίλτρο εξομάλυνσης και ο αντιστροφέας (inverter). Η ανορθωτική διάταξη μετατρέπει το AC σε DC, ενώ ο αντιστροφέας το DC σε AC μεταβλητής συχνότητας και πλάτους.

2.5. Πέδηση τριφασικών κινητήρων

Όσον αφορά τη πέδηση του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα, αυτή μπορεί να επιτευχθεί με τους εξής τρόπους:

- **Με μηχανική πέδηση**, που πραγματοποιείται με τη χρήση ειδικών σιαγόνων. Εδώ απαιτείται μεγάλος χρόνος πέδησης και ο φθορές του συστήματος είναι συχνές.
- **Με ελεύθερη πέδηση**, κατά την οποία διακόπτεται η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα, επιτρέποντάς του να σταματήσει από μόνος του μετά από αρκετό χρονικό διάστημα, δίχως όμως να υφίσταται καταπονήσεις.
- **Με ομαλή πέδηση**, κατά την οποία διακόπτεται η τάση τροφοδοσίας του κινητήρα βαθμιαία και όχι απότομα. Εδώ η χρήση ράμπας επιβράδυνσης είναι απαραίτητη για τη προοδευτική μείωση της τάσης, την ελεγχόμενη πέδηση με μείωση των μηχανικών κτυπημάτων αλλά και την ομαλή επιβράδυνση με βάση το προκαθορισμένο χρόνο.
- **Με δυναμική πέδηση**, κατά την οποία όταν διακόπτεται η τροφοδοσία του κινητήρα από το τριφασικό δίκτυο, τροφοδοτείται στη συνέχεια από άλλη πηγή με DC ρεύμα. Στη πράξη, ο ασύγχρονος κινητήρας μετατρέπεται σε σύγχρονη γεννήτρια (εναλλακτήρας), με αποτέλεσμα όλη η ενέργεια της πέδησης να απορροφάται από το δρομέα του κινητήρα.
- **Με αντιστροφή της φοράς του μαγνητικού πεδίου**. Εδώ, εάν αντιμετωπίσουμε τις δύο από τις τρεις φάσεις που τροφοδοτούν τα τυλίγματα του στάτη, τότε το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο αρχίζει και περιστρέφεται με αντίθετη φορά, αναγκάζοντας το δρομέα να περιστραφεί και αυτός με αντίθετη φορά, λειτουργώντας κατά αυτόν τον τρόπο ως ηλεκτρομαγνητικό φρένο.

2.6. Συντήρηση τριφασικών κινητήρων

Όσον αφορά τη συντήρηση του κινητήρα, αυτή περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- Έλεγχος στα έδρανα για τυχόν εμφάνιση σκουριάς , έλλειψης γράσου ή ακόμη και φθοράς αυτών.
- Έλεγχος για τυχόν εμφάνιση σκουριάς πάνω στον ίδιο τον κινητήρα, από τον οποίο θα πρέπει να αφαιρείται άμεσα.
- Έλεγχος στη γείωση του κινητήρα.

- Έλεγχος για τυχόν υγρασία πάνω στα τυλίγματα του στάτη. Στη περίπτωση της μη αποδεκτής υγρασίας, πρέπει να ακολουθείται η διαδικασία στεγνώματος του κινητήρα.
- Έλεγχος στη σωστή ευθυγράμμιση μεταξύ του άξονα του κινητήρα και του άξονα της οδηγούμενης μηχανής. Μειώνουμε κατά αυτόν τον τρόπο τους κραδασμούς ή τις πιέσεις στον άξονα, κατά τη διάρκεια της εκκίνησης ή της κανονικής λειτουργίας του κινητήρα.
- Έλεγχος στη ζυγοστάθμιση της τροχαλίας που είναι εφαρμοσμένη πάνω στον άξονα του κινητήρα. Στη περίπτωση που έχουμε κίνηση με ιμάντα ελέγχουμε το τέντωμα του ιμάντα.
- Έλεγχος για πιθανή ύπαρξη σκόνης ή ξένων σωμάτων εντός του κινητήρα.
- Έλεγχος στην αντίσταση της μόνωσης των τυλιγμάτων του στάτη με τη χρήση του οργάνου Μέγγερ, αλλά και στην αντίσταση που θα πρέπει να υπάρχει μεταξύ τυλιγμάτων και γης.
- Έλεγχος στη σύσφιξη των ακροδεκτών των αγωγών πάνω στο ακροκιβώτιο, όπου καταλήγουν τα έξι άκρα των τυλιγμάτων του στάτη.
- Έλεγχος στα καλύμματα (καπάκια) του κινητήρα αλλά και στον εξαερισμό του χώρου στον οποίο είναι εγκατεστημένος ο κινητήρας.
- Έλεγχος στη ταχύτητα κραδασμών του κινητήρα. Η ταχύτητα κραδασμών στη σύγχρονη ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 4,5mm/sec.
- Έλεγχος στη θερμοκρασία των διαφόρων τμημάτων του κινητήρα, όπως είναι τα τυλίγματα και τα έδρανα, κατά τη διάρκεια της εκκίνησης αλλά και της κανονικής λειτουργίας του κινητήρα.
- Καθαρισμός των καναλιών αερισμού του κινητήρα, αλλά και του πλέγματος του καλύμματος του ανεμιστήρα ψύξης.

2.7. Πιθανές βλάβες τριφασικών κινητήρων

Όσον αφορά τις πιθανές βλάβες που μπορούν να εμφανιστούν σε έναν ασύγχρονο τριφασικό κινητήρα, αυτές είναι οι ακόλουθες:

- **Ο κινητήρας δεν ξεκινάει ούτε εν κενώ, ούτε με φορτίο.** Σε αυτήν τη περίπτωση ελέγχουμε:
 - α) Εάν οι ακροδέκτες τροφοδοτούνται με τη τάση του δικτύου.
 - β) Εάν η τάση τροφοδοσίας του δικτύου είναι μικρότερη από την ονομαστική.
 - γ) Εάν μία από τις φάσεις του τριφασικού τυλίγματος του στάτη είναι κομμένη.

δ) Εάν η ροπή του φορτίου είναι μεγαλύτερη από τη ροπή εκκίνησης του κινητήρα.

Στην πρώτη περίπτωση, προβαίνουμε σε έλεγχο του αυτόματου διακόπτη αλλά και των αγωγών τροφοδοσίας και αποκαθιστούμε το πρόβλημα.

Στη δεύτερη περίπτωση, θα πρέπει να επαναφέρουμε τη τάση στην ονομαστική της τιμή.

Στην τρίτη περίπτωση, θα πρέπει πρώτα να βεβαιωθούμε, κάνοντας χρήση του οργάνου Μέγγερ και έπειτα να αντικαταστήσουμε τη κομμένη φάση.

Στην τέταρτη περίπτωση, θα πρέπει να ελέγξουμε και να διορθώσουμε το φορτίο.

- **Ο κινητήρας παρουσιάζει δύσκολη εκκίνηση, συνοδευόμενη από μεγάλο βύθισμα ταχύτητας.** Σε αυτήν τη περίπτωση οι μπάρες του επαγωγικού τυλίγματος του δρομέα έχουν κοπεί ή αποκολληθεί από τα δακτυλίδια βραχυκύκλωσης. Θα πρέπει ασφαλώς να γίνει έλεγχος και διόρθωση του σφάλματος.
- **Ο κινητήρας παρουσιάζει δύσκολη εκκίνηση, συνοδευόμενη από θόρυβο και υπερθέρμανση.** Σε αυτήν τη περίπτωση μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι τα έδρανα(ρουλεμάν) πάνω στα οποία στηρίζεται και περιστρέφεται ο άξονας του κινητήρα, είναι φθαρμένα. Θα πρέπει να αντικατασταθούν άμεσα.
- **Ο κινητήρας εκκινεί κανονικά, αλλά στη συνέχεια παρουσιάζει μεγάλη πτώση στον αριθμό των στροφών του.** Σε αυτήν τη περίπτωση, μετράω πολύ χαμηλή τη τάση τροφοδοσίας του δικτύου, επάνω στους ακροδέκτες του κινητήρα, λόγω της εμφάνισης μεγάλης πτώσης τάσης επάνω στα καλώδια τροφοδοσίας του κινητήρα. Θα πρέπει να τα αντικαταστήσω άμεσα.
- **Ο κινητήρας υπερθερμαίνεται.** Σε αυτήν τη περίπτωση η υπερθέρμανση του κινητήρα μπορεί να οφείλεται είτε στη πολύ υψηλή τάση τροφοδοσίας του κινητήρα, προκαλώντας απώλειες σιδήρου ή χαλκού, είτε στην αύξηση του φορτίου που οδηγεί ο κινητήρας(υπερφόρτωση του κινητήρα). Γι' αυτούς τους λόγους θα πρέπει, είτε να επαναφέρουμε τη τάση τροφοδοσίας στην ονομαστική της τιμή, είτε να ελέγξουμε και να ρυθμίσουμε το φορτίο του κινητήρα. Όμως, ο βασικότερος λόγος για τον οποίο ο κινητήρας πάντοτε υπερθερμαίνεται, είναι η απουσία της μιας εκ των τριών φάσεων τροφοδοσίας του κινητήρα. Αυτό συνήθως σημαίνει, καμένη ασφάλεια στη γραμμή παροχής αυτής της φάσης. Θα πρέπει να την αντικαταστήσουμε άμεσα. Τέλος, η υπερθέρμανση του κινητήρα θα μπορούσε να οφείλεται ακόμη και στον ελλειπή αερισμό (ψύξη) του κινητήρα ή στο υπερβολικό τέντωμα του ιμάντα της τροχαλίας (εάν υπάρχει). Σε καμία περίπτωση, βέβαια, δεν δικαιολογείται το να προκαλέσει ο ίδιος ο

ηλεκτρολόγος εγκαταστάτης, υπερθέρμανση στον κινητήρα λόγω λανθασμένης συνδεσμολογίας πάνω στο ακροκιβώτιο

- **Ο στάτης υπερθερμαίνεται σε ορισμένα του σημεία** και η υπερθέρμανση αυτή συνοδεύεται από υπερφόρτιση σε μία εκ των δύο φάσεων, προκαλώντας δυνατό θόρυβο. Στη περίπτωση αυτή, έχουμε εσωτερικό βραχυκύκλωμα στο τύλιγμα του στάτη. Θα πρέπει να αντικατασταθεί άμεσα.
- **Όταν ο κινητήρας λειτουργεί, ακούγεται θόρυβος και ο κινητήρας υπερθερμαίνεται αρκετά**, λόγω της τριβής του δρομέα επάνω στο στάτη. Στη περίπτωση αυτή, το διάκενο μεταξύ στάτη και δρομέα δεν είναι ομοιόμορφο. Παρουσιάζονται ρωγμές είτε στα ρουλεμάν του άξονα του δρομέα, είτε στα καλύμματα του κινητήρα ή ακόμη και κάποια κλίση στον ίδιο τον άξονα. Αυτά, θα πρέπει να αντικατασταθούν και να ρυθμιστούν άμεσα.
- **Ο κινητήρας παρουσιάζει κραδασμούς κατά τη διάρκεια λειτουργίας του.** Σε αυτήν τη περίπτωση, συνήθως, υπάρχει εσφαλμένη ευθυγράμμιση του άξονα του δρομέα, λόγω κακής στήριξης ή ανώμαλης επιφάνειας του εδάφους. Θα πρέπει γίνει σωστή στερέωση της βάσης. Επίσης, οι κραδασμοί είναι δυνατόν να προέρχονται από τη μηχανή(φορτίο) που οδηγεί ο κινητήρας. Αυτό αποδεικνύεται έμπρακτα, εάν αποδεσμεύσουμε το φορτίο από τον άξονα του κινητήρα. Εάν παραμένει το πρόβλημα, θα πρέπει να ελέγξουμε το φορτίο.
- **Τα ρουλεμάν υπερθερμαίνονται.** Σε περίπτωση που υπάρχει αρκετό γράσο, αυτό θα πρέπει να αφαιρείται. Εάν η βαλβίδα λιπαντικού δεν λειτουργεί σωστά και τα έδρανα έχουν υποστεί φθορά, θα πρέπει άμεσα να αντικατασταθούν. Σε περίπτωση που το λιπαντικό είναι βρώμικο ή στα ρουλεμάν έχει εισχωρήσει σκόνη ή ξένο σώμα, θα πρέπει να προβούμε σε καθαρισμό αυτών. Τέλος, εάν ο ιμάντας της τροχαλίας είναι πολύ σφιγμένος ή το φορτίο που ο οδηγεί ο κινητήρας δεν είναι καλά κεντραρισμένο, θα πρέπει να προβούμε σε άμεση ρύθμιση αυτών.
- **Πρόβλημα στον ηλεκτρονικό ρυθμιστή στροφών**, λόγω υψηλής αδράνειας ή μεγάλου φορτίου στον άξονα του κινητήρα. Σε αυτήν τη περίπτωση μπορούμε είτε να μειώσουμε το φορτίο είτε να αντικαταστήσουμε τον ρυθμιστή στροφών με έναν μεγαλύτερο. Βέβαια, σε περίπτωση που ενεργοποιείται κατά την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση του κινητήρα, το σύστημα προστασίας ,θα πρέπει να γίνει έλεγχος για τυχόν βραχυκύκλωμα στην έξοδο. Αντιθέτως εάν το σύστημα προστασίας ενεργοποιείται κατά την ομαλή λειτουργία του ρυθμιστή, θα πρέπει να μειώσουμε το φορτίο στον άξονα του κινητήρα ή το μήκος των καλωδίων εξόδου. Δεν αποκλείεται, βέβαια, να έχει υποστεί βλάβη και η βαθμίδα ανόρθωσης του ίδιου του ρυθμιστή στροφών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

3.1 Στοιχεία κινητήρα

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

ΟΛΙΣΘΗΣΗ: 1,933%

ΚΛΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ: B

3.2 Διαστασιολόγηση του κινητήρα

Η εσωτερική διάμετρος του στάτη D_{IS} δίνεται από τον τύπο:

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

όπου

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

με

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

Όπου f συχνότητα λειτουργίας, λ ο λόγος του μήκους του πυρήνα προς το πολικό βήμα, p_i το ζεύγος των πόλων και C_o η σταθερά Esson

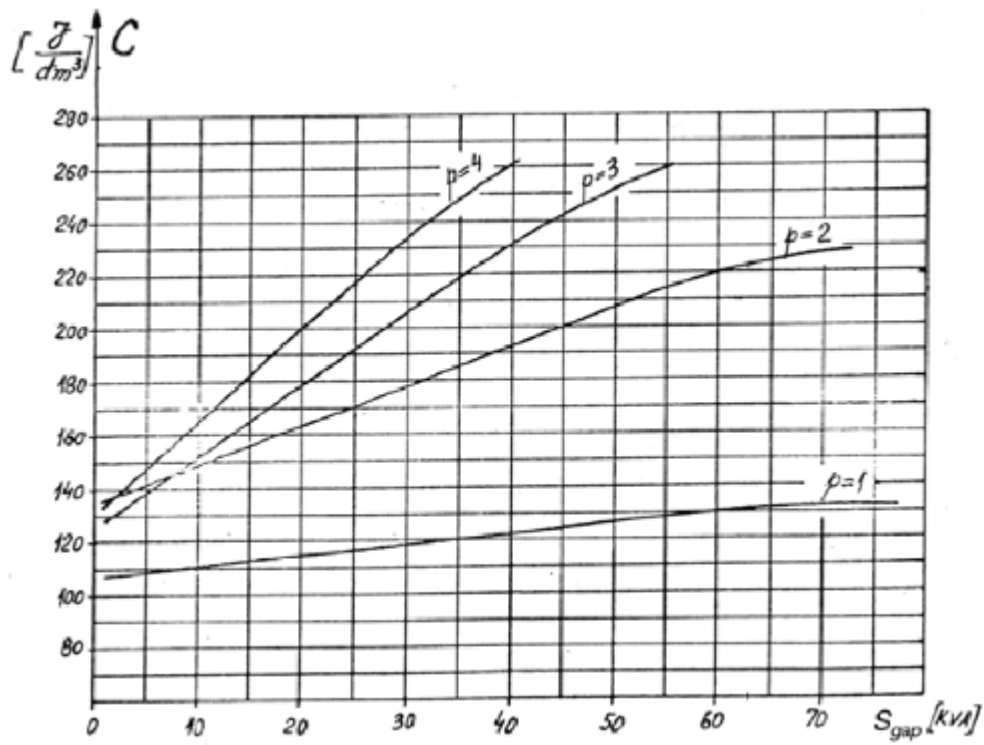
Ο λόγος του μήκους του πυρήνα προς το πολικό βήμα, είναι ανάλογο με τον αριθμό των πόλων και δίνεται από τον παρακάτω πίνακα

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

$$S_{gap} = \frac{K_E \cdot P_n}{\eta_N \cdot \cos\varphi} = \frac{0.97 \cdot 15000}{0.91 \cdot 0.847} = \mathbf{18877.22667VA}$$

Η σταθερά Esson (C_o) λαμβάνεται από την (figure 1). Στην πραγματικότητα η σταθερά Esson δεν είναι σταθερή, εφόσον το φορτίο ρεύματος στάτη (A1) και η πυκνότητα ροής διακένου (Bg) αυξάνουν με την ροπή της μηχανής και τον αριθμό των πόλων.

Για $S_{gap} = \mathbf{18877.22667VA}$, το $C_o = 160 \cdot 10^3 \text{ J/m}^3$ και λ είναι ίσο με 1.5



$$D_{IS} = \sqrt[3]{\frac{2p_i}{\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{p_i}{f} \cdot \frac{S_{gap}}{C_0}} \Rightarrow D_{IS} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 2}{\pi \cdot 1.5} \cdot \frac{2}{50} \cdot \frac{18877.22667}{160 \cdot 10^3}} = 0.1588m$$

$$= 15.88cm$$

Το πολικό βήμα είναι ίσο με

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{IS}}{2 \cdot p_i} = \frac{3.14 \cdot 0.1588m}{2 \cdot 2} = 0.1247m = 12.47cm$$

Το βήμα των αυλακιών είναι

$$\tau_s = \frac{\tau}{3q} = \frac{0.1247}{3 \cdot 4} = 10.39 \cdot 10^{-3} m$$

όπου q είναι ο αριθμός των αυλακιών ανά πόλο και ανά φάση. Εδώ λαμβάνουμε q ίσο με 4.

Το μήκος του πυρήνα θα υπολογιστεί από την σχέση:

$$\lambda = \frac{L}{\tau} \rightarrow L = \lambda \cdot \tau = 1.5 \cdot 12.47 \rightarrow L = 18.705 \text{ cm} = 0.18705 \text{ m}$$

Για κινητήρες μικρότερους από 100 kW, ο λόγος D_{is}/D_{out} είναι ίσος με K_D . Το K_D εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων και δίνεται από τον πίνακα

$2p_1$	2	4	6	8
$\frac{D_{is}}{D_{out}}$	0.54 0.58	0.61 0.63	0.68 0.71	0.72 0.74

Για p_1 ίσο με 2, το K_D παίρνει τις τιμές από 0,61 έως 0,63. Λαμβάνουμε την ενδιάμεση τιμή 0.62. Άρα η εξωτερική διάμετρος πυρήνα είναι:

$$\frac{D_{is}}{D_{out}} = 0.62 \rightarrow D_{out} = \frac{D_{is}}{0.62} = \frac{15.88}{0.62} = 25.61 \text{ cm}$$

Το διάκενο λαμβάνεται από τους εξής τύπους:

$$g = (0.1 + 0.02 \cdot \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3} \text{ m for } 2p_1 = 2$$

$$g = (0.1 + 0.012 \cdot \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3} \text{ m for } 2p_1 \geq 2$$

Για p_1 ίσο με 2, το διάκενο είναι:

$$g = (0.1 + 0.012 \cdot \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3} \text{ m} = (0.1 + 0.012 \cdot \sqrt[3]{15000}) \cdot 10^{-3} = 0.395 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Οι τυπικές τιμές διακένου είναι 0.3, 0.35, 0.4, 0.45 mm. Άρα το διάκενο του κινητήρα θα είναι 0,4 mm. Ένα πολύ μικρό διάκενο προκαλεί αύξηση αρμονικών στο πεδίο διακένου και πρόσθεση απωλειών ενώ για πολύ μεγάλο διάκενο επέρχεται μείωση του συντελεστή ισχύος και της απόδοσης

3.3 Τυλίγματα στάτη

Στην αρχή θα γίνει υπολογισμός του αριθμού των αυλακιών του στάτη. Για τον υπολογισμό θα χρησιμοποιείται ο τύπος:

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

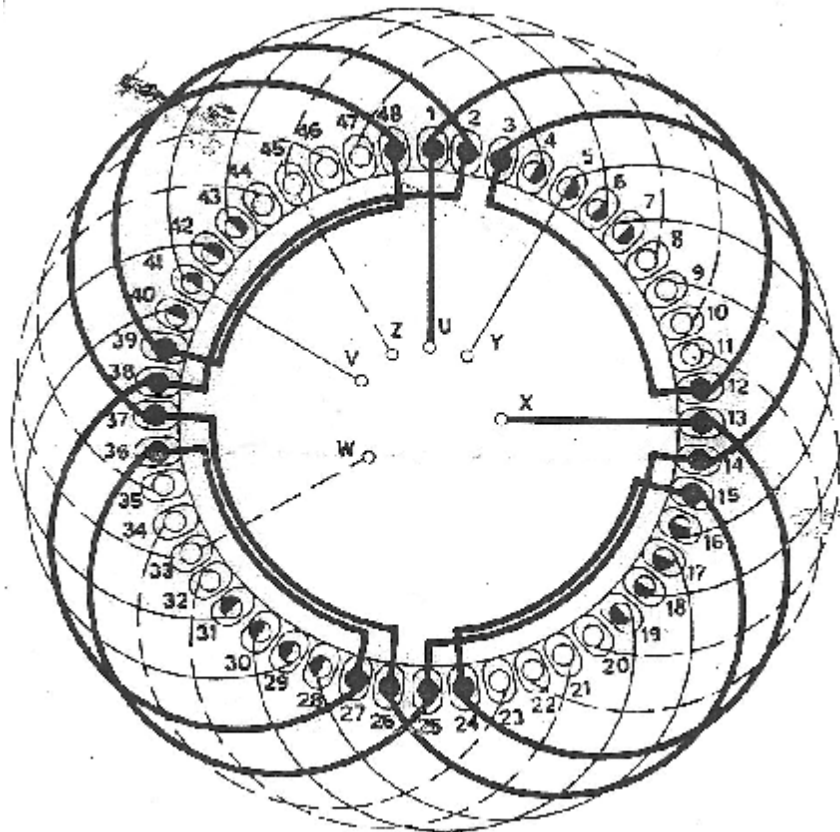
όπου m ο αριθμός των φάσεων

$$N_s = 2 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 3 = 48 \text{ αυλάκια}$$

Το πολικό βήμα του κινητήρα είναι:

$$y_p = \frac{48}{2 \cdot 3} = 8 \text{ αυλάκια}$$

Θα φτιαχτεί ένα τυλίγμα με μια στρώση (1 μάτσο ανά αυλάκι), με δυο πραγματικούς και δυο φανταστικούς πόλους το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Οι ηλεκτρικές μοίρες ανάμεσα σε δύο διαδοχικά αυλάκια είναι:

$$\alpha = \frac{2 \cdot p_1 \cdot \pi}{N_s} = \frac{2 \cdot 2 \cdot \pi}{48} = \frac{\pi}{12} = 15$$

Ο συντελεστής ζώνης δίνεται από την σχέση:

$$K_\tau = \frac{\sin \frac{q \cdot \alpha}{2}}{q \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin \frac{4 \cdot 15}{2}}{4 \cdot \sin \frac{15}{2}} = 0.958$$

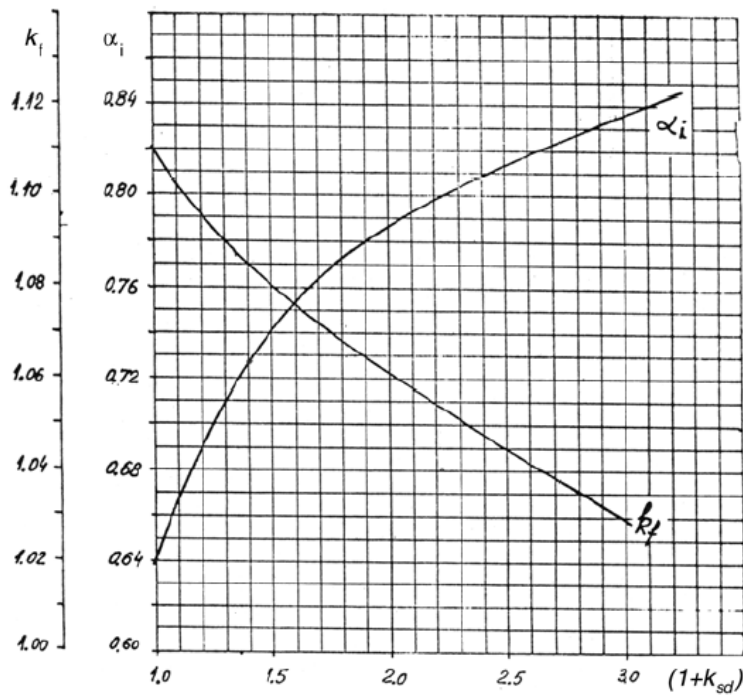
Επειδή χρησιμοποιείται στρώμα ενός επιπέδου ο συντελεστής κουρδίσματος είναι ίσος με 1 ($K_y=1$). Ο συντελεστής τυλίγματος δίνεται από τον τύπο:

$$K_W = K_T = K_q K_y = 0.958 \cdot 1 = 0.958$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο αριθμός σπειρών ανά φάση. Ο υπολογισμός βασίζεται στην μαγνητική ροή που περνά από τον στάτη στο δρομέα.

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

όπου τ το πολικό βήμα σε μέτρα, L το μήκος του πυρήνα του στάτη, B_g η πυκνότητα ροής στο διάκενο. Η σταθερά a_i ονομάζεται flux density shape factor, εξαρτάται από την μαγνητικό κορεσμό στα δόντια και προσδιορίζεται από την παρακάτω γραφική παράσταση:



Η σταθερά α_i εξαρτάται από τον συντελεστή $1+K_{sd}$ που ονομάζεται tooth saturation factor. ,

Η σταθερά K_f ονομάζεται form factor και εξαρτάται από τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του υλικού του πυρήνα.

Θεωρώντας το $K_{sd}=0.8$ το α_i θα γίνει ίσο με 0.77 και το K_f είναι ίσο με 1,062

Η πυκνότητα ροής διακένου B_g εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων:

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

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

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

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

Οπότε το B_g θα παίρνει τις τιμές από 0,65 έως 0,78 T. Επιλέγεται το $B_g=0.70$.

$$\varphi = \alpha_i \cdot \tau \cdot L \cdot B_g = 0.77 \cdot 0.1247 \cdot 0.18705 \cdot 0.70 = 12.57 \cdot 10^{-3} Wb$$

Στην συνέχεια, υπολογίζουμε τον αριθμό σπειρών ανά φάση:

$$W_1 = \frac{K_E \cdot V_\varphi}{4 \cdot K_f \cdot K_\tau \cdot f \cdot \varphi} = \frac{0.97 \cdot 400}{4 \cdot 1.062 \cdot 0.958 \cdot 50 \cdot 12,57 \cdot 10^{-3}}$$

$$= 150.8445 \text{ σπειρες} / \text{φάση}$$

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε τον αριθμό αγωγών ανά αυλάκι:

$$n_s = \frac{a_1 \cdot W_1}{p_1 \cdot q} = \frac{1 \cdot 150.8445}{2 \cdot 4} = 18.855 \approx 19 \text{ αγωγοί} / \text{αυλάκι}$$

Το a_1 είναι ο αριθμός των παράλληλων αγωγών. Επιλέχθηκε για αρχή το a_1 ίσο με 1. Με αυτή την επιλογή θεωρείται ότι τα πηνία σε κάθε φάση συνδέονται σε σειρά. Συνεπώς οι στροφές ανά φάση θα είναι

$$W_1 = \frac{p_1 \cdot q \cdot n_s}{a_1} = \frac{2 \cdot 4 \cdot 19}{1} = 152$$

Για τον υπολογισμό της διατομής των αγωγών θα χρειαστεί να προσδιοριστεί το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα, επίσης εξαρτάται από την πυκνότητα ρεύματος (J_{cos}).

Η πυκνότητα ρεύματος παίρνει τις τιμές $J_{cos}(3.5-15) \text{ A/mm}^2$ και εξαρτάται από σύστημα ψύξης, service duty cycle και από την στοχευμένη απόδοση. Η υψηλή απόδοση χαρακτηρίζεται από μικρή πυκνότητα ρεύματος $J_{cos} (3.5 - 6) \text{ A/mm}^2$.

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

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

Το ονομαστικό ρεύμα είναι ίσο με :

$$I_{ov} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot V_\pi \cdot \cos\varphi \cdot \eta \cdot \sqrt{3}} = \frac{15000W}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.847 \cdot 0.91 \cdot \sqrt{3}} = 16.2175A$$

Για 4 πόλους η πυκνότητα ρεύματος που θα χρησιμοποιηθεί θα παίρνει τις τιμές $(4-7) \text{ A/mm}^2$. Για $J_{cos} = 5 \text{ A/mm}^2$ η διατομή του αγωγού στον στάτη A_{co} θα είναι:

$$A_{co} = \frac{I_{ov}}{J_{cos} \cdot a_1} = \frac{16.2175}{5 \cdot 1} = 3.2435 \text{mm}^2$$

Με διάμετρο ίση με:

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

Όπου a_p είναι οι παράλληλοι αγωγοί. Για αρχή θα δεν θα χρησιμοποιηθούν παράλληλοι αγωγοί.

Γενικά αν η διάμετρος του αγωγού σε μικρούς κινητήρες είναι μεγαλύτερη από 1,3 ($d_{co} > 1,3$), θα πρέπει να αυξηθεί ο αριθμός των παράλληλων αγωγών. Επομένως θα χρησιμοποιηθούν 3 παράλληλοι αγωγοί για να επιτευχθεί αποδεκτή τιμή.

$$d_{cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{co}}{a_p \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3.2435}{3 \cdot \pi}} = 1.1735 \approx 1.2 \text{mm}$$

Μετά θα πρέπει να επιλεγεί διατομή αγωγού από τον παρακάτω πίνακα. Η διατομή είναι ίση με 1.20mm

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

3.4 Υπολογισμός διαστάσεων αυλακιών στάτη

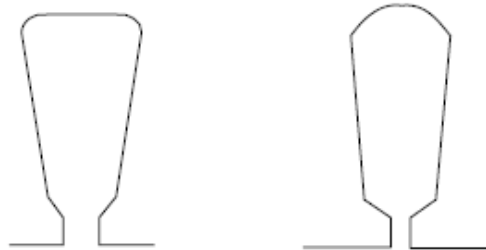
Ο υπολογισμός του n_s και της διαμέτρου των αγωγών θα βοηθήσει στον υπολογισμό της απαιτούμενης διατομής των αυλακιών του στάτη:

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

Όπου K_{fill} είναι μια σταθερά (fill factor), η οποία εξαρτάται από το πάχος της μόνωσης που χρησιμοποιούμε και για τον συγκεκριμένο κινητήρα ισχύος 15kW θα επιλεχθεί η τιμή 0,44.

$$A_{su} = \frac{\pi \cdot d_{cu}^2 \cdot a_i \cdot n_s}{4 \cdot K_{fill}} = \frac{\pi \cdot 1.20^2 \cdot 3 \cdot 19}{4 \cdot 0.44} = 146.438mm^2$$

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



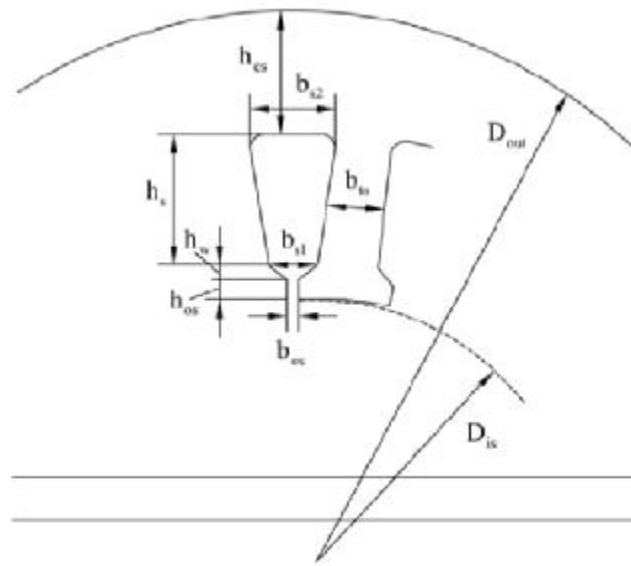
Σχήμα : Συννηθισμένη μορφή αυλακιών του στάτη.

Το επόμενο σχήμα απεικονίζει αναλυτικά τις διαστάσεις που θα πρέπει να υπολογιστούν. Κάποιες από τις διαστάσεις αυτές υπολογίζονται εμπειρικά. Πιο συγκεκριμένα:

$b_{os}=2-3mm$, επιλέγουμε 2.5mm.

$h_{os}=0.5-1mm$, επιλέγουμε 0.7mm.

$h_w=1-4mm$, επιλέγουμε 1mm.



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

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

Το $K_{Fe}=0,96$ για ελάσματα 0,5mm , λαμβάνει υπόψη του την επίδραση στην μόνωση των ελασμάτων.

Το B_{ts} είναι η μαγνητική πυκνότητα των δοντιών στάτη, οι τιμές που παίρνει δίνονται από τον πίνακα

	Flux density B/T			
	Asynchronous machines	Salient-pole synchronous machines	Nonsalient-pole synchronous machines	DC machines
Air gap	0.7–0.90 ($\hat{B}_{\delta 1}$)	0.85–1.05 ($\hat{B}_{\delta 1}$)	0.8–1.05 ($\hat{B}_{\delta 1}$)	0.6–1.1 (B_{max})
Stator yoke	1.4–1.7 (2)	1.0–1.5	1.1–1.5	1.1–1.5
Tooth	1.4–2.1 (stator)	1.6–2.0	1.5–2.0	1.6–2.0
(apparent maximum value)	1.5–2.2 (rotor)			(compensating winding) 1.8–2.2 (armature winding)
Rotor yoke	1–1.6 (1.9)	1.0–1.5	1.3–1.6	1.0–1.5
Pole core	—	1.3–1.8	1.1–1.7	1.2–1.7
Commutating poles	—	—	—	1.3

Το b_{ts} είναι το πλάτος δοντιών του στάτη.

Οπότε για $B_{ts} = 1,7$ το b_{ts} γίνεται:

$$b_{ts} = \frac{B_g \cdot \tau_s}{B_{ts} \cdot K_{Fe}} = \frac{0.70 \cdot 10.39 \cdot 10^{-3}}{1.7 \cdot 0.96} = 4.456 \cdot 10^{-3} m$$

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

Από την γεωμετρία του αυλακιού προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} b_{s1} &= \frac{\pi \cdot (D_{is} + 2h_{os} + 2h_w)}{N_s} - b_{ts} \\ &= \frac{\pi \cdot (158.8 + 2 \cdot 0.7 + 2 \cdot 1) \cdot 10^{-3}}{48} - 4.456 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow b_{s1} = 6.155 \cdot 10^{-3} m = 6.155 mm$$

Επίσης:

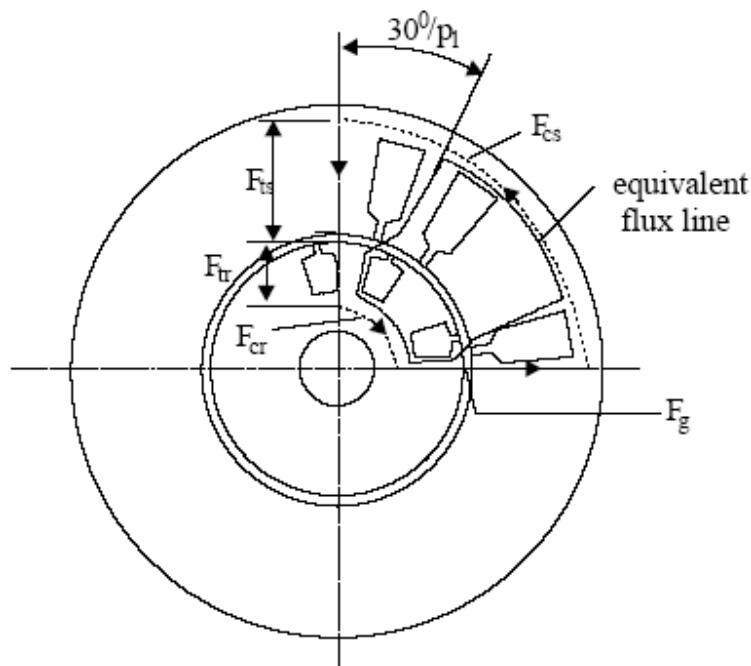
$$b_{s2} = \sqrt{4 \cdot A_{su} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{N_s}\right) + b_{s1}^2} = \sqrt{4 \cdot 146.438 \cdot \tan\left(\frac{\pi}{48}\right) + 6.155^2} mm = 8.733 mm$$

$$A_{su} = h_s \cdot \frac{(b_{s1} + b_{s2})}{2} \rightarrow h_s = \frac{2 \cdot A_{su}}{(b_{s1} + b_{s2})} \rightarrow h_s = \frac{2 \cdot 146.438}{(6.155 + 8.733)} = 19.67 mm$$

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



Η μαγνητεγερτική δύναμη στο διάκενο δίνεται από την σχέση:

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

μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα στο κενό, και είναι ίσο με $1.256 \cdot 10^{-6}$

K_C ονομάζεται Carter coefficient. Θα θεωρηθεί το K_C ίσο με 1.2, τότε η mmf διακένου θα είναι:

$$F_{mg} = K_C \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0} = 1.2 \cdot 0.4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0.70}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 267.515At$$

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.

Η μεταβλητή H_{ts} είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Από την καμπύλη μαγνήτισης για B_{ts} θα εξαχθεί η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου σε σχέση με την μαγνητική πυκνότητα για τυπικό επαγωγικό κινητήρα με ελάσματα.

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

Για $B_{ts}=1.7T$ προκύπτει $H_{ts}=4800At$.

Άρα:

$$F_{mts} = H_{ts}(h_s + h_{os} + h_w) = 4800 \cdot (19.67 + 0.7 + 1) \cdot 10^{-3} = 102.576At$$

Η μαγνητεγερτική δύναμη στον δρομέα υπολογίζεται από την σχέση:

$$F_{mtr} = K_{st} \cdot F_{mg} - F_{mts} = 0.8 \cdot 267.515At - 102.576 = 111.436At$$

Η διαφορά του F_{mts} και F_{mtr} είναι πολύ μικρή, άρα η τιμή που θεωρήθηκε για το K_{st} είναι σωστή. Αν το $F_{mtr} \ll F_{mts}$ τότε θα πρέπει να θεωρηθεί μικρότερη B_g για δεδομένο $1+K_{st}$ και να ξανά υπολογιστεί η μαγνητική ροή (Φ).

Στην συνέχεια θα υπολογιστεί η μαγνητική πυκνότητα πίσω πυρήνα (Back core flux density). Υπολογίζεται από την σχέση:

$$B_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot h_{cs}}$$

$$h_{cs} = \frac{D_{out} - (D_{IS} + 2 \cdot (h_{os} + h_w + h_s))}{2} = \frac{256.1 - (158.8 + 2 \cdot (0.5 + 1 + 19.67))}{2}$$

$$\rightarrow h_{cs} = \frac{251.6 - 201.54}{2} \rightarrow h_{cs} = 25.03mm$$

Συνεπώς η B_{cs} είναι:

$$B_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot h_{cs}} = \frac{12.57 \cdot 10^{-3}Wb}{2 \cdot 0.18705m \cdot 25.03 \cdot 10^{-3}m} = 1.34T$$

Η τιμή του B_{cs} είναι μικρή. Για να είναι επιτρεπτό το B_{cs} θα πρέπει να πάρει τιμές από 1.4 έως 1.7. Για να επιλυθεί το πρόβλημα παρουσιάζονται τρεις δυνατότητες:

1. Να μειωθεί το μήκος του πίσω πυρήνα, όπου με την σειρά της θα μειωθεί η εξωτερική διάμετρος του κινητήρα.
2. Να εισαχθεί μια μικρότερη τιμή για τον συντελεστή λ (stack aspect ratio) κάτι που θα οδηγήσει σε μικρότερη εσωτερική διάμετρο του στάτη άρα και σε μικρότερο δρομέα.
3. Να αυξηθεί περισσότερο το h_s δηλαδή να μειωθεί η διατομή των αυλακιών, κάτι που δεν μπορεί να γίνει στην περίπτωση που εξετάζεται.

Επιλέγοντας την πρώτη λύση το B_{cs} θα θεωρηθεί ίσο με 1,6. Επομένως το h_{cs} θα γίνει:

$$h_{cs} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot B_{cs}} = \frac{12.57 \cdot 10^{-3}Wb}{2 \cdot 0.18705m \cdot 1.6T} = 33.6mm$$

3.5 Δρομέας

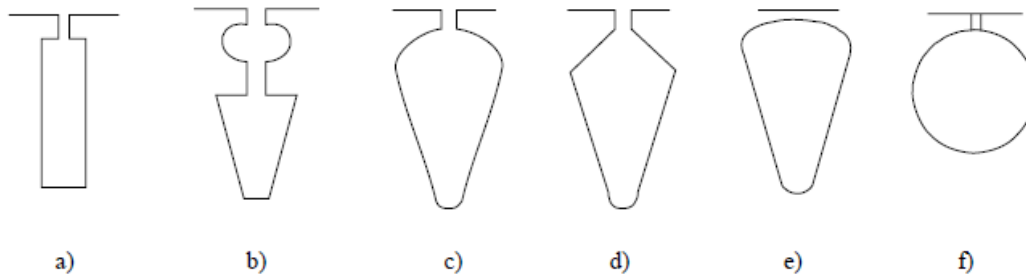
Στην αρχή θα γίνει επιλογή του πλήθους των αυλακιών του δρομέα. Ο αριθμός των αυλακιών του δρομέα σχετίζεται με τον αριθμό των πόλων και με το πλήθος των αυλακιών του στάτη. Η επιλογή γίνεται από τον πίνακα

$2p_1$	N_s	$N_r - \text{skewed rotor slots}$
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

Πίνακας Πλήθος αυλακιών δρομέα σε σχέση με το πλήθος των αυλακιών στάτη

Για αυτήν την περίπτωση θα επιλεγεί $N_s \neq N_r = 72$. Με την αύξηση των αριθμών του αυλακιών του δρομέα θα μειωθεί η αντίδραση του δρομέα η οποία εν συνεχεία θα οδηγήσει σε αύξηση του ρεύματος του δρομέα. Επίσης επηρεάζει τις διαστάσεις των αυλακιών στο δρομέα, με αποτέλεσμα να προκαλεί μείωση στην mmf του δρομέα.

Οι μορφές των αυλακιών δρομέα φαίνονται στην εικόνα 33. Για λόγους απλοποίησης επιλέγεται το σχήμα α.



Εικόνα Τύποι αυλακιών στάτη

Αφού έχει επιλεχθεί ο αριθμός των αυλακιών δρομέα και το σχήμα, στην συνέχεια θα υπολογιστεί το ρεύμα σε μία μπάρα του δρομέα.

Το ρεύμα μπάρας δίνεται από τον εξής τύπο:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_i \cdot K_w \cdot I_{ov} \cdot K_I}{N_r}$$

Με $K_I=1$ η mmf στάτη και δρομέα πρέπει να είναι ίση. Στην πραγματικότητα η mmf στάτη είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτή του δρομέα. Σε αυτή την περίπτωση το K_I δίνεται από τον τύπο:

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

Οπότε το ρεύμα μπάρας είναι:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_i \cdot K_w \cdot I_{ov} \cdot K_I}{N_r} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 136 \cdot 0.958 \cdot 16.2175 \cdot 0.8776}{72} = 172.7A$$

Η πυκνότητα στην μπάρα δρομέα θα πρέπει να είναι ίση με $j_b = 3,42A/mm^2$, διότι σε αυτήν την περίπτωση η προβλεπόμενη απόδοση του κινητήρα είναι μεγάλη [1]. Η διάμετρος της μπάρας με αυτή την πυκνότητα θα είναι:

$$A_b = \frac{172.7}{3.42 A/mm^2} = 50.497mm^2$$

Το ρεύμα δαχτυλιδιού υπολογίζεται:

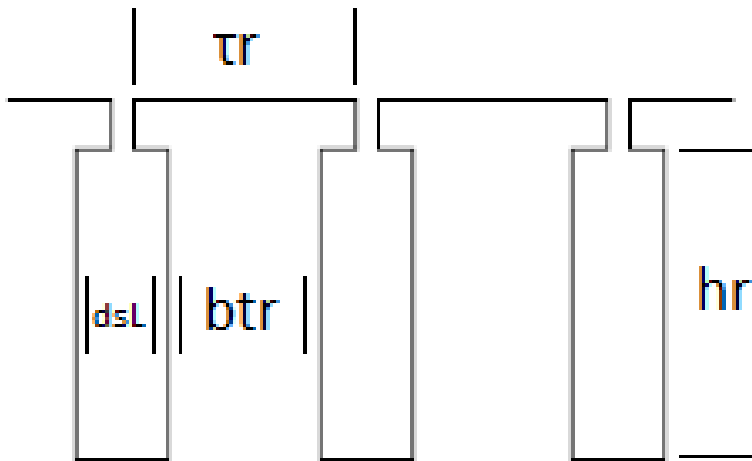
$$I_{er} = \frac{I_b}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p_i}{N_r}} = \frac{172.7}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 2}{72}} = 990.755A$$

Η πυκνότητα του ρεύματος δαχτυλιδιού είναι $J_{er} = (0.75 \text{ έως } 0.8)J_b$. Οι υψηλές τιμές αντιστοιχούν σε κομμάτι της μεταφοράς της θερμοκρασίας

από το δαχτυλίδι τέλους του δρομέα στον πυρήνα του. Οπότε $J_{er} = 0.75 \cdot J_b = 0.75 \cdot 3.42 \cdot 10^6 = 2.73 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$.

Η διατομή του τέλους των δαχτυλιδιών του δρομέα είναι :

$$A_{er} = \frac{I_{er}}{J_{er}} = \frac{990.755}{2.73 \times 10^6 \text{ A/mm}^2} = 362.9 \text{ mm}^2$$



Εικόνα 6. Διαστάσεις αυλακιών δρομέα

Σύμφωνα με τον τύπο του αυλακιού που έχει επιλεγεί, θα πρέπει να υπολογιστούν οι διαστάσεις που φαίνονται στην Εικόνα . Το βήμα αυλακιού του δρομέα είναι

$$\tau_r = \frac{\pi \cdot (D_{is} - 2g)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (158.8 - 2 \cdot 0.4)}{72} = 6.89 \text{ mm}$$

Η πυκνότητα ροής στα δόντια του, επιλέγεται να είναι $B_{tr} = 1.7 \text{ T}$, με πλάτος δοντιού ίσο με:

$$b_{tr} = \frac{B_g \cdot \tau_r}{K_{fe} \cdot B_{tr}} = \frac{0.78 \text{ T} \cdot 6.89 \cdot 10^{-3}}{0.96 \cdot 1.7 \text{ T}} = 3.293 \text{ mm}$$

Εξαιτίας του μικρού μεγέθους διακένου του κινητήρα η διάμετρος του δρομέα θα θεωρηθεί ίση με την εσωτερική διάμετρο του στάτη. Οπότε το $D_{re} = D_{is} = 0.1588 \text{ m}$.

Η περιφέρεια του δρομέα είναι ίση με:

$$C = 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_{re}}{2} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{158.8}{2} = 498.632\text{mm}$$

Το πλάτος του αυλακιού είναι:

$$d_{SL} = \tau_r - b_{tr} = 6.89\text{mm} - 3.293\text{mm} = 3.935\text{mm}$$

Το ύψος των αυλακιών δρομέα είναι :

$$h_r = \frac{A_b}{d_{SL}} = \frac{50.497 \text{ mm}^2}{3.935\text{mm}} = 12.832\text{mm}$$

Με πιο βαθιά αυλάκια δρομέα, θα αυξάνονταν η αντίσταση του δρομέα με αποτέλεσμα να αυξάνονταν η ροπή εκκίνησης και η ονομαστική ολίσθηση του κινητήρα. Οπότε μειώνοντας το πλάτος του αυλακιού δρομέα και κρατώντας σταθερή την διατομή του, προκύπτει ως αποτέλεσμα η αύξηση της αντίστασης δρομέα και της ροπής εκκίνησης. Οι διαστάσεις για το άνοιγμα και το ύψος του λαιμού αυλακιού, παίρνουν τυποποιημένες τιμές. $b_{or}=1.5 \text{ mm}$. $h_{or}= 0.5 \text{ mm}$. Αν η μαγνητική επαγωγή στα δόντια του δρομέα θεωρηθεί ίση με $B_{tr} = 1.7$. Οπότε από τον πίνακα 6.6 ,η μαγνητική ένταση πεδίου στα δόντια δρομέα θα είναι ίση με $H_{tr}= 4800 \text{ A/m}$. Με την ακριβή γνώση των διαστάσεων των αυλακιών του δρομέα, θα ξαναυπολογιστεί η μαγνητεργετική δύναμη δρομέα.

$$F_{mtr} = H_{tr} \cdot (h_r + h_{or} + d_{SL}) = 4800(12.832 + 0.5 + 3.935) = 82.88\text{At}$$

Η πυκνότητα ροής στον πίσω πυρήνα B_{cr} , θα πρέπει να παίρνει τις τιμές από 1 έως 1,6 (από τον πίνακα 6.4). Με B_{cr} ίση με 1,6 το ύψος του πίσω πυρήνα στον δρομέα είναι:

$$h_{cr} = \frac{\Phi}{2 \cdot L \cdot B_{cr}} = \frac{12.57 \cdot 10^{-3}\text{Wb}}{2 \cdot 0.18705 \cdot 1.6} = 21\text{mm}$$

3.6 Υπολογισμός των διαστάσεων άξονα

Η μέγιστη δυνατή διάμετρος που μπορεί να έχει ο άξονας του κινητήρα υπολογίζεται από τον εξής τύπο :

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

$$\Rightarrow D_{shaft} \leq 158.8 - 2 \cdot (12.832\text{mm} + 0.5 + 21) - 2 \cdot 0.4 = 89.336\text{mm}$$

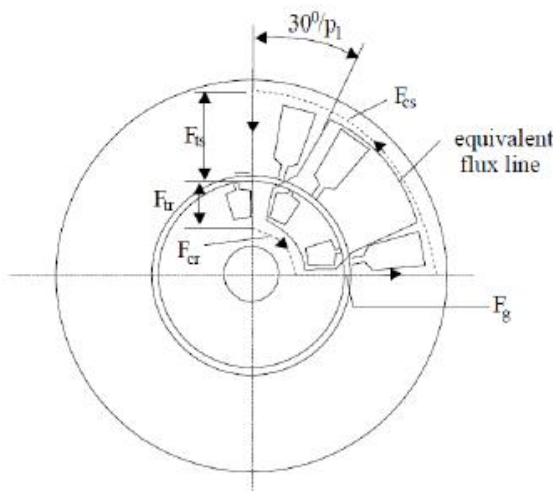
Με την αύξηση της εσωτερικής διαμέτρου του κινητήρα θα προκαλούνταν αύξηση του D_{shaft} , αλλά και μείωση στην ροπή εκκίνησης και ανατροπής. Μια άλλη λύση αποτελεί η μείωση της διατομής στα αυλάκια του δρομέα για να μειωθεί το ύψος τους. Αυτό καθίσταται δυνατό με την αύξηση του αριθμού των αυλακιών ή με την απευθείας μείωση της διατομής αυλακιών δρομέα (A_b).

Η ροπή στον άξονα αντιστοιχεί στην ονομαστική ροπή του κινητήρα, για ονομαστική ολίσθηση 0,02, η ονομαστική ροπή είναι:

$$T = \frac{P_n}{2 \cdot \pi \cdot \frac{f_1}{p_1} \cdot (1 - s)} = \frac{15000W}{2 \cdot \pi \cdot \frac{50}{2} \cdot (1 - 0.02)} = 97.49Nm$$

3.7 Υπολογισμός Ρεύματος Μαγνήτισης

Για να υπολογιστεί η ολική μαγνητεργετική δύναμη, θα πρέπει να αθροιστούν οι mmf του κινητήρα. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται οι mmf του κινητήρα.



Εικόνα 35 Μαγνητοενεργητικές δυνάμεις στον επαγωγικό κινητήρα

Η ολική mmf του κινητήρα υπολογίζεται από τον τύπο:

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

Όπου K_c είναι ο συντελεστής Carter ο οποίος μέχρι τώρα έχει θεωρηθεί ίσος με 1.2. Ο λόγος της μέγιστης πυκνότητα διακένου, με την

παρούσα πυκνότητα διακένου, είναι ο συντελεστής Carter. Η μέγιστη πυκνότητα διακένου λαμβάνεται όταν υπάρχει απουσία αυλακιών και αρμονικών.

Σε αυτή την μελέτη είναι πιο πρακτικό ο συντελεστής Carter, να υπολογιστεί με τον σύμμορφο μετασχηματισμό, όμως με αυτό τον υπολογισμό υπάρχει έλλειψη του κορεσμού. Οι διαστάσεις του στάτη και του δρομέα που έχουν υπολογιστεί θα βοηθήσουν στον προσδιορισμό του K_c .

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

Όπου:

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

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

Και:

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

$$\gamma_2 = \frac{b_{or}^2}{5 \cdot g + b_{or}} = \frac{1.5^2}{5 \cdot 0.4 + 1.5} = 0.64$$

Άρα:

$$K_{c1} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1} = \frac{10.39}{10.39 - 1.39} = 1.098$$

$$K_{c2} = \frac{\tau_r}{\tau_r - \gamma_2} = \frac{6.89}{6.89 - 0.64} = 1.1024$$

$$K_c = K_{c1} \cdot K_{c2} = 1.098 \cdot 1.1024 = 1.21$$

Η τιμή του K_c που υπολογίστηκε είναι σχετικά κοντά στην θεωρούμενη τιμή που είχε τεθεί αρχικά ($K_c=1.2$). Άρα οι υπολογισμοί που έχουν γίνει θεωρούνται σωστοί.

Η mmf στον πίσω πυρήνα του δρομέα και του στάτη υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

Στάτης:

$$F_{mcs} = C_{cs} \frac{\pi \cdot (D_{is} - h_{cs})}{2 \cdot p_i} \cdot H_{cs}$$

με

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

Δρομέας:

$$F_{mcr} = C_{cr} \frac{\pi \cdot (D_{shaft} + h_{cr})}{2 \cdot p_i} \cdot H_{cr}$$

με

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

Όπου $C_{cs,r}$ είναι ένας εμπειρικός συντελεστής που ορίζει το μέσο μήκος της ροής διαδρομής στον πίσω πυρήνα.

Για $B_{cs}=1.6$ T και $B_{cr}=1.6$ T , η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι ίση με $H_{cs}= 2460$ A/m και $H_{cr}=2460$ A/m.

Οπότε η mmf των πίσω πυρήνων είναι:

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

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

$$F_{mcs} = C_{cs} \frac{\pi \cdot (D_{is} - h_{cs})}{2 \cdot p_i} \cdot H_{cs} = 0.316 \frac{\pi \cdot (158.8 - 33.6)}{4} \cdot 2460 = 76.4 \text{ Aturns}$$

$$F_{mcr} = C_{cr} \frac{\pi \cdot (D_{shaft} + h_{cr})}{2 \cdot p_i} \cdot H_{cr} = 0.316 \frac{\pi \cdot (89.336 + 21)}{4} \cdot 2460 = 67.33 \text{ Aturns}$$

Η συνολική mmf του κινητήρα είναι:

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

$$2 \cdot \left(1.21 \cdot 0.4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0.7}{1.256 \cdot 10^{-6}} + 102.576 + \mathbf{82.88} + 76.4 + 67.33 \right)$$

1197.86 At

Ο συντελεστής κορεσμού πυρήνα δίνεται από τον τύπο:

$$K_{sc} = 1 + \frac{F_{mcs} + F_{mcr}}{2 \cdot F_{mg}} = 1 + \frac{76.5 + 67.33}{2 \cdot 267.515} = 1.269$$

Σε έναν κατάλληλο σχεδιασμό, ο συντελεστής κορεσμού των δοντιών και κορεσμού πυρήνα θα είναι σχετικά ίσοι ($K_{st} \approx K_{sc}$). Σε αυτή την περίπτωση, η πυκνότητα ροής διακένου όσο και του πυρήνα θα είναι ημιτονοειδείς ακόμη και σε υψηλά επίπεδα κορεσμού. Σε μηχανές με δύο πόλους ο συντελεστής πυρήνα θα είναι υψηλότερος από τον συντελεστή κορεσμού των δοντιών, και το ύψος στον πίσω πυρήνα τείνει να είναι μεγάλο, αυτό συνεπάγεται σε μεγάλο βήμα πόλου.

Ο συνολικός συντελεστής κορεσμού είναι:

$$K_s = \frac{F_{1m}}{2 \cdot F_{mg}} - 1 = \frac{1197.86}{2 \cdot 267.515} - 1 = 1.239$$

Σε ήπιο κορεσμό στον κινητήρα, ο συνολικός συντελεστής κορεσμού θα παίρνει τις τιμές από 1,3 έως 1,6. [1] Εφόσον έχει υπολογιστεί η συνολική mmf του κινητήρα, θα είναι εφικτό να υπολογιστεί το ρεύμα μαγνήτισης. Το ρεύμα μαγνήτισης δίνεται από τον τύπο:

$$I_\mu = \frac{\pi \cdot p_1 \cdot \frac{F_{1m}}{2}}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot W_i \cdot K_w} = \frac{3.14 \cdot 2 \cdot \frac{1197.86}{2}}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot 152 \cdot 0.958} = \mathbf{6.088A}$$

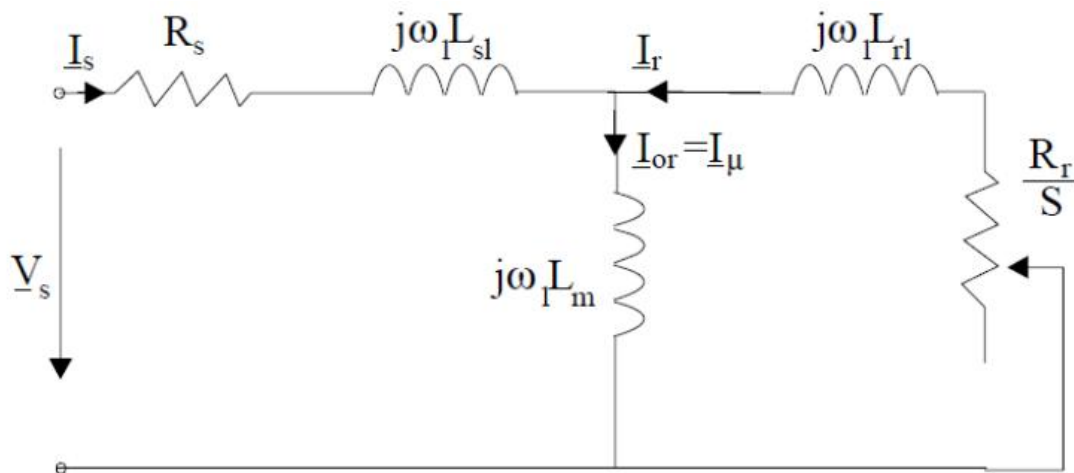
Με σχετικό ρεύμα μαγνήτισης ίσο με:

$$i_\mu = \frac{I_\mu}{I_{ov}} = \frac{6.088}{16.2177} \cdot 100\% = \mathbf{37.54\%}$$

Το ρεύμα μαγνήτισης εξαρτάται από την μαγνητική αντίσταση του διακένου. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή τόσο μεγαλύτερο θα είναι το ρεύμα μαγνήτισης, για την παραγωγή δεδομένης μαγνητικής ροής.

3.8 Αντιστάσεις και αντιδράσεις κινητήρα

Οι αντιστάσεις και οι αντιδράσεις του επαγωγικού κινητήρα φαίνονται στο παρακάτω ισοδύναμο κύκλωμα



Το παραπάνω κύκλωμα είναι το τελικό ισοδύναμο του επαγωγικού κινητήρα. Σε αυτό το κύκλωμα έχει αφαιρεθεί η αντίσταση του πυρήνα, επειδή η αντίδραση του μαγνήτισης είναι πολύ μικρότερη από την αντίσταση μαγνήτισης. Οι απώλειες χαλκού στα τυλίγματα του στάτη αντιπροσωπεύονται από μία ωμική αντίσταση (R_s). Η αντίσταση του στάτη δίνεται από τον τύπο:

$$R_s = \rho_{co} \cdot \frac{l_c \cdot W_i}{A_{co} \cdot a_i}$$

Όπου ρ_{co} είναι η ειδική αντίσταση του χαλκού στους 80°C (ενδεικτική θερμοκρασία λειτουργίας του κινητήρα). Στους 20°C η ειδική αντίσταση χαλκού είναι ίση με $\rho_{20} = 1,78 \times 10^{-8} \Omega \text{m}$. Για τους 80 υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

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

Το l_c είναι το μήκος πηνίων, όπου είναι 2 φορές το μήκος πυρήνα (L) και 2 φορές τέλος σύνδεσης (l_{end})

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

Το μήκος τέλος σύνδεσης είναι ουσιαστικά το μήκος των τυλιγμάτων που βρίσκονται έξω από τα αυλάκια. Το l_{end} εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων, αριθμό των επιπέδων περιελίξεων

$$l_{end} = 2y - 0.04 \text{ m for } 2p_1 = 2$$

$$l_{end} = 2y - 0.02 \text{ m for } 2p_1 = 4$$

$$l_{end} = \frac{\pi}{2}y + 0.018 \text{ m for } 2p_1 = 6$$

$$l_{end} = 2.2y - 0.012 \text{ m for } 2p_1 = 8$$

και από το βήμα πηνίου

Χρησιμοποιείται μονό επίπεδο στις περιελίξεις άρα, ισχύει ότι ($y=\tau$).

Οπότε $y=\tau=0,1247\text{m}$

Για 4 πόλους έχουμε l_{end} ίσο με :

$$l_{end} = 2 \cdot y - 0.02 = 2 \cdot 0.1247 - 0.02 = 0.2294\text{m}$$

$$l_c = 2 \cdot (L + l_{end}) = 2 \cdot (0.18705 + 0.2294) = 0.8329\text{m}$$

Η αντίσταση τυλιγμάτων στάτη :

$$R_s = \rho_{CO} \cdot \frac{l_c \cdot W_i}{A_{CO} \cdot a_i} = 2.17 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m} \cdot \frac{0.8329\text{m} \cdot 136}{3.2435 \cdot 10^{-6} \text{m}^2 \cdot 0.786} = 1.099\Omega$$

Η συνδυασμένη αντίσταση δρομέα και δαχτυλιδιών δίνεται από το τύπο:

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

K_R είναι ο συντελεστής επιδερμικού φαινομένου.

ρ_{Al} είναι η ειδική αντίσταση του αλουμινίου στην θερμοκρασία λειτουργίας του κινητήρα. Στους 20°C η ειδική αντίσταση αλουμινίου είναι ίση με $\rho_{Al20}=3.1 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$.

$$\rho_{Al80} = \rho_{Al20} \cdot \left(1 + \frac{1}{273} \cdot (80 - 20) \right) = 3.78 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$$

Το μήκος του τομέα του δακτυλίου βραχυκύκλωσης που αντιστοιχεί σε έναν αγωγό του δρομέα θα είναι:

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

b είναι το ύψος του δακτυλιδιού βραχυκύκλωσης

$$b = h_r + h_{or} + d_{SL} = 12.832 + 0.5 + 3.935 = 17.267\text{mm}$$

$$D_{er} = D_{re} - 3.5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot g = 0.1588 - 0.0035 - 2 \cdot 0.0004 = 0.1545\text{m}$$

Οπότε το μήκος του δακτυλιδιού βραχυκύκλωσης είναι:

$$l_{er} = \frac{\pi \cdot (D_{er} - b)}{N_r} = \frac{\pi \cdot (0.1545 - 0.017267)}{72} = 5.985 \cdot 10^{-3}\text{m}$$

Ο συντελεστής επιδερμικού φαινομένου υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

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

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

Το β_s είναι ο λόγος, του βάθους του αγωγού, προς το μέρος εκείνο του αγωγού που διαπερνάται από μαγνητικό πεδίο.

$$\beta_s = \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_o}{2 \cdot \rho_{Al}}} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 50 \cdot 1.256 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3.78 \cdot 10^{-8}}} = 72.23\text{m}^{-1}$$

$$\xi = \beta_s \cdot h_r \cdot \sqrt{s} = 72.23m^{-1} \cdot 0.012832m \cdot 1 = 0.92685$$

Συνεπώς η σύνθετη αντίσταση δρομέα και δακτυλιδιών είναι:

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

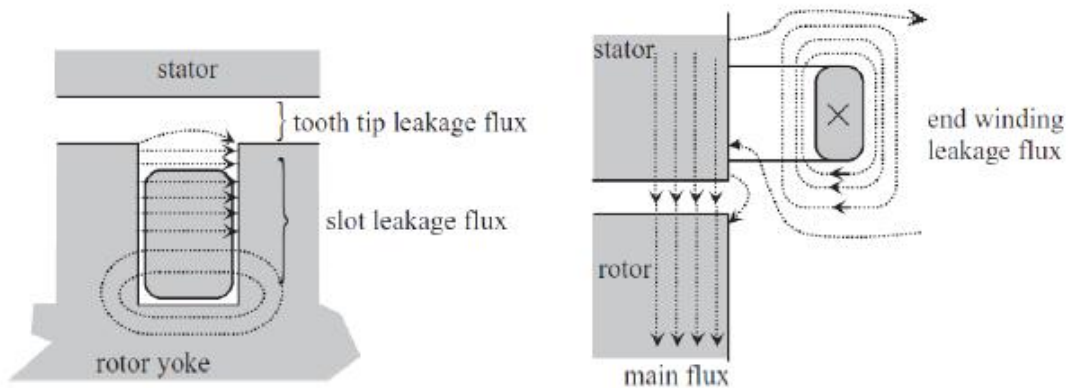
$$3.78 \cdot 10^{-8} \cdot \left[\frac{0.18705 \cdot 0.92685}{78.23 \cdot 10^{-6}} + \frac{5.985 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 562.23 \cdot 10^{-3} \cdot \sin^2 \left(\frac{2\pi}{72} \right)} \right] = 129.8 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Η παραπάνω αντίσταση είναι η πραγματική αντίσταση του δρομέα. Αυτή η αντίσταση είναι σταθερή και δεν εξαρτάται από την ολίσθηση. Στο τελικό ισοδύναμο κύκλωμα η αντίσταση ανοιγμένη στα τυλίγματα του δρομέα, επηρεάζεται από την ολίσθηση. Η αντίσταση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$(R_r)_{s=1} = \frac{4 \cdot m}{N_r} \cdot (W_1 \cdot K_w)^2 \cdot (R_{be}^{80})_{s=1} = \frac{4 \cdot 3}{72} \cdot (152 \cdot 0.958)^2 \cdot 129.8 \cdot 10^{-6} = 0.4587 \Omega$$

3.9 Υπολογισμός Αντιδράσεων Κινητήρα

Πέραν των ωμικών αντιστάσεων που εμφανίζονται στα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα εκδηλώνονται και αντιδράσεις διαρροής. Οι αντιδράσεις διαρροής οφείλονται στις μαγνητικές γραμμές του πεδίου που διαρρέουν μόνο τον πυρήνα του ενός και δεν υπάρχει αμοιβαία ροή ανάμεσα στους δύο πυρήνες του στάτη και δρομέα.



Η επαγωγική αντίδραση του στάτη δίνεται από τον τύπο:

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

Όπου λ_s , λ_{ds} , λ_{er} είναι συντελεστές που ονομάζονται geometrical coefficient slot, differential coefficient και end ring coefficient αντίστοιχα. Το λ_s εξαρτάται από την γεωμετρία των αυλακιών, και από τον αριθμό των επιπέδων περιελίξεων. Για τον υπολογισμό του slot coefficient πρέπει να ληφθεί υπόψη η μεταβαλλόμενη διατομή του αυλακιού στάτη. Για μονού επίπεδου τυλίγματα το λ_s δίνεται από τον τύπο:

$$\lambda_s = \frac{h_s}{3b_{s1}} + \frac{h_{os}}{b_{os}} + 0.66$$

Ο τελευταίος όρος (0,66) μπορεί να υπολογιστεί και από τον παρακάτω τύπο.

$$\lambda_{u3} = 0.41 + 0.76 \log \frac{b_{s1}}{b_{os}}$$

$$\lambda_s = \frac{h_s}{3b_{s1}} + \frac{h_{os}}{b_{os}} + 0.41 + 0.76 \log \frac{b_{s1}}{b_{os}} = \frac{19.67}{3 \cdot 6.155} + \frac{0.7}{2.5} + 0.41 + 0.76 \log \frac{6.155}{2.5} = 2.0526$$

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

$$C_s = 1 - 0.033 \cdot \frac{b_{os}^2}{g \cdot \tau_s} = 1 - 0.033 \cdot \frac{2.5^2}{0.4 \cdot 10.39} = 0.95$$

$$\begin{aligned}\gamma_{ds} &= (0.11 \sin \varphi_1 + 0.28) \cdot 10^{-2}; \text{ for } q = 8 \\ \gamma_{ds} &= (0.11 \sin \varphi_1 + 0.41) \cdot 10^{-2}; \text{ for } q = 6 \\ \gamma_{ds} &= (0.14 \sin \varphi_1 + 0.76) \cdot 10^{-2}; \text{ for } q = 4 \\ \gamma_{ds} &= (0.18 \sin \varphi_1 + 1.24) \cdot 10^{-2}; \text{ for } q = 3 \\ \gamma_{ds} &= (0.25 \sin \varphi_1 + 2.6) \cdot 10^{-2}; \text{ for } q = 2 \\ \gamma_{ds} &= 9.5 \cdot 10^{-2}; \text{ for } q = 1\end{aligned}$$

το γ_{ds} εξαρτάται από τον αριθμό των αυλακιών ανά πόλο και ανά φάση q : Με φ ίσο με :

$$\varphi = \pi \cdot (6\beta - 5.5) = \pi(6 \cdot 1 - 5.5) = 1.57 \text{ rad}$$

Για $q=4$ το γ_{ds} δίνεται από τον τύπο:

$$\gamma_{ds} = (0.14 \cdot \sin \varphi_1 + 0.76) \cdot 10^{-2} = 0.9 \cdot 10^{-2}$$

Ο συντελεστής λ_{ds} είναι:

$$\begin{aligned}\lambda_{ds} &= \frac{0.9 \cdot \tau_s \cdot q^2 \cdot K_w^2 \cdot C_s \cdot \gamma_{ds}}{K_c \cdot g \cdot (1 + K_{sd})} = \frac{0.9 \cdot 10.39 \cdot 10^{-3} \cdot 4^2 \cdot 0.958^2 \cdot 0.95 \cdot 0.9 \cdot 10^{-2}}{1.21 \cdot 0.4 \cdot 10^{-3} \cdot (1 + 0.8)} \\ &= 1.3475\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}\lambda_{er} &= 0.67 \cdot \frac{q}{L} \cdot (l_{end} - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau) \\ &= 0.67 \cdot \frac{4}{0.18705} \cdot (0.2294 - 0.64 \cdot 1 \cdot 0.1247) \Rightarrow \lambda_{er} = 2.143\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 X_{SL} &= 2 \cdot \mu_0 \cdot \omega \cdot L \cdot \frac{W_1^2}{p_1 \cdot q} \cdot (\lambda_s + \lambda_{ds} + \lambda_{er}) \\
 &= 2 \cdot 1.256 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0.18705 \cdot \frac{152^2}{2 \cdot 4} \\
 &\quad \cdot (2.0526 + 1.3475 + 2.143) = 2.36\Omega
 \end{aligned}$$

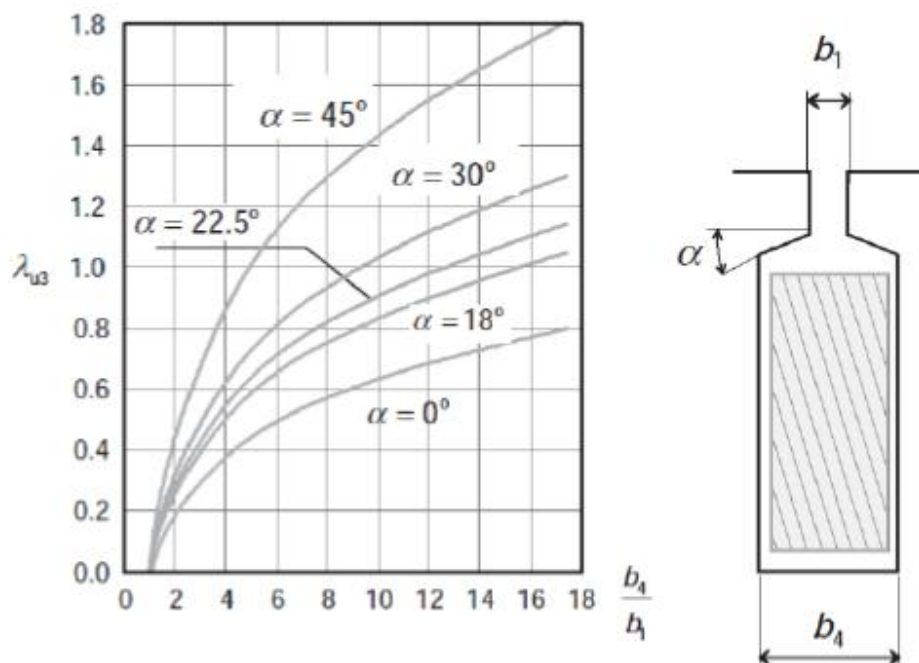
Η αντίδραση του δρομέα δίνεται από τον τύπο:

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

Όπου λ_r είναι η geometrical coefficient slot για τα αυλάκια του δρομέα. Όπως και του στάτη το λ_r εξαρτάται από την αριθμό των επιπέδων περιελίξεων, και από την μεταβαλλόμενη διατομή του τύπου αυλακιού. Το λ_r δίνεται από τον τύπο:

$$\lambda_r = \frac{h_r}{3 \cdot d_{SL}} + \frac{h_{or}}{b_{or}} + \lambda_{u3}$$

Όπου λ_{u3} δίνεται από τον παρακάτω διάγραμμα



Το $d_{SL}/b_{or}=3.597/1.5=2.623$, οπότε το λ_{u3} είναι περίπου ίσο με 0.3

Συνεπώς το λ_r είναι ίσο με :

$$\lambda_r = \frac{h_r}{3 \cdot d_{SL}} + \frac{h_{or}}{b_{or}} + \lambda_{u3} = \frac{12.832}{3 \cdot 3.935} + \frac{0.5}{1.5} + 0.3 = 1.893$$

Ο συντελεστής διαφορικής διαρροής λ_{dr} δίνεται από τον τύπο:

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

Όπου γ_{dr}

$$\gamma_{dr} = 9 \cdot \left(\frac{6 \cdot p_i}{N_r}\right)^2 \cdot 10^{-2} = 9 \cdot \left(\frac{6 \cdot 2}{72}\right)^2 \cdot 10^{-2} = 2.5 \cdot 10^{-3}$$

Άρα

$$\lambda_{dr} = \frac{0.9 \cdot \tau_r \cdot \gamma_{dr} \cdot N_r^2}{K_c \cdot g \cdot (6 \cdot p_1)^2} = \frac{0.9 \cdot 6.89 \cdot 2.5 \cdot 10^{-3} \cdot 72^2}{1.21 \cdot 0.4 \cdot (6 \cdot 2)^2} = 1.153$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής λ_{er} από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \lambda_{er} &= \frac{2.3 \cdot (D_{er} - b)}{N_r \cdot L \cdot 4 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot P_1}{N_r}\right)} \cdot \log \frac{4.7 \cdot (D_{er} - b)}{b + 2a} \\ &= \frac{2.3 \cdot (154.5 - 17.267)}{72 \cdot 187.05 \cdot 4 \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \cdot 2}{72}\right)} \cdot \log \frac{4.7 \cdot (154.5 - 17.267)}{17.267 + 2 \cdot 21} = 0.8 \end{aligned}$$

Όπου

$$\alpha = \frac{A_{er}}{b} = \frac{362.9 \cdot 10^{-3} \text{mm}^2}{17.267 \text{mm}} = 21 \text{mm}$$

Ο συντελεστής επιδερμικού φαινομένου K_x (skin effect coefficient for leakage reactance) λαμβάνεται από τον εξής τύπο, για $\xi=0.92685$

$$K_x = \frac{3 \cdot [\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)]}{2 \cdot \xi \cdot [\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)]} \approx \frac{3}{2 \cdot \xi} = 1.618$$

Η αντίδραση του δρομέα είναι:

$$\begin{aligned} X_{be} &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot L \cdot (\lambda_r \cdot K_x + \lambda_{dr} + \lambda_{er}) \\ &= 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1.256 \cdot 10^{-6} \cdot 0.18705 \cdot (1.893 \cdot 1.618 + 1.153 + 0.8) \\ &= 370 \cdot 10^{-6} \Omega \end{aligned}$$

Η αντίδραση του δρομέα ανοιγμένη στον στάτη είναι:

$$X_2 = 4 \cdot m \cdot \frac{(W_1 \cdot K_w)^2}{N_r} \cdot X_{be} = 4 \cdot 3 \cdot \frac{(152 \cdot 0.958)^2}{72} \cdot 370 \cdot 10^{-6} \Omega = 1.30758 \Omega$$

Ο υπολογισμός της αντίδρασης μαγνήτισης δίνεται από τη σχέση:

$$X_m = \sqrt{\left(\frac{V_{ph}}{I_\mu}\right)^2 - R_s^2} - X_{sl} = \sqrt{\left(\frac{400}{6.088}\right)^2 - 1.099^2} - 2.36 = 63.33 \Omega$$

3.10 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:

$$\sum \text{losses} = P_{co} + P_{al} + P_{iron} + P_{mv} + P_{stray}$$

Ο βαθμός απόδοσης δίνεται από τον τύπο:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in} + \sum losses}$$

Οι απώλειες χαλκού αναφέρονται στις απώλειες τον τυλιγμάτων στάτη. Αυτές οι απώλειες δίνονται από τον τύπο:

$$P_{co} = 3 \cdot I_{ov}^2 \cdot R_s = 3 \cdot 16.2175^2 \cdot 1.099 = 867.135W$$

Οι απώλειες αλουμινίου αναφέρονται στις απώλειες στις μπάρες του δρομέα. Αυτές οι απώλειες δίνονται για $s=s_n$:

$$P_{al} = 3 \cdot I_{rn}^2 \cdot (R_r)_{sn} = 3 \cdot K_f^2 \cdot I_n^2 \cdot R_r = 3 \cdot 0.877^2 \cdot 16.2175^2 \cdot 0.4587 = 278.75W$$

Οι μηχανικές απώλειες εξαρτώνται από τον αριθμό των ζευγών πόλων

Για $p_1=1$ το $p_{mv}=0.03 \cdot P_n$.

Για $p_1=2$ το $p_{mv}=0.012 \cdot P_n$.

Για $p_1=3,4$ το $p_{mv}=0.008 \cdot P_n$.

Οπότε η μηχανική ισχύς είναι

$$P_{mv} = 0.012 \cdot P_{ov} = 0.012 \cdot 15000W = 180W$$

Οι κατανεμημένες απώλειες υπολογίζονται από τον τύπο:

$$P_{stray} = 0.001 \cdot P_{ov} = 0.001 \cdot 15000W = 150W$$

Για τις απώλειες σιδήρου λαμβάνονται υπόψη μόνο οι απώλειες σιδήρου στα δόντια και στον πίσω πυρήνα στον στάτη, καθώς ο δρομέα έχει χαμηλές συχνότητες ($f_2 < (3-4) \text{ Hz}$).

Οι θεμελιώδεις απώλειες στα δόντια του στάτη δίνονται από τον τύπο:

$$p_{t1} = K_{y1} \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1.3} \cdot B_{ts}^{1.7} \cdot G_{t1}$$

Όπου p_{10} είναι οι ειδικές απώλειες σε W/kg σε 1 Tesla και παίρνει τις τιμές για 50 Hz $p_{10}=(2-3)\text{kg}$.

Το K_{y1} εξαρτάται από τη ποιότητα των υλικών και από ακανόνιστες ροπές. Παίρνει τις τιμές $K_t=(1,6-1,8)$.

Το G_{t1} είναι το βάρος των δοντιών στάτη :

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

$$\Rightarrow G_{t1} = 7800 \cdot 48 \cdot 4.965 \cdot 10^{-3} \cdot (19.67 + 1 + 0.7) \cdot 10^{-3} \cdot 0.18705 \cdot 0.96 = 7.13 \text{ kgr}$$

Για $B_{ts}=1.7$ και $f=50$ Hz το p_{t1} είναι ίσο με :

$$p_{t1} = K_t \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{ts}^{1,7} \cdot G_{t1} = 1,7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1.7^{1,7} \cdot 7.13 = 89.623W$$

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 $K_y = (1.6-1.9)$.

Το G_{y1} δίνεται από τον τύπο :

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

$$\Rightarrow G_{y1} = 7800 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [0.2561^2 - (0.2561 - 2 \cdot 0.0336)^2] \cdot 0.18705 \cdot 0.96 \Rightarrow G_{y1} = 32.88W$$

$$p_{y1} = K_y \cdot p_{10} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1,3} \cdot B_{cs}^{1,7} \cdot G_{y1} = 1,7 \cdot 3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^2 \cdot 1.6^{1,7} \cdot 32.88 W = 372.825W$$

Οι απώλειες πυρήνα είναι το άθροισμα των απωλειών δοντιών και πίσω πυρήνα.

$$P_{iron} = p_{t1} + p_{y1} = 89.623W + 372.825W = 462.448W$$

Οι συνολικές απώλειες του κινητήρα θα είναι:

$$\sum losses = P_{co} + P_{al} + P_{iron} + P_{mv} + P_{stray}$$

$$= 867.135 + 278.75 + 462.448 + 180 + 150 = 1938.333W$$

Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα θα είναι:

$$\eta = \frac{15000W}{15000 + 1938.333} \cdot 100\% = 88.55\%$$

3.11 Υπολογισμών των χαρακτηριστικών λειτουργίας

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

$$I_0 = \frac{P_{iron} + P_{mv} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot R_s}{3 \cdot V_{ph}} = \frac{462.448 + 180 + 3 \cdot 6.088^2 \cdot 1.099}{3 \cdot 400} = 0.637A$$

Η ονομαστική ολίσθηση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$s = \frac{P_{Al}}{P_{AG}} = \frac{P_{Al}}{P_n + P_{Al} + P_{mv} + P_{stray}} = \frac{278.75}{15000 + 278.75 + 180 + 150W} = 0.01786$$

Η ονομαστική ροπή είναι ίση με:

$$T_n = \frac{P_n}{2\pi \cdot \frac{f}{p_1} (1 - s_n)} = \frac{15000W}{2\pi \cdot \frac{50}{2} (1 - 0.01933)} = 118.43Nm$$

Η ροπή ανατροπής υπολογίζεται από την σχέση:

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

Όπου:

$$C_1 = 1 + \frac{X_{sl}}{X_{m,skew}} = 1 + \frac{2.36}{60.34} = 1.039$$

Οπότε

$$\begin{aligned} T_{bk} &= \frac{3 \cdot p_1}{2 \cdot \omega_1} \cdot \frac{V_{ph}^2}{[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + C_1 \cdot X_2)^2}]^2} \\ &= \frac{3 \cdot 2}{2 \cdot 2 \cdot 3.14 \cdot 50} \cdot \frac{400^2}{[1.099 + \sqrt{1.099^2 + (2.36 + 1.039 \cdot 1.30758)^2}]^2} \\ &= 307 Nm \end{aligned}$$

Το ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα είναι ίσο με:

$$\begin{aligned} I_{LR} &= \frac{V_{ph}}{\sqrt{(R_s + R_r)^2 + (X_{sl} + X_{rl})^2}} = \frac{400}{\sqrt{(1.099 + 0.4587)^2 + (2.36 + 370 \cdot 10^{-6})^2}} \\ &= 141.44 A \end{aligned}$$

Η ροπή εκκίνησης είναι ίση με:

$$T_{LR} = \frac{3 \cdot I_{LR}^2 \cdot R_r}{\omega} \cdot p_1 = \frac{3 \cdot 141.44^2 \cdot 0.4587}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cdot 2 = 175.34 Nm$$

Ο συντελεστής ισχύος της μηχανής δίνεται από την σχέση:

$$\cos\varphi = \frac{P_n}{3 \cdot V_{ph} \cdot I_n \cdot \eta} = \frac{15000}{3 \cdot 400 \cdot 16.2175 \cdot 0.8855} = 0.87$$

3.12 Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση της μελέτης παρατηρούμε τα εξής

- Η ονομαστική ροπή υπολογίσθηκε 118.43Nm, πολύ κοντά στην τιμή 97.43 Nm που δίνεται στα αρχικά στοιχεία του κινητήρα
- Η ροπή εκκίνησης υπολογίστηκε 175.34 Nm ενώ η τιμή της στα στοιχεία του κινητήρα είναι 211.52 Nm και η ροπή ανατροπής υπολογίστηκε 307 Nm ενώ στα στοιχεία δίνεται 257 Nm. Και οι δύο ροπές εξαρτώνται από τα πηνία και τις αντιστάσεις του ισοδύναμου κυκλώματος, **των οποίων οι τιμές επηρεάζονται από τα αυλάκια του στάτη και του δρομέα.**
- Ο βαθμός απόδοσης υπολογίσθηκε 0.8855 ενώ δίνεται 0.91. Ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα εξαρτάται από τις απώλειες οι οποίες με τη σειρά τους είναι ανάλογες των αντιστάσεων R_s (οι απώλειες χαλκού) και R_r . (οι απώλειες αλουμινίου). Τέλος οι απώλειες σιδήρου εξαρτώνται από τον αριθμό των πόλων και τις διαστάσεις του στάτη.
- Ο συντελεστής ισχύος υπολογίσθηκε 0.87 ενώ δίνεται 0.847. Πρέπει να αυξηθεί ο βαθμός απόδοσης προκειμένου να μειωθεί ο συντελεστής ισχύος.
- Η ολίσθηση του κινητήρα υπολογίσθηκε 1.786% ενώ δίνεται 1.933%. Η ολίσθηση υπολογίζεται από τη σχέση

$$s = \frac{P_{Al}}{P_{AG}} = \frac{P_{Al}}{P_n + P_{Al} + P_{mv} + P_{stray}}$$

Οι απώλειες δρομέα P_{Al} είναι ανάλογες της αντίστασης R_r της οποίας η τιμή επηρεάζεται από τα αυλάκια του στάτη και του δρομέα.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης με την προϋπάρχουσα μπορούμε να σημειώσουμε τα παρακάτω

- Η αρχική ονομαστική ροπή του κινητήρα ήταν 97,43 Nm. Με την αρχική μελέτη η ονομαστική ροπή έγινε 96.434Nm και με την παρούσα μελέτη η ονομαστική ροπή υπολογίσθηκε στα 118.43Nm. **Άρα η ονομαστική ροπή βελτιώθηκε κατά 21Nm.**
- Η ροπή εκκίνησης υπολογίστηκε 175.34 Nm ενώ η αρχική τιμή ήταν 211.52 Nm και στην αρχική μελέτη είχε υπολογισθεί 139.474Nm. **Άρα με την παρούσα μελέτη έχουμε επιτύχει ροπή εκκίνησης πολύ κοντά σε αυτή των προδιαγραφών.**
- Η ροπή ανατροπής υπολογίστηκε 307Nm ενώ στα στοιχεία του κινητήρα δίνεται 257 Nm και στην αρχική μελέτη είχε

υπολογισθεί 337.27Nm. Αρα έχουμε επιτύχει ροπή ανατροπής πάρα πολύ κοντά σε αυτή των προδιαγραφών
Ακολουθεί ένας συγκεντρωτικός-συγκριτικός πίνακας

	Αρχικές προδιαγραφές	Προηγούμενη μελέτη	Παρούσα μελέτη
Ονομαστική Ροπή	97,43 Nm	96.434Nm	118.43Nm
Ροπή εκκίνησης	211.52Nm	139.474Nm	175.34 Nm
Ροπή ανατροπής	257 Nm	337.27Nm	307 Nm

. Σαν γενικό συμπέρασμα σε σχέση με την αρχική μελέτη παρατηρούμε πως η παρούσα μελέτη έδωσε αποτελέσματα πολύ πιο κοντά σε αυτά των προδιαγραφών. Η επιλογή λοιπόν 48 αυλακιών στο στάτη και 72 αυλακιών στο δρομέα, οδήγησε σε πιο σωστό σχεδιασμό του κινητήρα. Σημειώνεται πως στην αρχική μελέτη είχαν χρησιμοποιηθεί 36 αυλάκια στο στάτη και 48 στο δρομέα

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- STEPHEN J. CHAPMAN «ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC», 3η ΕΚΔΟΣΗ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2003
 - Ion Boldea & Syed A. Nasar “The Induction Machines Desing Handbook”, Second Edition
 - http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Parousiasi5.pdf
 - <http://www.metadosi-ischios.gr/article.php?ID=355>
 - http://forums.aeva.asn.au/forums/changing-an-induction-motor-voltage_topic1237.html
 - <http://gemotors.com.br/products/motors/wound/>
 - <http://www.metadosi-ischios.gr/article.php?ID=355>
 - http://dimchoris.blogspot.gr/2013/04/blog-post_24.html
- http://dimchoris.blogspot.gr/2013/04/blog-post_24.html