

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΡΙΘΜΟΣ: 1469

**ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΡΟΠΗΣ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ
ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΔΡΟΜΕΑ**

**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:
ΠΙΠΙΝΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
ΛΙΓΟΥΜΙΤΗΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ**

**ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ**

ΠΑΤΡΑ, 2015

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ σελ. 2
2. ΔΟΜΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ σελ. 2
3. ΕΙΔΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ σελ. 2-3
4. ΕΙΔΗ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ σελ. 4
5. ΤΥΠΟΙ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ σελ. 4-5
6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΚΕΡΑΙΟΥ & ΣΜΙΚΡΙΜΕΝΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ σελ. 6-7
7. ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΑΚΡΩΝ ΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ σελ. 7-8
8. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ σελ. 8-9
9. ΟΛΙΣΘΗΣΗ ΔΡΟΜΕΑ σελ. 9-10
10. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ & ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΙΣΧΥΟΣ σελ. 10-11
11. ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ σελ. 11
12. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΡΟΠΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ σελ. 12-13
13. ΚΛΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ σελ. 13-14
14. ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ σελ. 14-15
15. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ σελ. 15-44
16. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ σελ. 44
17. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ σελ.45

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενέργεια είναι μια από της πιο σημαντικές έννοιες της φυσικής. Οι μορφές της ενέργειας είναι η μηχανική, χημική, πυρηνική, θερμική και η ηλεκτρομαγνητική με την οποία ασχοληθούμε. Αυτές έχουν την δυνατότητα να αλλάζουν μορφές αλλά η συνολική ενέργεια παραμένει σταθερή. Αυτό είναι η αρχή διατήρησης της ενέργεια. Αυτή η ιδιότητα της ενέργεια είναι που την κάνει τόσο χρήσιμη. Η ηλεκτρική ενέργεια είναι πολύ χρήσιμη στην εποχή μας. Μέρος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργεια προορίζεται για μετατροπή σε θερμική και σε φως. Ένα μεγάλο όμως κομμάτι μετατρέπεται σε μηχανική με τους ηλεκτρικούς κινητήρες. Ο λόγος που χρησιμοποιούμε ηλεκτρικές μηχανές είναι ότι μπορούν να τις τροφοδοτούμε πολύ εύκολα από ένα ηλεκτρικό δίκτυο, μεγάλου μήκους. Το δίκτυο μπορεί να είναι τριφασικό ή μονοφασικό.

Ένας τύπος ηλεκτρικού κινητήρα είναι η επαγωγική μηχανή. Η επαγωγική μηχανή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως γεννήτρια αν μετατρέψουμε τη μηχανική σε ηλεκτρική ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κινητήρας αν μετατρέψουμε την ηλεκτρική σε μηχανική. Ένας επαγωγικός κινητήρας χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές στην καθημερινή μας ζωή όπως σε ψυγεία, καταψύκτες, μίξερ, αντλίες και άλλα. Επίσης χρησιμοποιείται και στην βιομηχανία σε μεταφορικές ταινίες, σε και άλλα. Αυτές οι μηχανές έχουν καταλάβει μεγάλο μέρος της αγοράς λόγω των αντοχών τους και το χαμηλό τους κόστος. Στην αρχή κυριαρχούσαν οι μηχανές συνεχούς ρεύματος, λόγω ότι οι επαγωγικές μηχανές είχαν πρόβλημα με την ρύθμιση της ταχύτητας και των εκκινήσεων τους. Αλλά με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών και την δημιουργία inverter όπου μπορούμε να ρυθμίζουμε την συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας οι επαγωγικές μηχανές κέρδισαν μεγάλο μέρος της αγοράς.

2. ΔΟΜΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Σε σχέση με τις υπόλοιπες ηλεκτρικές μηχανές οι επαγωγικοί κινητήρες αποτελούνται από δύο τυλίγματα, ένα στον στάτη και ένα στον δρομέα όπου τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενη τάση. Το τύλιγμα του στάτη είναι γνωστό και ως τύλιγμα τυμπάνου. Ανάλογα δε με τις τάσεις τροφοδοσίας και τον τύπο του κινητήρα, τα τυλίγματα του στάτη συνδέονται είτε σε αστέρα είτε σε τρίγωνο. Το τύλιγμα του δρομέα είναι βραχυκυκλωμένο και τροφοδοτείται έμμεσα με εναλλασσόμενο ρεύμα από τον στάτη λόγω επαγωγής. Για τον λόγο αυτό ονομάζεται κινητήρας επαγωγής.

3. ΕΙΔΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Οι ασύγχρονοι κινητήρες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την κατασκευή του τυλίγματος του ρότορα. Έτσι, έχουμε:

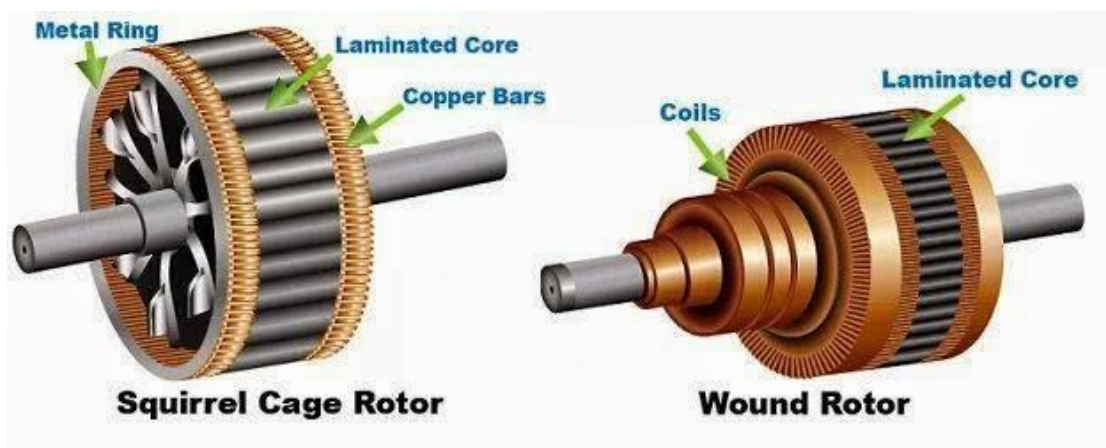
- a. Κινητήρες περιελιγμένου δρομέα ή δακτυλιοφόροι (wound rotor)
- b. Κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα ή τύπου κλωβού (squirrel-cage rotor)

Κινητήρες Δακτυλιοφόρου Δρομέα

Το τύλιγμα δρομέα των κινητήρων δακτυλιοφόρου δρομέα αποτελεί και αυτό ένα τριφασικό τύλιγμα με ίσο αριθμό πόλων με το τύλιγμα τυμπάνου του στάτη. Στους κινητήρες αυτούς υπάρχει η δυνατότητα πρόσθεσης εξωτερικής ωμικής αντίστασης σε σειρά με κάθε φάση του τυλίγματος του δρομέα, μέσω των ψυκτρών. Τέτοιου είδους κινητήρες χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεγάλη ισχύ και σε περιπτώσεις υψηλών απαιτήσεων σε ροπή εκκίνησης.

Κινητήρες Βραχυκυκλωμένου Δρομέα

Το τύλιγμα του στάτη είναι συγκροτημένο από μάτσα με χάλκινο σύρμα ή από χάλκινες μπάρες. Τα μάτσα ή οι μπάρες είναι τοποθετημένα μέσα σε κατάλληλα αυλάκια, τα οποία βρίσκονται στην εσωτερική κυλινδρική επιφάνεια του στάτη. Τα τυλίγματα με μάτσα χρησιμοποιούνται κανονικά για κινητήρες με μικρή ισχύ, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε κινητήρες με μεγάλη ισχύ και μεγάλη τάση. Στα τυλίγματα των κινητήρων με μικρή ισχύ η διάμετρος του σύρματος σπάνια ξεπερνάει τα 3mm. Για μεγαλύτερες διατομές συνίσταται η χρήση δυο ή περισσότερων συρμάτων συνδεδεμένων παράλληλα. Τα τυλίγματα με μπάρες χρησιμοποιούνται στις μηχανές με μεγάλη ισχύ και χαμηλή τάση. Στην περίπτωση που έχουμε υψηλή ένταση ρεύματος δεν ενδείκνυται η χρήση στρογγυλού σύρματος. Στα τυλίγματα με μεγάλη ένταση δεν ενδείκνυται η χρήση μεγάλων μπαρών, επειδή δημιουργούνται παρασιτικά ρεύματα. Αντίθετα, ενδείκνυται η χρήση αγωγών ορθογώνιας διατομής, μονωμένων μεταξύ τους και συνδεδεμένων παράλληλα.



4. ΕΙΔΗ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ

Οι μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος κατασκευάζονται με τρία είδη τυλιγμάτων τα οποία είναι :

- a. Τυλίγματα με ένα μάτσο / αυλάκι
- b. Τυλίγματα με δύο μάτσα / αυλάκι
- c. Τυλίγματα με ένα και δύο μάτσα / αυλάκι

Τα τυλίγματα με ένα μάτσο / αυλάκι ονομάζονται και τυλίγματα με μια στρώση. Τα τυλίγματα με δύο μάτσα ανά αυλάκι ονομάζονται και τυλίγματα με δύο στρώσεις και τέλος τα τυλίγματα με ένα και δύο μάτσα / αυλάκι ονομάζονται μικτά τυλίγματα. Τα τυλίγματα μπορεί να είναι μονοφασικά, διφασικά και τριφασικά. Τα πλέον διαδεδομένα τυλίγματα είναι τα τριφασικά, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ότι προκύπτουν από τρία μονοφασικά κυκλώματα μετατοπισμένα μεταξύ τους κατά 120 ηλεκτρικές μοίρες.

5. ΤΥΠΟΙ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ

Τα τυλίγματα των ασύγχρονων κινητήρων διακρίνονται σε 3 συστήματα τα οποία είναι :

- a. Ομόκεντρο
- b. Βροχοειδές (συνήθως ονομάζεται «στεφάνης»)
- c. Κυματοειδές

Τα συστήματα αυτά των τυλιγμάτων χωρίζονται σε 2 τύπους:

- I. Με Ομώνυμους πόλους
- II. Με Εναλλάξ πόλους

Εν συνεχεία τα τόσο τα τυλίγματα με ομώνυμους όσο και με εναλλάξ πόλους διακρίνονται σε 2 κατηγορίες ανάλογα με το πλάτος του μάτσου, (δηλαδή της απόστασης μεταξύ των ενεργών πλευρών). Οπότε έχουμε:

- I. Τυλίγματα με Ακέραιο βήμα και
- II. Τυλίγματα με Σμικρυμένο βήμα.

Όπως προείπαμε τα τυλίγματα μπορούν να πραγματοποιηθούν με ένα και με δύο μάτσα σε κάθε αυλάκι. Στα τυλίγματα με ένα μάτσο ανά αυλάκι οι αγωγοί κάθε αυλακιού αποτελούν ένα στοιχείο, ενώ στα τυλίγματα με δύο μάτσα ανά αυλάκι οι αγωγοί κάθε αυλακιού αποτελούν δύο στοιχεία.

Το βήμα των αυλακιών y_a είναι ίσο με το πολικό βήμα y_p στα τυλίγματα με βήμα ακέραιο:

$$y_a = y_p = \frac{N_a}{2 \cdot P}$$

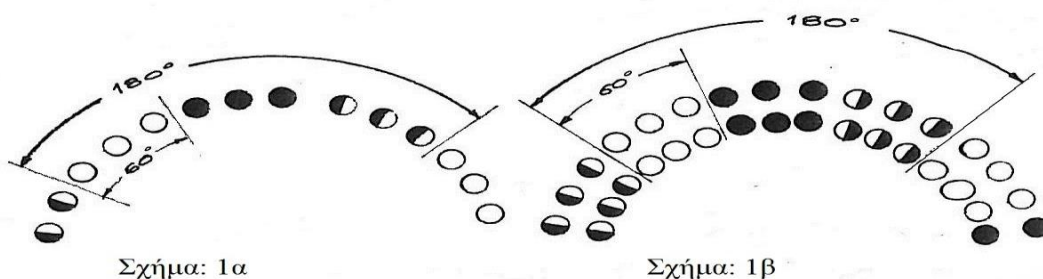
Όπου N_a το πλήθος των αυλακιών του στάτη και P οι πόλοι της μηχανής. Στα τυλίγματα με βήμα σμικρυνμένο το βήμα των αυλακιών y_a είναι πάντα μικρότερο του πολικού βήματος y_p :

$$y_a < \frac{N_a}{2 \cdot P}$$

Στα τυλίγματα με βήμα ακέραιο κάθε φάση συνήθως καταλαμβάνει το 1/3 του πολικού βήματος, δηλαδή τα στοιχεία κάθε φάσης είναι κατανεμημένα συνήθως ομοιόμορφα κατά μήκος μιας ζώνης 60 ηλεκτρικών μοιρών σχήμα 1α, 1β.

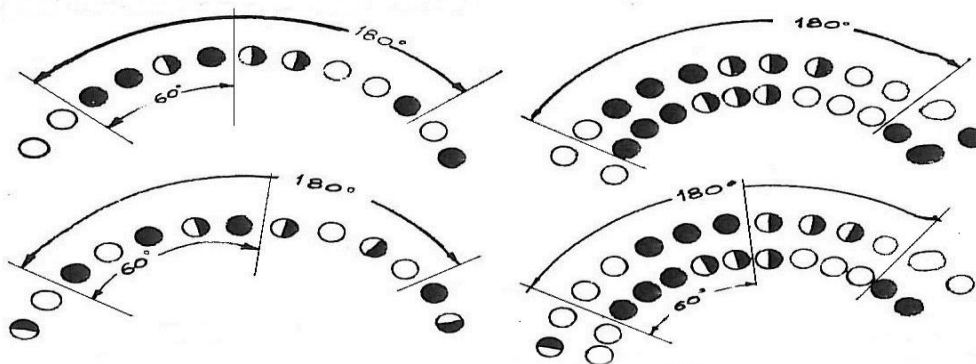
Στα τυλίγματα με βήμα σμικρυνμένο κάθε φάση καταλαμβάνει πάντα μια στρώση μεγαλύτερη του 1/3 του πολικού βήματος σχήμα 2α, 2β.

Το βήμα των τυλιγμάτων με ένα μάτσο / αυλάκι μπορεί να θεωρηθεί ακέραιο, όταν προκύπτει λίγο διαφορετικό από το πολικό βήμα y_p , αρκεί κάθε φάση να καταλαμβάνει συνέχεια το 1/3 του πολικού βήματος. Τόσο τα τυλίγματα με μια στρώση όσο και εκείνα με δύο στρώσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν με βήμα ακέραιο και βήμα κλασματικό. Συνήθως χρησιμοποιούμε το σμικρυνμένο βήμα για τα τυλίγματα με 2 στρώσεις.



Σχήμα: 1α

Σχήμα: 1β



Σχήμα: 2α

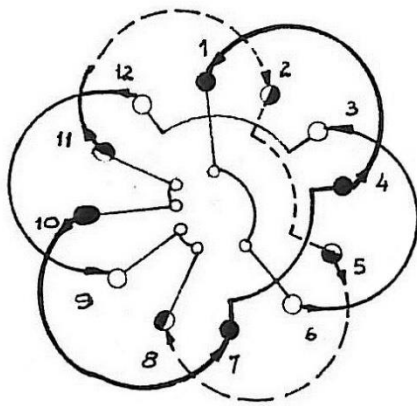
Σχήμα: 2β

6. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΚΕΡΑΙΟΥ & ΣΜΙΚΡΥΜΕΝΟΥ ΒΗΜΑΤΟΣ

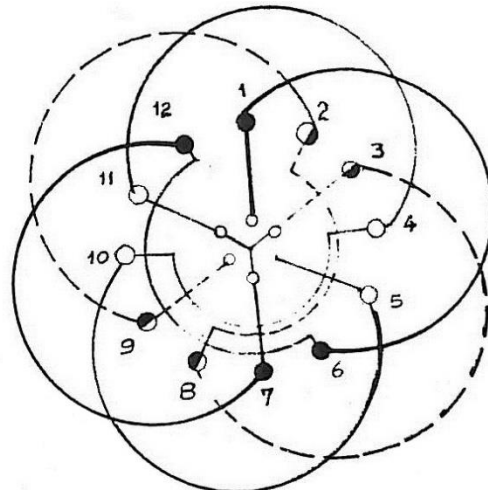
Στα τυλίγματα με βήμα ακέραιο το βήμα των αυλακιών καθορίζεται από τη σχέση:

$$q = \frac{Na}{3.2 * P}$$

Οι μετωπικές συνδέσεις των μάτσων γίνονται με βάση το βήμα του τυλίγματος y_a με τέτοιο τρόπο, ώστε να πετυχαίνουμε ίσο αριθμό συγκροτημάτων με τους πόλους ή τα ζεύγη πόλων για τυλίγματα με πόλους εναλλάξ ή ομώνυμους αντίστοιχα. Τα μάτσα κάθε συγκροτήματος συνδέονται πάντα σε σειρά μεταξύ τους. Τα συγκροτήματα κάθε φάσεως συνδέονται είτε σε σειρά είτε παράλληλα είτε σειρά – παράλληλα. Η πραγματοποίηση της συνδέσεως των συγκροτημάτων κάθε φάσεως γίνεται πολύ εύκολα με την τοποθέτηση τόξων στις μετωπικές συνδέσεις. Τα τόξα για κάθε συγκρότημα έχουν όλα την ίδια φορά στα τυλίγματα με ομώνυμους πόλους (σχήμα α), ενώ στα τυλίγματα με πόλους εναλλάξ έχουν αντίθετη φορά εναλλάξ (σχήμα β).



Σχήμα α



Σχήμα β

Στα τυλίγματα με πόλους εναλλάξ με ένα μάτσο / αυλάκι και με q ζυγό αριθμό, ο αριθμός των μάτσων σε κάθε συγκρότημα είναι το $1/2$ του αριθμού των αυλακιών ανά πόλο και φάση, ενώ στα τυλίγματα με ομώνυμους πόλους ο αριθμός των μάτσων σε κάθε συγκρότημα είναι ίσος με q . Στα τυλίγματα με πόλους εναλλάξ και με q μονό αριθμό τα συγκροτήματα από μάτσα κάθε φάσης δεν είναι όλα ίσα. Τα τυλίγματα με δύο μάτσα / αυλάκι γίνονται κυρίως βροχοειδή και κάθε μάτσο θα έχει πάντα μια πλευρά ενεργή στο πάνω στρώμα ενός συγκροτήματος και την άλλη στο κάτω στρώμα διαδοχικού συγκροτήματος της ίδιας φάσης ή αντίστροφα. Ακολούθως, τα στοιχεία του κάτω συγκροτήματος κάθε ζώνης θα πρέπει να συνδέονται με στοιχεία που αντιστοιχούν στο πάνω στρώμα της επόμενης ζώνης.

Στα τυλίγματα με βήμα σμικρμένο το βήμα των αυλακιών y_a είναι πάντα μικρότερο του πολικού βήματος y_p . Στα τυλίγματα με δύο μάτσα/αυλάκι και βήμα σμικρμένο τα στοιχεία του κάτω στρώματος ενός συγκροτήματος συνδέονται με εκείνα του πάνω στρώματος διαδοχικού συγκροτήματος της ίδιας φάσης. Σε αυτά τα τυλίγματα έχουμε μείωση

κατά ένα αυλάκι της εξάπλωσης του συγκροτήματος κάθε φάσης, όταν μειώνουμε το βήμα των αυλακιών κατά μία μονάδα.

7. ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΑΚΡΩΝ ΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ

Τα άκρα των φάσεων μπορούν να συνδεθούν:

- Σε Αστέρα
- Σε Τρίγωνο
- Σε Διπλό αστέρα
- Σε διπλό τρίγωνο

Οι αρχές και τα πέρατα των φάσεων συνδέονται σε ακροδέκτες που είναι τοποθετημένοι συνήθως σε μία μονωμένη πλάκα στην εξωτερική πλευρά του σκελετού. Οι αρχές των τριών φάσεων δηλώνονται με τα γράμματα U, V, W και τα πέρατα με τα γράμματα x, y, z. Το τυλιγμά U – x αποτελεί την πρώτη φάση, το V – y τη δεύτερη φάση και το W – z την τρίτη φάση.

Οι τριφασικοί κινητήρες μπορεί να έχουν 3, 6 ή 12 ακροδέκτες. Η διάταξη των 3 ακροδεκτών χρησιμοποιείται όταν η σύνδεση σε αστέρα ή τρίγωνο έχει γίνει εσωτερικά στη μηχανή. Σε αυτή την περίπτωση ο κινητήρας λειτουργεί κανονικά με την τάση που αναγράφεται στην ταμπέλα. Η διάταξη των 6 ακροδεκτών επιτρέπει την σύνδεση των τυλιγμάτων σε αστέρα και τρίγωνο. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να εφαρμόσουμε 2 τάσεις διαφορετικές, V σε τρίγωνο και $\sqrt{3} \cdot V_{\pi}$ σε αστέρα.

Η διάταξη των 12 ακροδεκτών δίνει τη δυνατότητα συνδέσεως των τυλιγμάτων:

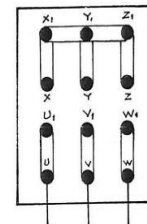
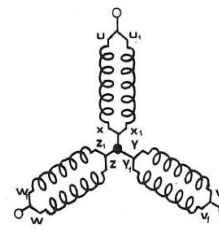
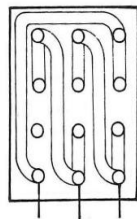
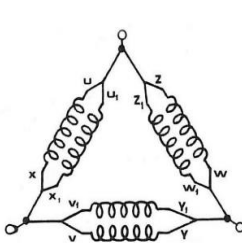
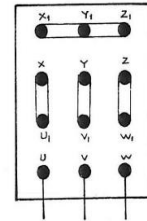
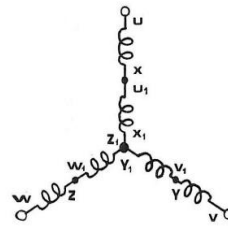
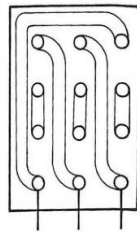
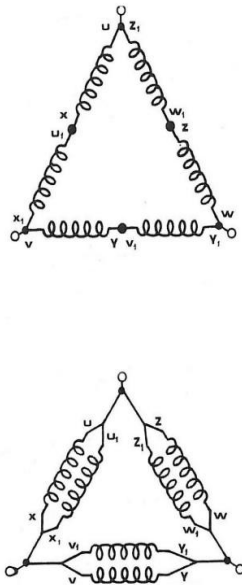
- Σε Αστέρα
- Σε Τρίγωνο
- Σε Διπλό αστέρα
- Σε διπλό τρίγωνο

Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να εφαρμόσουμε 4 διαφορετικές τάσεις:

- $V \cdot \sqrt{3}$ στον Αστέρα
- V στο Τρίγωνο
- $\frac{V \times \sqrt{3}}{2}$ στο Διπλό Αστέρα
- $\frac{V}{2}$ στο Διπλό Τρίγωνο

- Όταν συνδέουμε τους ακροδέκτες z, x και y όπως φαίνεται στο σχήμα, τότε οι φάσεις συνδέονται κατά αστέρα. Στους τρεις ακροδέκτες συνδέεται το τριφασικό δίκτυο. Όταν το δίκτυο αποτελείται από τέσσερις αγωγούς, ο ουδέτερος αγωγός συνδέεται στον ουδέτερο κόμβο την μηχανής (z-x-y).

- Η σύνδεση κατά τρίγωνο πραγματοποιείται με την τοποθέτηση τριών ελασμάτων όπως φαίνεται στο σχήμα 3. Με το σύστημα των 12 άκρων η διαφοροποίηση στις συνδέσεις γίνεται με την αλλαγή των ελασμάτων στη σύνδεση των ακροδεκτών στην πινακίδα.
- Το σχήμα 3 δείχνει τη σχηματική συνδεσμολογία και την διάταξη των ελασμάτων για την σύνδεση των φάσεων σε τρίγωνο και για την σύνδεση σε διπλό τρίγωνο.
- Το σχήμα 4 δείχνει τη σχηματική συνδεσμολογία και τη διάταξη των ελασμάτων για τη σύνδεση των φάσεων σε αστέρα και για την σύνδεση σε διπλό αστέρα.



Σχήμα 3

Σχήμα 4

8. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Στον στάτη της μηχανής εφαρμόζεται τριφασικό σύστημα τάσεων με αποτέλεσμα οι αγωγοί του να διαρρέονται από τριφασικό σύστημα ρευμάτων. Αυτά τα ρεύματα παράγουν το πεδίο του στάτη B_s που περιστρέφεται με ανθρολογιακή φορά και με ταχύτητα:

$$n_{sync} = \frac{60 * f_e}{P}$$

όπου n_{sync} η σύγχρονη ταχύτητα του μαγνητικού πεδίου του στάτη σε rpm (revolution per minute), f_e η συχνότητα του συστήματος σε Hz και P τα ζεύγη 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 εξαρτάται από:

- Την Μαγνητική ροή

- Την Ταχύτητα Περιστροφής και
 - Τα Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά της μηχανής
- Και δίνεται από την εξίσωση :

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

όπου v η σχετική ταχύτητα των αγωγών του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο, B η μαγνητική επαγωγή του πεδίου του στάτη, l το μήκος του αγωγού του δρομέα.

Η επαγόμενη ροπή στη μηχανή εξαρτάται από:

- Τη Μαγνητική Επαγωγή του Δρομέα
- Τη Μαγνητική Επαγωγή του Στάτη
- Το ημίτονο της μεταξύ τους γωνίας και
- Τα Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά της μηχανής

Και δίνεται από τη σχέση :

$$\tau_{ind} = k \cdot B_R \times B_S$$

όπου B_S το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη, B_R το μαγνητικό πεδίο του δρομέα.

Ο δρομέας στρέφεται με την ίδια φορά που στρέφεται το μαγνητικό πεδίο του στάτη, αλλά η ταχύτητα του ποτέ δεν γίνεται ίση με την σύγχρονη, επειδή σε μία τέτοια περίπτωση δεν θα υπήρχε σχετική κίνηση των αγωγών του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη και δεν θα αναπτυσσόταν τάση εξ επαγωγής στα άκρα τους. Εάν η τάση e_{ind} ήταν μηδενική, οι αγωγοί του δρομέα δε θα διαρρέονταν από ρεύμα και δεν θα αναπτυσσόταν μαγνητικό πεδίο στον δρομέα. Η επαγόμενη ροπή θα ήταν μηδενική και θα επακολουθούσε επιβράδυνση του δρομέα λόγω των απωλειών τριβής. Έτσι, ένας επαγωγικός κινητήρας μπορεί να περιστρέφεται με ταχύτητα πολύ κοντά στην σύγχρονη ταχύτητα, αλλά δεν είναι ποτέ δυνατό να περιστρέφεται με ταχύτητα ακριβώς ίση με αυτήν.

9. ΟΛΙΣΘΗΣΗ ΔΡΟΜΕΑ

Η τάση που επάγεται σε κάποιον από τους αγωγούς του δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα εξαρτάται από τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς τα μαγνητικά πεδία. Όμως, επειδή η συμπεριφορά ενός επαγωγικού κινητήρα εξαρτάται από τις τάσεις και τα ρεύματα του δρομέα, γίνεται αναφορά για την παραπάνω σχετική ταχύτητα. Δύο είναι συνήθως τα μεγέθη που περιγράφουν τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς τα μαγνητικά πεδία. Το πρώτο από αυτά είναι η ταχύτητα ολίσθησης (slip speed), που ορίζεται ως η διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από την σύγχρονη ταχύτητα και δίνεται από την εξίσωση:

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

με n_{slip} η ταχύτητα ολίσθησης της μηχανής και n_m η μηχανική ταχύτητα του άξονα περιστροφής.

Το δεύτερο μέγεθος με το οποίο εκφράζεται η σχετική κίνηση είναι η ολίσθηση (slip) και ουσιαστικά πρόκειται για σχετική ταχύτητα ολίσθησης εκφρασμένη σε εκατοστιαία ή σε ανά μονάδα (per-unit) βάση. Έτσι, η ολίσθηση ορίζεται από τη σχέση:

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} \cdot 100\%$$

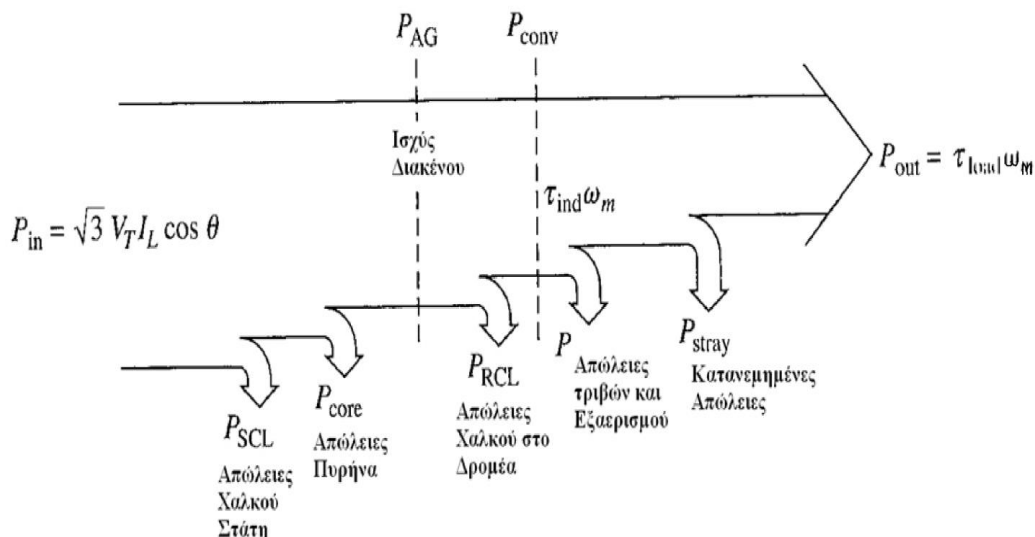
Η ταχύτητα περιστροφής του άξονα της μηχανής μπορεί να εκφραστεί μέσω της ολίσθησης και της σύγχρονης ταχύτητας με την εξίσωση:

$$n_m = (1 - s) \cdot n_{sync}$$

Σημείωση: Εάν ο δρομέας περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα, είναι $s = 0$, ενώ, εάν ο δρομέας είναι ακίνητος, είναι $s = 1$.

10. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ & ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ο επαγωγικός κινητήρας λειτουργεί ως στρεφόμενος μετασχηματιστής. Η είσοδος του αποτελεί τριφασικό σύστημα τάσεων και ρευμάτων. Σε έναν κανονικό μετασχηματιστή η ηλεκτρική ισχύς εξόδου είναι η ισχύς στο δευτερεύον τύλιγμα. Στον επαγωγικό κινητήρα το δευτερεύον τύλιγμα (ο δρομέας) είναι βραχυκυκλωμένο και έτσι δεν εμφανίζεται ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της μηχανής. Αντίθετα, η ισχύς εξόδου του κινητήρα είναι μηχανική. Η σχέση ανάμεσα στην ηλεκτρική ισχύ εισόδου και στη μηχανική ισχύ εξόδου του εν λόγω κινητήρα παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής ισχύος του (σχήμα 5).

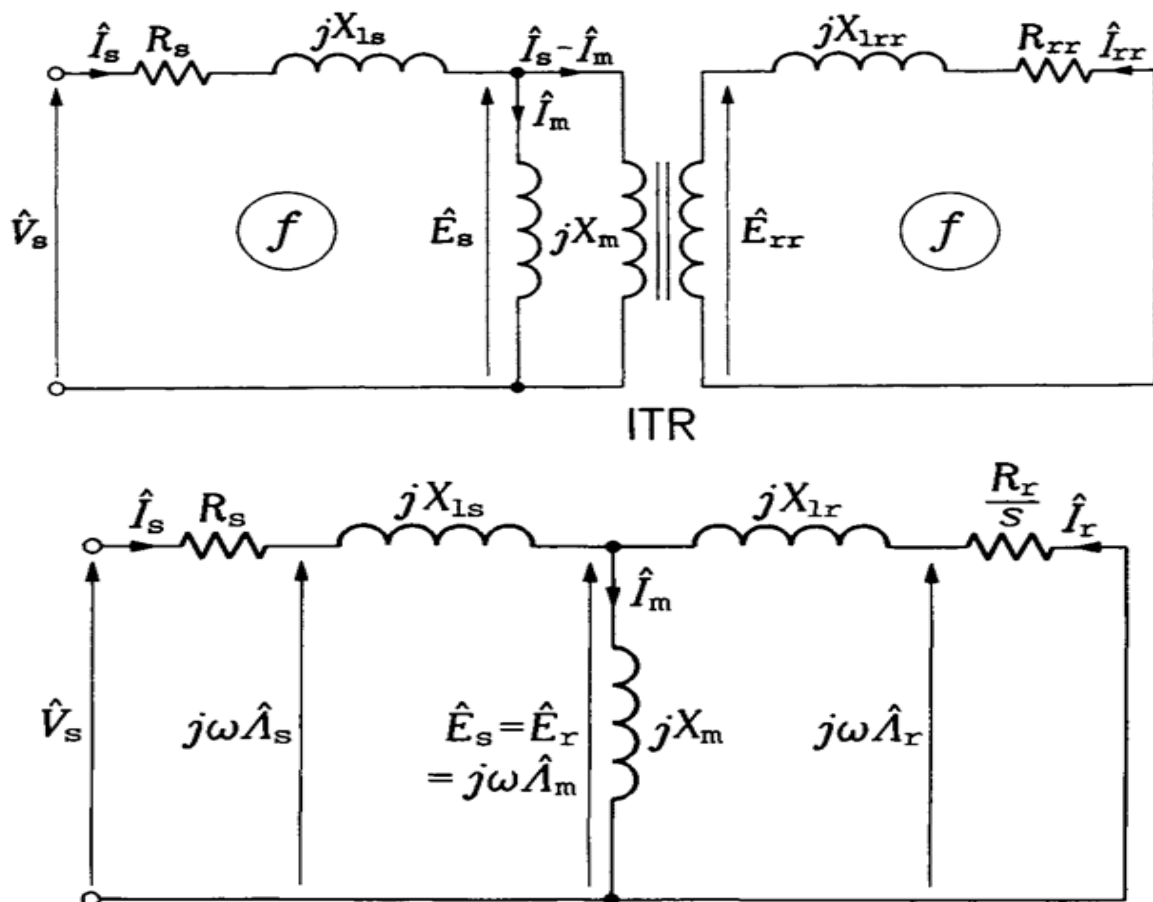


Σχήμα 5 : Το διάγραμμα ροής ισχύος ενός επαγωγικού κινητήρα.

Η ηλεκτρική ισχύς εισόδου στον κινητήρα P_{in} έχει την μορφή τριφασικού συστήματος τάσεων και ρευμάτων. Το πρώτο είδος απωλειών που υπολογίζεται στον κινητήρα είναι οι ωμικές (I^2R) απώλειες στο τύλιγμα του στάτη (απώλειες χαλκού στο στάτη – P_{SCL}). Έπειτα, κάποιο ποσό ισχύος χάνεται με την μορφή απωλειών υστέρησης και απωλειών εξαιτίας των δινορρευμάτων στο στάτη (P_{core}). Η ισχύς που απομένει μεταφέρεται στο δρομέα της μηχανής περνώντας από το διάκενο που υπάρχει μεταξύ του στάτη και του δρομέα. Αυτή η ισχύς ονομάζεται ισχύς διακένου P_{AG} της μηχανής (air – gap power). Ένα μέρος της ισχύος που μεταφέρεται στον δρομέα χάνεται με την μορφή ωμικών απωλειών (I^2R) στα τυλίγματα του δρομέα (απώλειες χαλκού στον δρομέα – P_{RCL}), ενώ η ισχύς που απομένει μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική (P_{conv}). Από αυτή την ισχύ αφαιρούνται τελικά οι απώλειες τριβής και εξαερισμού $P_{F\&W}$, καθώς και οι κατανεμημένες απώλειες P_{misc} . Η εναπομείνουσα μηχανική ισχύ αποτελεί την ισχύ εξόδου P_{out} της μηχανής.

11. ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

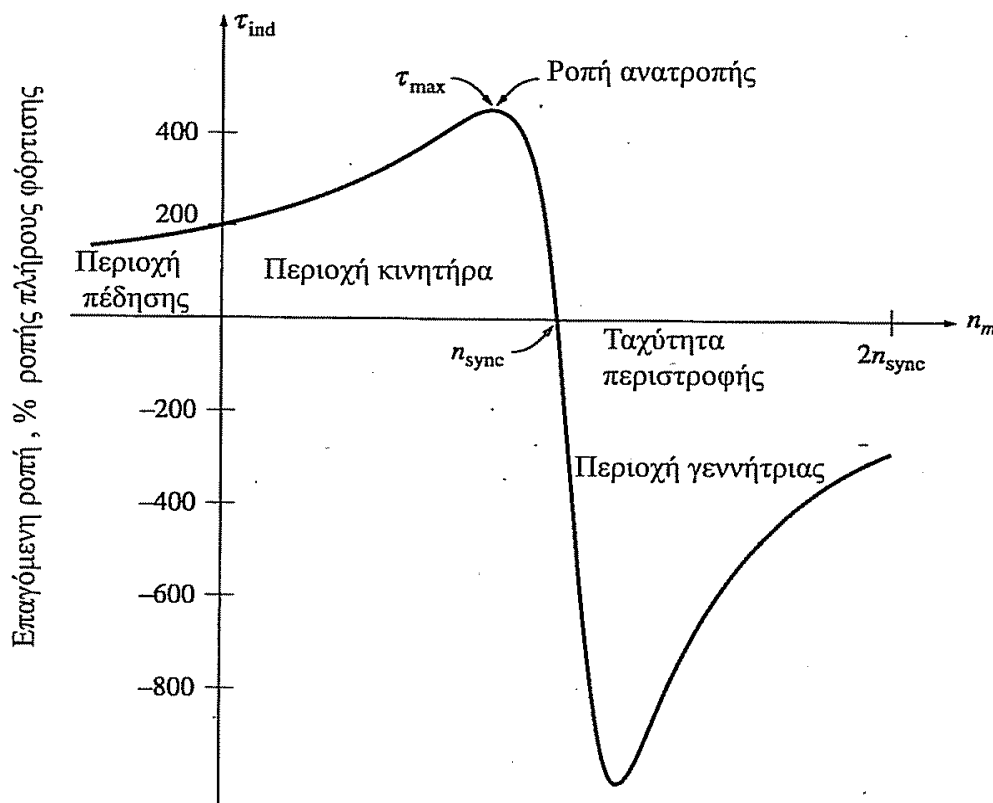
Όπως σε έναν μετασχηματιστή γίνεται επαγωγή της τάσης στο δευτερεύον κύκλωμα έτσι και στον επαγωγικό κινητήρα πραγματοποιείται επαγωγή της τάσης στον δρομέα. Η διαφορά είναι ότι στο δρομέα του κινητήρα δεν υπάρχει ηλεκτρική ισχύς αλλά μηχανική. Τον επαγωγικό κινητήρα θα μπορούσαμε να τον εξομοιώσουμε με ένα ισοδύναμο κύκλωμα παρόμοιο με αυτό του μετασχηματιστή.



Σχήμα 1: Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα. Στην πρώτη εικόνα απεικονίζεται πραγματικό ισοδυναμο. Στην δεύτερη το τελικό ισοδύναμο.

12. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΡΟΠΗΣ-ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Από τη χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-ταχύτητας που φαίνεται στο σχήμα 6 μπορούμε να αντλήσουμε τις παρακάτω πληροφορίες:



Σχήμα 6 : Η χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας του επαγωγικού κινητήρα, όπου φαίνονται η περιοχή πέδησης και η περιοχή λειτουργίας.

- Η επαγόμενη ροπή του επαγωγικού κινητήρα είναι μηδενική στη σύγχρονη ταχύτητα.
- Αν ο δρομέας του κινητήρα περιστρέφεται με ταχύτητα μεγαλύτερη από την σύγχρονη ταχύτητα, η φορά περιστροφής της επαγόμενης ροπής αντιστρέφεται, με αποτέλεσμα η μηχανή να λειτουργεί ως γεννήτρια.
- Αν η φορά περιστροφής του κινητήρα είναι αντίθετη από τη φορά περιστροφής των μαγνητικών πεδίων στο εσωτερικό του, η επαγόμενη ροπή θα σταματήσει τον κινητήρα και θα προσπαθήσει να τον περιστρέψει προς την αντίθετη φορά. Αυτό το στοιχείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με σκοπό το απότομο σταμάτημα του κινητήρα που ονομάζεται ακαριαία πέδηση (plugging).
- Υπάρχει μία μέγιστη ροπή που είναι αδύνατο να ξεπεραστεί. Αυτή η ροπή ονομάζεται ροπή ανατροπής ή ροπή κατάρρευσης (pullout–breakdown torque) και είναι δύο έως τρεις φορές μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή του κινητήρα κατά την πλήρη φόρτιση.

- Η ροπή εκκίνησης του κινητήρα είναι λίγο μεγαλύτερη από την ροπή κατά την πλήρη φόρτιση. Έτσι, ο επαγωγικός κινητήρας μπορεί να ξεκινήσει με οποιοδήποτε από τα φορτία που είναι ικανός να κινήσει στη λειτουργία υπό πλήρη ισχύ.

13. ΚΛΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Με την μεταβολή των χαρακτηριστικών του δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα είναι δυνατή η υλοποίηση μεγάλης ποικιλίας χαρακτηριστικών ροπής – ταχύτητας. Με σκοπό να βοηθήσουν τη βιομηχανία στην επιλογή των κατάλληλων κινητήρων σε διαφορετικές εφαρμογές και σε όλα τα εύρη ισχύος, η NEMA στις ΗΠΑ και η International Electrotechnical Commission (IEC) στην Ευρώπη έχουν θεσπίσει μια σειρά από τυποποιημένες σχεδιάσεις κινητήρων με διαφορετικές χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας. Οι τυποποιημένες αυτές σχεδιάσεις ονομάζονται κλάσεις σχεδίασης (design classes). Οι κλάσεις αυτές και οι ιδιότητες τους αναλύονται παρακάτω:

- **ΚΛΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ A:** Οι κινητήρες κλάσης A είναι κινητήρες με τυποποιημένη σχεδίαση που παρουσιάζουν κανονική ροπή εκκίνησης, κανονικό ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση. Το σημαντικότερο πρόβλημα αυτής της κλάσης σχεδίασης είναι το υψηλό ρεύμα εκκίνησης. Τα τυπικά ρεύματα εκκίνησης για τέτοιους κινητήρες είναι 500% ως 800% του ονομαστικού ρεύματος. Για τέτοιου είδους κινητήρες με μέγεθος από 7,5 hp θα πρέπει να χρησιμοποιείται μία μέθοδος μείωσης της τάσης κατά την εκκίνηση, για να μην έχουμε μεγάλες πτώσεις τάσης. Στο παρελθόν οι κινητήρες κλάσης A σχεδιάζονταν για εφαρμογές κάτω από 7,5 hp και πάνω από 200 hp. Στις μέρες μας έχουν αντικατασταθεί από τους κινητήρες κλάσης B που θα αναλυθούν παρακάτω. Τυπικές εφαρμογές αυτών των κινητήρων είναι η οδήγηση ανεμιστήρων, φουσερών, αντλιών, τόνων και άλλων εργαλειομηχανών.
- **ΚΛΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ B:** Οι κινητήρες αυτοί έχουν κανονική ροπή εκκίνησης, μικρότερο ρεύμα εκκίνησης (σε σχέση με τους κινητήρες κλάσης A) και χαμηλή ολίσθηση. Οι εφαρμογές αυτών των κινητήρων είναι παρόμοιες με αυτές των κινητήρων κλάσης A, μόνο που προτιμούνται εξαιτίας του μικρότερου ρεύματος εκκίνησης.
- **ΚΛΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ C:** Οι κινητήρες κλάσης C παρουσιάζουν μεγάλη ροπή εκκίνησης, μικρό ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση στη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο (μικρότερη από 5%). Η ροπή ανατροπής είναι λίγο μικρότερη από αυτή των κινητήρων κλάσης A. Οι κινητήρες αυτού του είδους κατασκευάζονται με διπλό δρομέα και έτσι είναι ακριβότεροι από τους κινητήρες των προηγούμενων κλάσεων. Οι κινητήρες αυτοί συνήθως χρησιμοποιούνται σε φορτία που απαιτούν υψηλή ροπή εκκίνησης, όπως φορτισμένες αντλίες, συμπιεστές, μεταφορείς και άλλα παρόμοια φορτία.

- **ΚΛΑΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ D:** Οι κινητήρες κλάσης D έχουν πάρα πολύ μεγάλη ροπή εκκίνησης (πάνω από 275% της ονομαστικής ροπής) και μικρό ρεύμα εκκίνησης, αλλά παρουσιάζουν υψηλή ολίσθηση στη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο. Ουσιαστικά, πρόκειται για απλούς επαγωγικούς κινητήρες κλάσης A, που διαθέτουν όμως ράβδους μικρότερης διατομής κατασκευασμένες από υλικό μεγαλύτερης αντίστασης. Η μεγάλη αντίσταση στον δρομέα μετακινεί τη μέγιστη ροπή σε πολύ μικρή ταχύτητα. Επίσης, είναι δυνατή η μετακίνηση της μέγιστης ροπής στη μηδενική ταχύτητα. Η ολίσθηση αυτών των κινητήρων στην πλήρη φόρτιση είναι αρκετά υψηλή λόγω της μεγάλης αντίστασης του δρομέα που διαθέτουν. Αυτού του είδους οι κινητήρες έχουν εφαρμογή στην επιτάχυνση φορτίων με μεγάλη αδράνεια όπως οι ιδιαίτερα μεγάλοι σφόνδυλοι που χρησιμοποιούνται σε διατρητικές πρέσες ή ψαλίδια.

14. ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Ο σκοπός της μόνωσης στον στάτη ενός επαγωγικού κινητήρα είναι η αντοχή της τάσης ανάμεσα στις στροφές των τυλιγμάτων, ανάμεσα σε κάθε τυλίγμα, στις φάσεις, στην φάση και στην γείωση δημιουργώντας έτσι μια κατάλληλη διαδρομή του ρεύματος μέσα από τα τυλίγματα του στάτη. Σε έναν δακτυλιοφόρο δρομέα μονώνουμε μεταξύ τους τα δαχτυλίδια σύνδεσης. Επιπλέον τα ελάσματα του στάτη μονώνονται το κάθε μεταξύ τους για μείωση των δινορευμάτων. Το μέγεθος της μόνωσης σε κάθε έλασμα είναι (0,013mm). Επίσης και στον δρομέα του κινητήρα, εκτός αν η ολίσθηση είναι μικρή οπότε ενδέχεται να μην χρειαστεί μόνωση. Μια σημαντική μόνωση είναι η μόνωση του ρουλεμάν. Με αυτή την μόνωση πετυχαίνουμε μείωση της τάσης ρουλεμάν στάτη, ειδικά για μεγάλες μηχανές που έχουμε μία επιτρεπτή ροή διαφυγής. Με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνουμε πρόληψη ζημιών στο ρουλεμάν ειδικά για μηχανές που τροφοδοτούνται από PWM, όπου με την εφαρμογή μεγάλων συχνοτήτων δημιουργείται μεγάλο χωρητικό ρεύμα που περνά μέσα από το ρουλεμάν. Η μόνωση των τυλιγμάτων του στάτη χωρίζεται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τους αγωγούς των τυλιγμάτων:

- Τυχαία - δακτύλιοι αγωγοί (μικρή, κυκλική αγωγοί).
- Φορμαριστή-δακτύλιοι αγωγοί (ορθογώνιοι μεγάλη αγωγοί).

Η μόνωση της επαγωγικής μηχανής υπόκειται σε δοκιμές βάση διεθνών κανονισμών. Η τάση δοκιμής θα πρέπει να είναι 2 φορές η ονομαστική τάση συν 1000 V για 1 λεπτό. Το σύστημα μόνωσης εξαρτάται από την τάση τροφοδοσίας και την θερμοκρασία. Το ρεύμα που ρέει μέσα στα τυλίγματα του στάτη θα δημιουργήσει θερμότητα. Αυτή η θερμότητα θα πρέπει να περιοριστεί ανάλογα με την θερμική ικανότητα της οργανικής μόνωσης και τη χημική σταθερότητα, για την πρόληψη σφαλμάτων. Η μόνωση σε έναν κινητήρα διαβρώνεται με τον καιρό. Αυτό προκαλείται από την εσωτερική χημική αντίδραση, από την μόλυνση του κινητήρα και τις χημικές αλληλεπιδράσεις. Η θερμοκρασία στον κινητήρα υποβαθμίζει το σμάλτο, βερνίκι ή ρητίνη στα τυλίγματα, δημιουργώντας ρωγμές με αποτέλεσμα να υπάρχει μείωση της διηλεκτρικής αντοχής. Τα μονωτικά υλικά κατανομούνται ανάλογα με την κλάση θερμοκρασίας τους. Η κλάση θερμοκρασίας της μόνωσης είναι:

A: 105°C

B: 130°C

F: 155°C

G: 180°C

Σε έναν κινητήρα με random-wound περιέλιξη τυλιγμάτων τα καλώδια στα πηνία είναι μονωμένα. Επίσης υπάρχει μόνωση ανάμεσα στα τοιχώματα των αυλακιών και τα πηνία, και στην φάση. Η μόνωση είναι πολλά στρώματα μαζί πάχους 0,025mm. Το σμάλτο στα καλώδια γίνεται με τον αγωγό να περνά μέσα από πολυμερισμένη ρητίνη και στην συνέχεια θερμαίνεται όπου μετατρέπεται σε ένα λεπτό, σκληρό και ελαστικό στρώμα. Υπάρχουν ειδικά πρότυπα που αναφέρονται στο σμάλτο των αγωγών (ASTMD-1676). Το σύστημα δοκιμών της μόνωσης (motorettes) είναι σύμφωνα με το πρότυπο IEEE για μικρούς κινητήρες. Επίσης για μεγάλους και μεσαίους αγωγούς χρησιμοποιούμε πάλι πρότυπο της IEEE (IEEE 275) με το σύστημα μόνωσης formette, παρόμοιο με το motorettes. Η δοκιμή γίνεται με αύξηση της θερμοκρασίας στους αγωγούς επιτυγχάνοντας έτσι την γήρανση της μόνωσης στους αγωγούς. Η εφαρμοζόμενες θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερες από την θερμοκρασία λειτουργίας του κινητήρα.

Η τοποθέτηση των πηνίων θα πρέπει να γίνει με προσοχή λόγο του ότι το σμάλτο στους αγωγούς τεντώνεται και γρατσουνίζεται. Μερικά βερνίκια εφαρμόζονται μετά την τοποθέτηση των τυλιγμάτων. Το βερνίκι στα τυλίγματα προστατεύει από την μόλυνση, την υγρασία, την χημική αντίδραση. Επίσης προσφέρει και μηχανική υποστήριξη. Σε έναν κινητήρα κλάσης A η μόνωση ανάμεσα στην φάση και στα αυλάκια είναι φύλλα εύκαμπτα πάχους 0,125mm - 0,25 mm ή πολυεστέρας. Επίσης σε μερικές περιπτώσεις γίνεται επίστρωση με ηλεκτροστατική έλξη λιωμένης ρητίνης ή πολυμερισμένη πούδρα. Σε κινητήρα κλάσης F,H η μόνωση γίνεται με μίκα ή επεξεργασμένο αμίαντο.

Σε κινητήρες μεγάλης ισχύος όπου τα τυλίγματα είναι εφαρμοστά έχουμε αύξηση του fill factor λόγο των ορθογώνιων αγωγών και αυλακιών. Η εφαρμογή της μόνωσης γίνεται πριν την τοποθέτηση στα αυλάκια. Η μόνωση στα αυλάκια είναι από περιτύλιγμα συνθετικής μίκας ή ταινίας με ινώδες φύλλο για 1kV - 2 kV.

Οι εκκενώσεις που μπορούν να δημιουργηθούν από την διαφορά δυναμικού στον κινητήρα έχουν σαν συνέπεια την καταστροφή την μόνωσης. Για την αποφυγή των εκκενώσεων τοποθετούμε μίκα. Επίσης για την αποφυγή εκκενώσεων στο αυλάκια χρησιμοποιείται ένα αγωγίμο χρώμα για να εμπλουτίσουμε το κενό ανάμεσα στα τοιχώματα από τα αυλάκια και στην μόνωση τυλιγμάτων.

15. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

A. Διαστασιολόγηση του κινητήρα

$$Dis = \sqrt[3]{\frac{2\pi \pi Sgap}{\pi \lambda f Co}}$$

$$Sgap = \frac{K_E Pn}{nN \cos\varphi}$$

$$K_E = \frac{E_A}{V\varphi} \approx 0,98 - 0,005 \pi i = 0,97$$

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

Πίνακας 1.1 Ο λόγος του μήκους του πυρήνα προς το πολικό βήμα

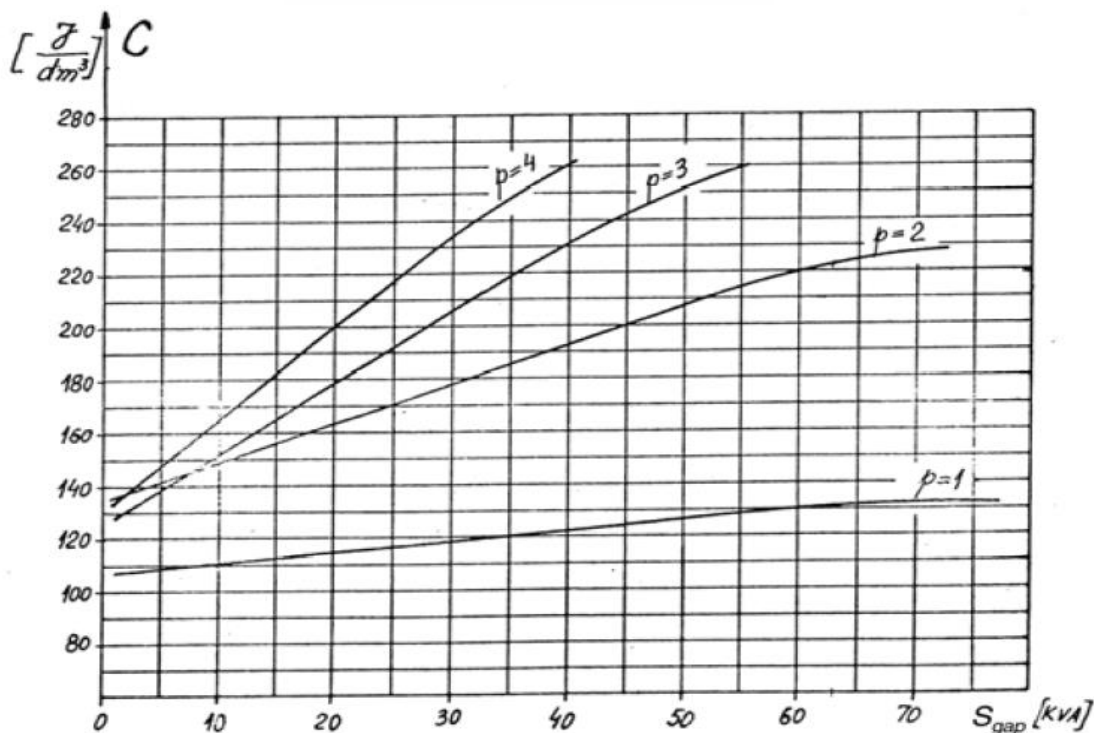
Η φαινόμενη ισχύς διακένου είναι ίση με:

$$S_{gap} = \frac{K_E P n}{n N \cos \varphi} = \frac{0,97 * 3000}{0,865 * 0,82} = 4102,63VA$$

Η σταθερά Esson (C_o) την λαμβάνεται από τον πίνακα 6.2.

Στην πραγματικότητα η σταθερά Esson δεν είναι σταθερή, λόγο ότι το φορτίο ρεύματος στάτη (A_1) και η πυκνότητα ροής διακένου (B_g) αυξάνουν με την ροπή της μηχανής και τον αριθμό των πόλων. Επίσης η σταθερά Esson αντλείται και από τον παρακάτω τύπο:

$$C_o = K_f \alpha_i K_{w1} \pi^2 A_1 B_g = \frac{60 S_{gap}}{D_{is}^2 L n_1}$$



Πίνακας Σφάλμα! Δεν υπάρχει κείμενο καθορισμένου στυλ στο έγγραφο..2

Σταθερά Esson (C_o) σε σχέση με την ισχύ διακένου

Για $S_{gap}=4102,63 \text{ VA}$, το $C_o=139 \cdot 10^3 \text{ J/m}^3$ και λ είναι ίσο με 1,5

$$Dis = \sqrt[3]{\frac{2\pi i \pi S_{gap}}{\pi \lambda f C_o}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 4102,63}{\pi \cdot 1,5 \cdot 50 \cdot 139000}} = 0,10 \text{ m} = 10 \text{ cm}$$

Το πολικό βήμα είναι ίσο με :

$$\tau = \frac{\pi Dis}{2 \pi i} = \frac{\pi \cdot 0,10}{2 \pi i} = 0,078 \text{ m} = 7,8 \text{ cm}$$

Το βήμα αυλακιών δίνεται από τον τύπο

$$\tau_s = \frac{\tau}{3q} \quad (6.05)$$

το q είναι ο αριθμός των αυλακιών ανά πόλο και ανά φάση. Για q ίσο με 3, το βήμα αυλακιών γίνεται:

$$\tau_s = \frac{\tau}{3q} = \frac{0,078}{3 \cdot 3} = 0,0086 \text{ m} = 8,6 \text{ mm}$$

Το μήκος του πυρήνα θα υπολογιστεί από την σχέση:

$$\lambda = \frac{L}{\tau} \Leftrightarrow L = \lambda \cdot \tau = 1,5 \cdot 0,078 = 0,11 \text{ m}$$

Για κινητήρες μικρότερους από 100 kW, ο λόγος Dis/D_{out} είναι ίσο με K_D . Το K_D εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων. Το K_D δίνεται από τον πίνακα 6.3

$2p_1$	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

Πίνακας 1.3 Ο λόγος της εσωτερικής διαμέτρου προς την εξωτερική διάμετρο.

Για p_1 ίσο με 2, το K_D παίρνει τις τιμές από 0,61 έως 0,63. Θα παρθεί μία ενδιάμεση τιμή.

Άρα το εξωτερική διάμετρος πυρήνα είναι

$$\frac{Dis}{D_{out}} = 0,62 \Rightarrow D_{out} = \frac{Dis}{0,62} = \frac{0,10}{0,62} = 0,16 \text{ m}$$

Το διάκενο λαμβάνεται από τους εξής τύπους:

$$g = (0,1 + 0,02 \cdot \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad \text{for } 2p_1 = 2$$

$$g = (0,1 + 0,012 \cdot \sqrt[3]{P_n}) \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad \text{for } 2p_1 \geq 2$$

Για p_i ίσο με 2, το διάκενο είναι

$$g = (0.1 + 0.012\sqrt[3]{Pn})10^{-3} = (0.1 + 0.012\sqrt[3]{3000})10^{-3} = 0.35 * 10^{-3} m = 0.35mm$$

ΣΤΑΤΗΣ

B. Τυλίγματα στάτη

Θα ξεκινήσουμε με τον υπολογισμό τον αριθμό των αυλακιών του στάτη. Για τον υπολογισμό θα χρησιμοποιείτε ο τύπος:

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

Όπου m ο αριθμός των φάσεων.

$$Ns = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 = 36$$

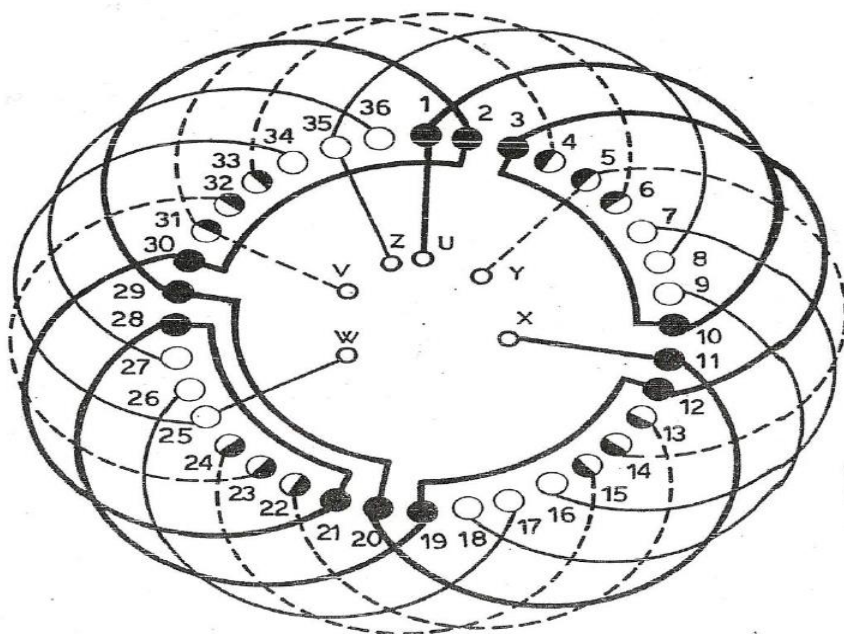
Θα πρέπει να ο λόγος των αριθμών αυλακιών του στάτη ανά των αριθμό των φάσεων να είναι ακέραιος.

$$\frac{Ns}{m} = \text{ακέραιο}$$

Το πολικό βήμα του IM είναι:

$$y = \frac{36}{2 \cdot 2} = 9$$

Θα φτιαχτεί ένα τύλιγμα 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:

$$a_{ec} = \frac{2\pi \cdot r_i}{N_s} = \frac{2\pi 2}{36} = \frac{\pi}{9} = 20 \text{ μοίρες}$$

Ο συντελεστής ζώνης θα δίνεται από την σχέση:

$$K_q = \frac{\sin \frac{q \cdot a}{2}}{q \cdot \sin \frac{a}{2}} = \frac{\sin \frac{3 \cdot 20}{2}}{3 \cdot \sin \frac{20}{2}} = 0,959$$

Λόγο ότι χρησιμοποιείται στρώμα ενός επιπέδου ο συντελεστής κουρδίσματος χορδής είναι ίσος με 1 ($K_y=1$).

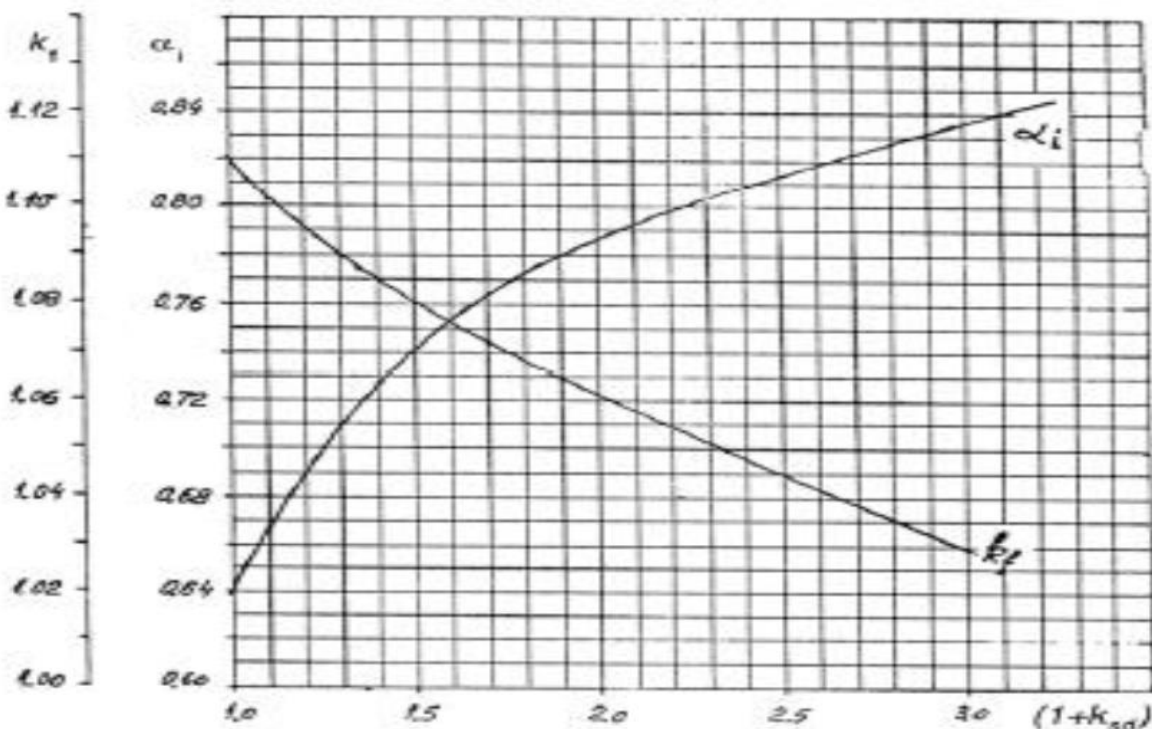
Ο συντελεστής τυλίγματος δίνεται από τον τύπο:

$$K_w = K_t = K_q \cdot K_y = 0,959 \cdot 1 = 0,959 = 0,96$$

Στην συνέχεια θα υπολογίσουμε των αριθμών στροφών ανά φάση. Ο αριθμός των στροφών ανά φάση βασίζεται στην μαγνητική ροή που περνά από τον στάτη στον δρομέα. Η μαγνητική ροή δίνεται από τον τύπο:

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

Όπου τ το πολικό βήμα, L το μήκος του πυρήνα στάτη, B_g η πυκνότητα ροής του διακένου. Η σταθερά a_i ονομάζεται flux density shape factor, αυτή εξαρτάται από την μαγνητικό κορεσμό στα δόντια. Προσδιορίζεται από την παρακάτω γραφική παράσταση:



Η σταθερά a_i όπως βλέπουμε στο παραπάνω σχήμα εξαρτάται από το συντελεστή κορεσμού δοντιών $(1+K_{st})$. Η σταθερά K_f ονομάζεται form factor και εξαρτάται από τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του υλικού του πυρήνα.

Θεωρώντας το $1+K_{st}=1,5$ το a_i θα γίνει ίσο με 0,740 και το K_f είναι ίσο με 1,08.

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

$$\begin{aligned} B_g &= (0.5 - 0.75)T \quad \text{for } 2p_1 = 2 \\ B_g &= (0.65 - 0.78)T \quad \text{for } 2p_1 = 4 \\ B_g &= (0.7 - 0.82)T \quad \text{for } 2p_1 = 6 \\ B_g &= (0.75 - 0.85)T \quad \text{for } 2p_1 = 8 \end{aligned}$$

Οπότε το B_g θα παίρνει τις τιμές από 0,65 έως 0,78 T. Επιλέγεται το $B_g=0.65$.

Άρα η μαγνητική ροή γίνεται:

$$\varphi = a_i \cdot \tau \cdot L \cdot B_g = 0,74 \cdot 0,078 \cdot 0,11 \cdot 0,65 = 4.12 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

Ο αριθμός των στροφών ανά φάση δίνεται από τον τύπο:

$$W_1 = \frac{K_E \cdot V_\varphi}{4 \cdot K_f \cdot K_w \cdot f \cdot \varphi}$$

Η V_φ θα είναι ίση με 230V διότι ο τρόπος συνδεσμολογίας του κινητήρα είναι σε τρίγωνο. Άρα:

$$W_1 = \frac{K_E \cdot V_\varphi}{4 \cdot K_f \cdot K_w \cdot f \cdot \varphi} = \frac{0,97 \cdot 230}{4 \cdot 1,08 \cdot 0,96 \cdot 50 \cdot 4.12 \cdot 10^{-3}} = 261,14 \text{ σπείρες/φάση}$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον αριθμό αγωγών ανά αυλάκι:

$$n_s = \frac{a_1 \cdot W_1}{p_1 \cdot q}$$

Το a_1 είναι ο αριθμός των παράλληλων αγωγών. Θα επιλέξουμε το a_1 ίσο με 1. Με αυτή την επιλογή θεωρείται ότι τα πηνία σε κάθε φάση συνδέονται σε σειρά. Οπότε ο αριθμός των αγωγών ανά αυλάκι n_s είναι:

$$n_s = \frac{a_1 \cdot W_1}{p_1 \cdot q} = \frac{1 \cdot 261,14}{2 \cdot 3} = 43,5$$

Το n_s θα πρέπει να είναι ακέραιος αριθμός, όποτε στρογγυλοποιώντας, θα γίνει ίσο με $n_s=44$.

Συνεπώς η στροφές ανά φάση θα είναι

$$W_1 = \frac{p_1 \cdot q \cdot n_s}{a_1} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 44}{1} = 264$$

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

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

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

Το ονομαστικό ρεύμα είναι ίσο με :

$$I_{ov} = \frac{P_n}{n_n \cos \varphi \sqrt{3} V_\pi} = \frac{3000}{0,865 \cdot 0,82 \sqrt{3} \cdot 400} = 6,1 A$$

Για 4 πόλους η πυκνότητα ρεύματος που θα χρησιμοποιηθεί θα παίρνει τις τιμές $(4-7) A/mm^2$.

Για $J_{cos} = 5 A/mm^2$

Η διατομή του αγωγού στον στάτη A_{co} θα είναι:

$$A_{co} = \frac{I_{ov}}{J_{cos} \cdot a_1} = \frac{6,1}{5 \cdot 1} = 1,22 mm^2$$

Με διάμετρο ίση:

$$d_{co} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{co}}{\pi \cdot a_p}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,22}{\pi}} = 1,24 mm$$

Όπου a_p είναι οι 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

Μετά θα πρέπει να επιλεγεί διατομή αγωγού από τον πίνακα 1.4. Η διατομή είναι ίση με 1,25mm.

C. Υπολογισμός Διαστάσεων Αυλακιών του Στάτη

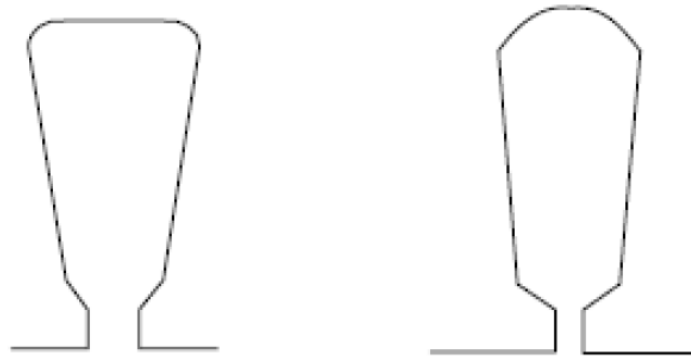
Ο υπολογισμός του n_s και της διαμέτρου των αγωγών θα βοηθήσει στον υπολογισμό της απαιτούμενης διατομής των αυλακιών του στάτη:

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

Όπου K_{fill} είναι μια σταθερά (fill factor) η οποία εξαρτάται από το πάχος της μόνωσης που χρησιμοποιούμε, για τον συγκεκριμένο κινητήρα ισχύος 3kW θα επιλέξουμε τιμή 0,4.

$$A_{su} = \frac{\pi d_{co}^2 a_p n_s}{4 K_{fill}} = \frac{\pi 1.25^2 \cdot 1 \cdot 44}{4 \cdot 0.4} = 135 \text{ mm}^2$$

Η μορφή των αυλακιών του στάτη έχουν συνήθως μια από τις μορφές στην Εικόνα 23:



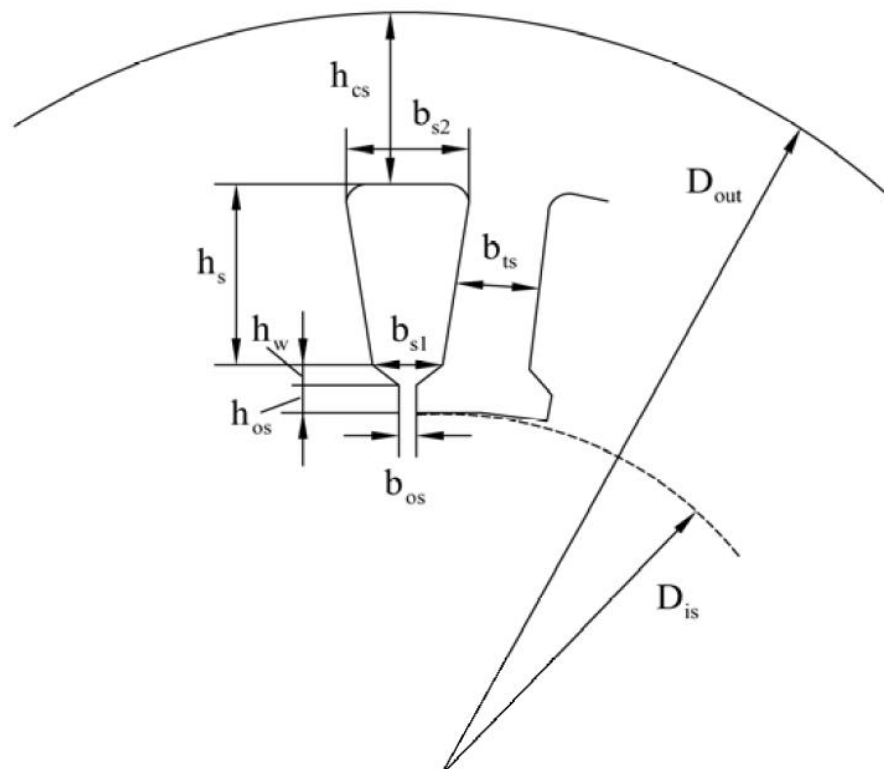
Εικόνα 2 Μορφές αυλακιών στάτη

Επιλέγοντας το αυλάκια με το τετραγωνοειδές σχήμα η διαστάσεις του φαίνονται στη Εικόνα 24. Οι μεταβλητές b_{os} , h_{os} , h_w λαμβάνουν τιμές από την εμπειρία που υπάρχει στην κατασκευή επαγωγικών κινητήρων:

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

$h_{os}=0,5-1\text{mm}$, επιλέγουμε 0,5mm.

$h_w=1-4\text{mm}$, επιλέγουμε 1mm.



Εικόνα 3 Διαστάσεις αυλακιού στάτη

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

$$B_g \cdot \tau_s \cdot L = B_{ts} \cdot b_{ts} \cdot L \cdot K_{Fe} \quad (6.18)$$

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

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

Πίνακας Σφάλμα! Δεν υπάρχει κείμενο καθορισμένου στυλ στο έγγραφο..4 Επιτρεπτές τιμές πυκνοτήτων ροής στον επαγωγικό κινητήρα

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

Οπότε για $B_{ts} = 1.6$ το b_{ts} γίνεται:

$$b_{ts} = \frac{B_g \cdot \tau_s}{B_{ts} \cdot K_{Fe}} = \frac{0.65 \cdot 8.6 \cdot 10^{-3}}{1.6 \cdot 0.96} = 3.63 \text{ mm}$$

Θα πρέπει να τονιστεί ότι το πλάτος του δοντιού δεν θα πρέπει να είναι μικρότερο από 3,5mm για κατασκευαστικούς λόγους.

Από την γεωμετρία των αυλακιών προκύπτει η εξής διαστάσεις:

$$b_{s1} = \frac{\pi(D_{is} + 2h_{os} + 2h_w)}{N_s} - b_{ts} = \frac{\pi(100 + 2 \cdot 0.5 + 2 \cdot 1)}{36} - 3.63 = 5.35 \text{ mm}$$

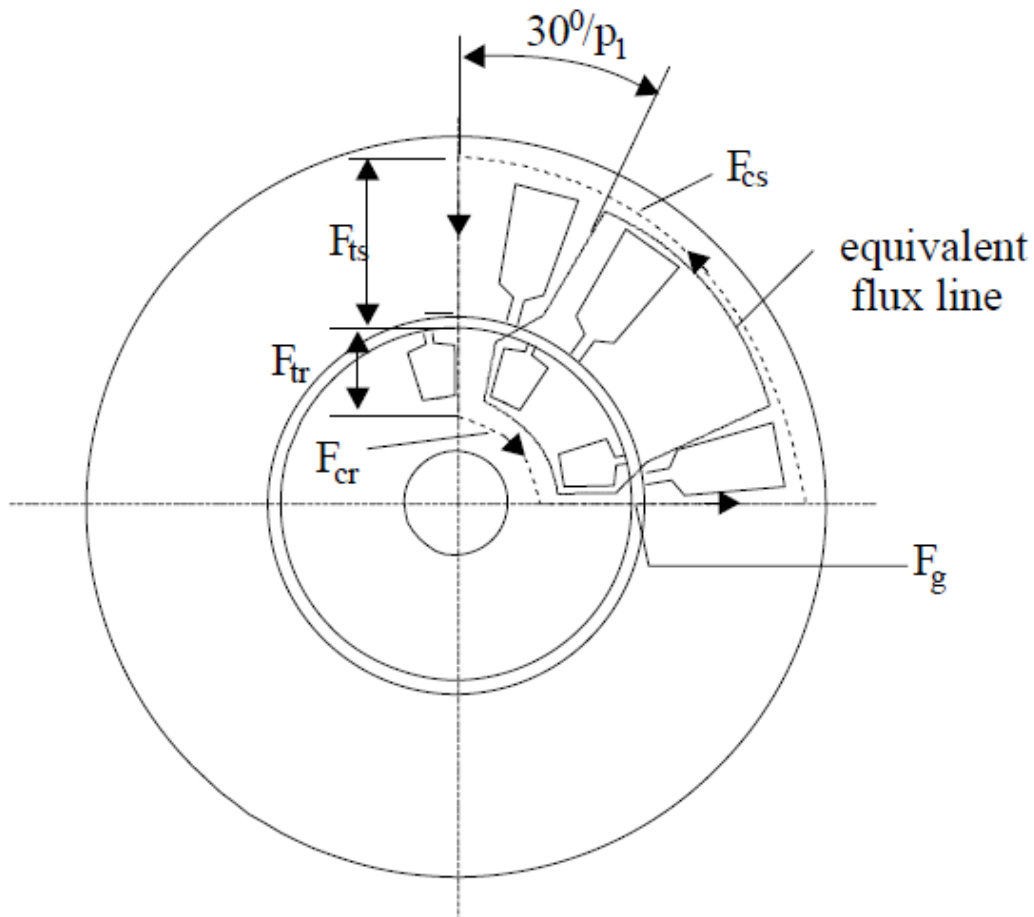
$$b_{s2} = \sqrt{4 A_{su} \tan \frac{\pi}{N_s} + b_{s1}^2} = \sqrt{4 \cdot 135 \tan \frac{\pi}{36} + 5.35^2} = 8.77 \text{ mm}$$

$$A_{su} = h_s \frac{(b_{s1} + b_{s2})}{2} \Rightarrow h_s = \frac{2 \cdot A_{su}}{(b_{s1} + b_{s2})} = \frac{2 \cdot 285.099}{(5.35 + 8.77)} = 19.2 \text{ mm}$$

Στην συνέχεια θα υπολογίσουμε τον συντελεστή ($1 + K_{st}$) που είχε θεωρηθεί με την τιμή $K_{st}=0,5$. 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 στο παρακάτω σχήμα:



Η M_{mfs} του διακένου δίνεται από σχέση:

$$F_{mg} \approx Kc \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0}$$

μ_0 είναι η μαγνητική διαπερατότητα στο κενό, και είναι ίσο με $1,256 \cdot 10^{-6}$

Kc ονομάζεται **Carter coefficient**. Θα θεωρήσουμε το Kc ίσο με 1.2 , τότε η mmf διακένου θα είναι:

$$F_{mg} \approx Kc \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0} = 1.2 \cdot 0.35 \cdot \frac{0,65}{1.256 \cdot 10^{-6}} = 217.3 \text{ Aturns}$$

Η M_{mfs} του στάτη υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

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

H_{ts} είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Από την καμπύλη μαγνήτισης για B_{ts} θα εξάγει την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Στον πίνακα 6.6 δίνονται η 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

Πίνακας Σφάλμα! Δεν υπάρχει κείμενο καθορισμένου στυλ στο έγγραφο...5 Η

Οπότε για $B_{ts}=1,6$ το H_{ts} θα είναι ίσο με 2460 A/m. Συνεπώς η mmf του στάτη θα είναι:

$$F_{mts} = H_{ts}(h_s + h_{os} + h_w) = 2460 \cdot (19,2 + 0,5 + 1)10^{-3} = 51 \text{ At}$$

Η Mmf_s του δρομέα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$F_{mtr} = K_{st} \cdot F_{mg} - F_{mts} = 0,5 \cdot 217,3 - 51 = 57,6 \text{ At}$$

Η διαφορά του F_{mts} και F_{mtr} είναι πολύ μικρή, άρα η τιμή που θεωρήσαμε για το K_{st} είναι σωστή.

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

$$B_{cs} = \frac{\varphi}{2Lh_{cs}}$$

h_{cs} είναι το πλάτος του πίσω πυρήνα (εικόνα 24). Το πλάτος λαμβάνεται από την σχέση:

$$h_{cs} = \frac{D_{out} - (D_{is} + 2(h_{os} + h_w + h_s))}{2} = \frac{160 - (100 + 2(19,2 + 0,5 + 1))}{2} = 9,3 \text{ mm}$$

Συνεπώς η B_{cs} είναι:

$$B_{cs} = \frac{\varphi}{2Lh_{cs}} = \frac{4.12}{2 \cdot 0,11 \cdot 9,3 \cdot 10^{-3}} = 2.01 T$$

Η τιμή του B_{cs} είναι πολύ μεγάλη. Για να είναι επιτρεπτό το B_{cs} θα πρέπει να πάρει τιμές από 1.4 έως 1.7. Για να επιλύσουμε το πρόβλημα έχουμε τρεις δυνατότητες:

1. Να αυξήσουμε την μήκος το πίσω πυρήνα, όπου με την σειρά του θα αυξηθεί η εξωτερική διάμετρος του κινητήρα.
2. Να εισάγουμε μια μεγαλύτερη 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 μειώσουμε και άλλο το h_s δηλαδή να μειώσουμε την διατομή των αυλακιών, κάτι που δεν μπορεί να γίνει στην περίπτωση μας.

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

$$B_{cs} = \frac{\varphi}{2Lh_{cs}} \Rightarrow h_{cs} = \frac{\varphi}{2LB_{cs}} = \frac{4,12}{2 \cdot 0,11 \cdot 1.6} = 11,3 mm$$

ΔΡΟΜΕΑΣ

A. Υπολογισμός διαστάσεων αυλακιών δρομέα

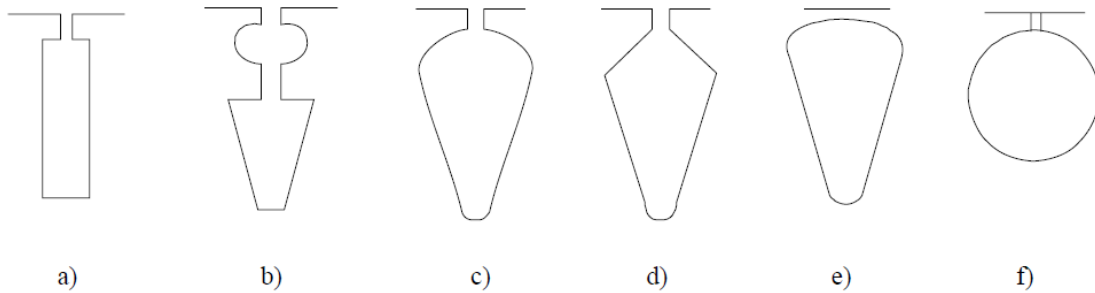
Στην αρχή θα γίνει επιλογή του πλήθους των αυλακιών του δρομέα. Ο αριθμός των αυλακιών του δρομέα σχετίζεται με τον αριθμό των πόλων και με το πλήθος των αυλακιών του στάτη. Η επιλογή γίνεται από τον πίνακα:

$2p_1$	N_s	N_r – 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 Σφάλμα! Δεν υπάρχει κείμενο καθορισμένου στυλ στο έγγραφο..6

Για αυτήν την περίπτωση θα επιλεχτεί $N_s \neq N_r = 48$. Με την αύξηση των αριθμών των αυλακιών του δρομέα, θα μειωθεί η αντίδραση του δρομέα αφού μειώνεται το ρεύμα στις μπάρες του. Επίσης η αύξηση των αριθμών των αυλακιών επηρεάζει το βήμα του αυλακιού, το πλάτος δοντιού του αυλακιού, το πλάτος του αυλακιού και το ύψος του αυλακιού.

Οι μορφές των αυλακιών δρομέα φαίνονται στην (εικόνα 10). Για λόγος απλοποίησης επιλέγεται το σχήμα α.



Εικόνα 4 Τύποι αυλακιών στάτη

Αφού έχει επιλεχτεί 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:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_1 \cdot K_w \cdot K_I \cdot I_{ov}}{N_r}$$

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:

$$K_I \approx 0.8 \cdot \cos \varphi + 0.2 = 0.8 \cdot 0.82 + 0.2 = 0.856$$

Οπότε το ρεύμα μπάρας είναι

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_1 \cdot K_w \cdot K_I \cdot I_{ov}}{N_r} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 264 \cdot 0.96 \cdot 0.856 \cdot 6.1}{48} = 165,42 \text{ A}$$

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

$$A_b = \frac{I_b}{J_b} = \frac{165,42}{3.42} = 48,3 \text{ mm}^2$$

Το ρεύμα δαχτυλιδιού βραχυκύκλωσης υπολογίζεται

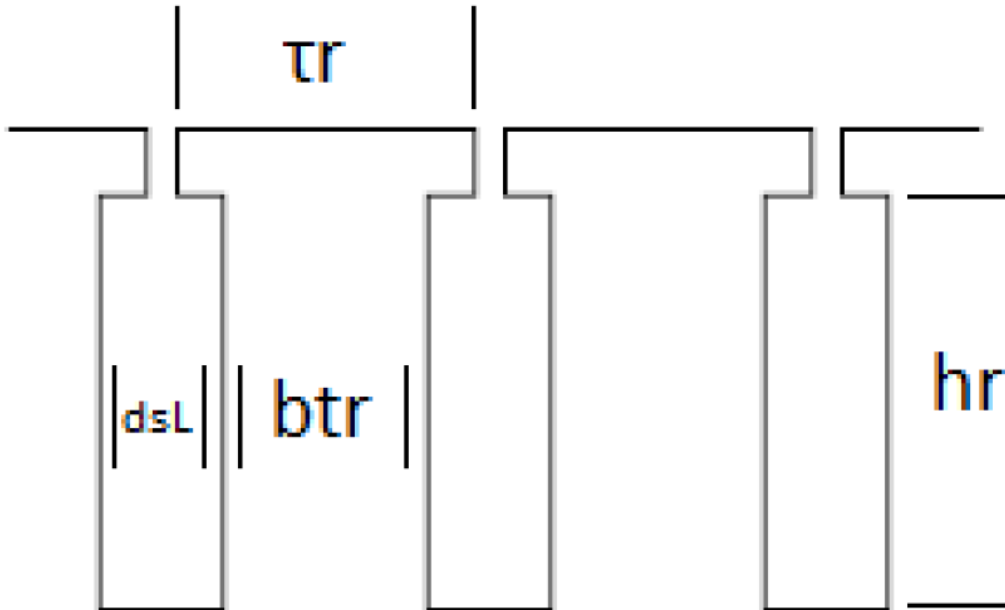
$$I_{er} = \frac{I_b}{2 \sin \frac{2\pi}{N_r}} = \frac{165,42}{2 \cdot \sin \frac{2\pi}{48}} = 633,66 \text{ A}$$

Η πυκνότητα του ρεύματος δαχτυλιδιού είναι $J_{er} = (0.75 \text{ έως } 0.8) J_b$. Η υψηλές τιμές αντιστοιχούν σε κομμάτι της μεταφοράς την θερμοκρασίας από το δαχτυλίδι τέλους του δρομέα στον πυρήνα του [1]. Οπότε $J_{er} = 0.8 \cdot J_b = 0.8 \cdot 3.42 \cdot 10^6 = 2.73 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$.

Η διατομή του τέλους των δαχτυλιδιών του δρομέα είναι:

$$A_{er} = \frac{I_{er}}{J_{er}} = \frac{633,66}{2,73 \cdot 10^6} = 232,11 \cdot 10^{-6} m^2$$

Σύμφωνα με τον τύπο του αυλακιού που έχουμε επιλέξει, θα πρέπει να υπολογιστούν η διαστάσεις που φαίνονται στην (Εικόνα 26):



Εικόνα 5 Διαστάσεις αυλακιών δρομέα

Το βήμα αυλακιού του δρομέα είναι :

$$\tau_r = \frac{\pi(D_{is} - 2g)}{N_r} = \frac{\pi(100 - 2 \cdot 0,35)}{48} = 6,4 \text{ mm} \quad (6.32)$$

Η πυκνότητα ροής στα δόντια του επιλέγεται να είναι $B_{tr}=1.6 \text{ T}$, με πλάτος δοντιού ίσο με:

$$b_{tr} = \frac{B_g}{K_{Fe} \cdot B_{tr}} \tau_r = \frac{0,65}{0,96 \cdot 1,6} 6,4 \cdot 10^{-3} = 2,7 \text{ mm}$$

Λόγω ότι το διάκενο του κινητήρα είναι πολύ μικρό η διάμετρος του δρομέα θα θεωρηθεί ίση με την εσωτερική διάμετρο του στάτη. Οπότε το $D_{re}=D_{is}=0.10\text{m}=10\text{cm}$.

Η περιφέρεια του δρομέα είναι ίση με:

$$C = 2\pi \cdot \frac{D_{re}}{2} = \frac{2\pi \cdot 100}{2} = 314,15 \text{ mm}$$

Το πλάτος του αυλακιού είναι:

$$d_{SL} = \tau_r - b_{tr} = 6,4 - 2,7 = 3,7 \text{ mm} \quad (6.35)$$

Το ύψος των αυλακιών δρομέα είναι :

$$h_r = \frac{A_b}{d_{SL}} = \frac{48,3}{3,7} = 13 \text{ mm}$$

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 θα θεωρηθεί ίση με $B_{tr} = 1,6$. Οπότε από τον πίνακα 6.6, η μαγνητική ένταση πεδίου στα δόντια δρομέα θα είναι ίση με $H_{tr} = 2460 \text{ A/m}$.

Με την ακριβή γνώση των διαστάσεων των αυλακιών του δρομέα, θα ξανά υπολογιστεί η μαγνητεγερτική δύναμη δρομέα.

$$F_{mtr} = H_{tr} \cdot (h_r + h_{or} + d_{SL}) = 2460 \cdot (13 + 0.5 + 3,7) = 42,31 \text{ Aturns}$$

Η πυκνότητα ροή στον πίσω πυρήνα B_{cr} , θα πρέπει να παίρνει τις τιμές από 1 έως 1,6 (από τον πίνακα 6.6) . Με B_{cr} ίση με 1,6 το ύψος του πίσω πυρήνα στον δρομέα είναι:

$$h_{cr} = \frac{\varphi}{2LB_{cr}} = \frac{4.12 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0.11 \cdot 1.6} = 11,7 \text{ mm}$$

B. Υπολογισμός Διαστάσεων του Άξονα

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

$$\begin{aligned} D_{shaft} &\leq D_{is} - 2 \cdot (h_{or} + h_r + h_{cr}) - 2g \Rightarrow D_{shaft} \\ &\leq 100 - 2(0.5 + 13 + 11,7) - 2 \cdot 0.35 \Rightarrow D_{shaft} \leq 49,6 \text{ mm} \quad (6.38) \end{aligned}$$

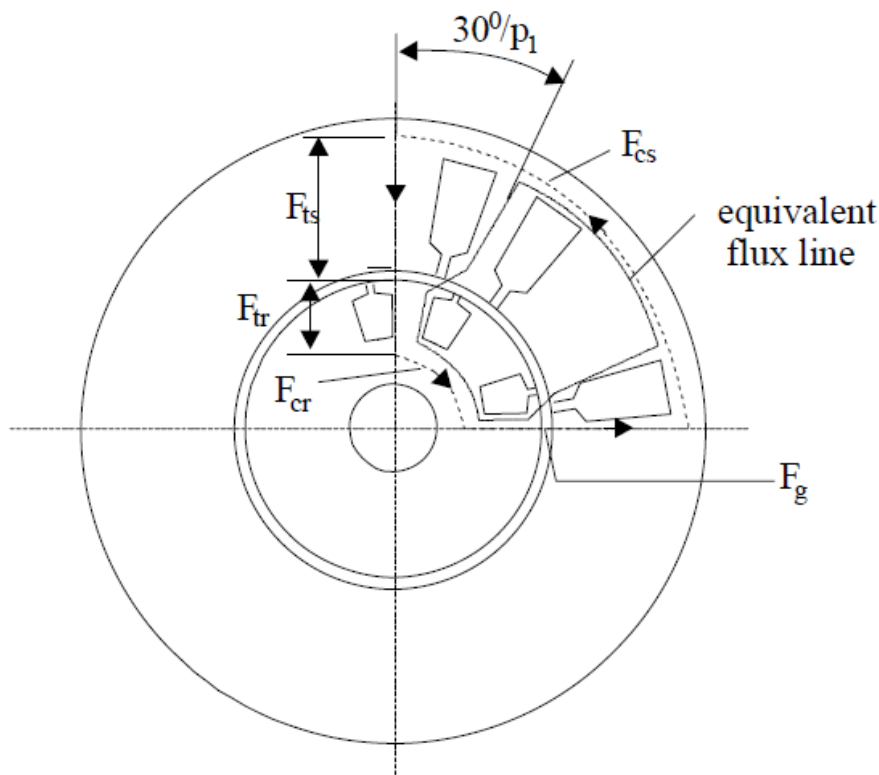
Με την αύξηση της εσωτερικής διαμέτρου του κινητήρα θα προκαλούνταν αύξηση του D_{shaft} , αλλά και μείωση στην ροπή εκκίνησης και ανατροπής. Μια άλλη λύση είναι να μειωθεί η διατομή στα αυλάκια του δρομέα για να μειωθεί το ύψος τους. Αυτό γίνεται με την αύξηση του αριθμού των αυλακιών ή με την απευθείας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

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

$$T = \frac{P_n}{2\pi \frac{f_1}{p_1} (1-s)} = \frac{3000}{2\pi \frac{50}{2} (1-0,02)} = 19,5 \text{ Nm}$$

Υπολογισμός Ρεύματος Μαγνήτισης

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



Εικόνα 6 Μαγνητοενεργητικές δυνάμεις στον επαγωγικό κινητήρα

Η ολική *mmf* του κινητήρα υπολογίζεται από τον τύπο:

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

Όπου *Kc* είναι ο συντελεστής Carter. Μέχρι στιγμή το *Kc* το είχαμε θεωρήσει ίσο 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 πρακτικά 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 *Kc*.

$$K_c = K_{c1} \cdot K_{c2} \quad (6.41)$$

Όπου K_{c1} είναι ίσο με

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

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

Με γ_1 και γ_2 ίσο με

$$\gamma_1 = \frac{b_{os}^2}{5g + b_{os}} = \frac{2.5^2}{5 \cdot 0.35 + 2.5} = 1.47 \quad (6.44)$$

$$\gamma_2 = \frac{b_{or}^2}{5g + b_{or}} = \frac{1.5^2}{5 \cdot 0.35 + 1.5} = 0.69 \quad (6.45)$$

$$K_{c1} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1} = \frac{8,6}{8,6 - 1.47} = 1.2 \quad (6.46)$$

$$K_{c2} = \frac{\tau_r}{\tau_r - \gamma_2} = \frac{6,4}{6,4 - 0.69} = 1,12 \quad (6.47)$$

$$K_c = K_{c1} \cdot K_{c2} = 1.12 \cdot 1.12 = 1,34$$

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 σωστή.

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

Για το στάτη:

$$F_{mcs} = C_{cs} \frac{\pi(D_{is} - h_{cs})}{2p_1} H_{cs} \quad (6.48)$$

$$C_{cs} = 0.88 \cdot e^{-0.4B_{cs}^2} \quad (6.49)$$

Και για το δρομέα:

$$F_{mcr} = C_{cr} \frac{\pi(D_{shaft} + h_{cr})}{2p_1} H_{cr} \quad (6.50)$$

$$C_{cr} = 0.88 \cdot e^{-0.4B_{cr}^2} \quad (6.51)$$

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 είναι των πίσω πυρήνων.

$$C_{cs} = 0.88 \cdot e^{-0.4B_{cs}^2} = 0.88 \cdot e^{-0.4 \cdot 1,6^2} = 0.31$$

$$C_{cr} = 0.88 \cdot e^{-0.4B_{cr}^2} = C_{cr} = 0.88 \cdot e^{-0.4 \cdot 1.6^2} = 0.31$$

$$F_{mcs} = C_{cs} \frac{\pi(D_{is} - h_{cs})}{2p_1} H_{cs} = 0.31 \frac{\pi(100 - 11,3)}{4} 2460 = 53,126 \text{ Aturns}$$

$$F_{mcr} = C_{cr} \frac{\pi(D_{shaft} + h_{cr})}{2p_1} H_{cr} = 0.31 \frac{\pi(49,6 + 11,36)}{4} 2460 = 36,51 \text{ Aturns}$$

Η συνολική mmf του κινητήρα είναι:

$$F_{1m} = 2(F_{1m} + F_{mts} + F_{mtr} + F_{mcs} + F_{mcr}) = 2(217,3 + 51 + 42,31 + 53,126 + 36,51) = 800,49 \text{ Aturns}$$

Ο συντελεστής κορεσμού πυρήνα δίνεται από τον τύπο:

$$K_{sc} = 1 + \frac{F_{mcs} + F_{mcr}}{2F_{mg}} = 1 + \frac{53,126 + 36,51}{2 \cdot 217,3} = 1,2$$

Σε έναν κατάλληλο σχεδιασμό, ο συντελεστής κορεσμού των δοντιών και κορεσμού πυρήνα θα είναι σχετικά ίση ($K_{st} \approx K_{sc}$). Σε αυτή την περίπτωση, η πυκνότητα ροής διακένου όσο και του πυρήνα θα είναι ημιτονοειδές 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 [1].

Ο συνολικός συντελεστής κορεσμού είναι

$$K_s = \frac{F_{1m}}{2F_{mg}} - 1 = \frac{800,49}{2 \cdot 217,3} - 1 = 1.841$$

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:

$$I_m = \frac{\pi \cdot p_1 \cdot \left(\frac{F_{1m}}{2}\right)}{3\sqrt{2} \cdot W_i \cdot K_w} = \frac{\pi \cdot 2 \cdot \left(\frac{800,49}{2}\right)}{3\sqrt{2} \cdot 264 \cdot 0,96} = 2.34 \text{ A} \quad (6.54)$$

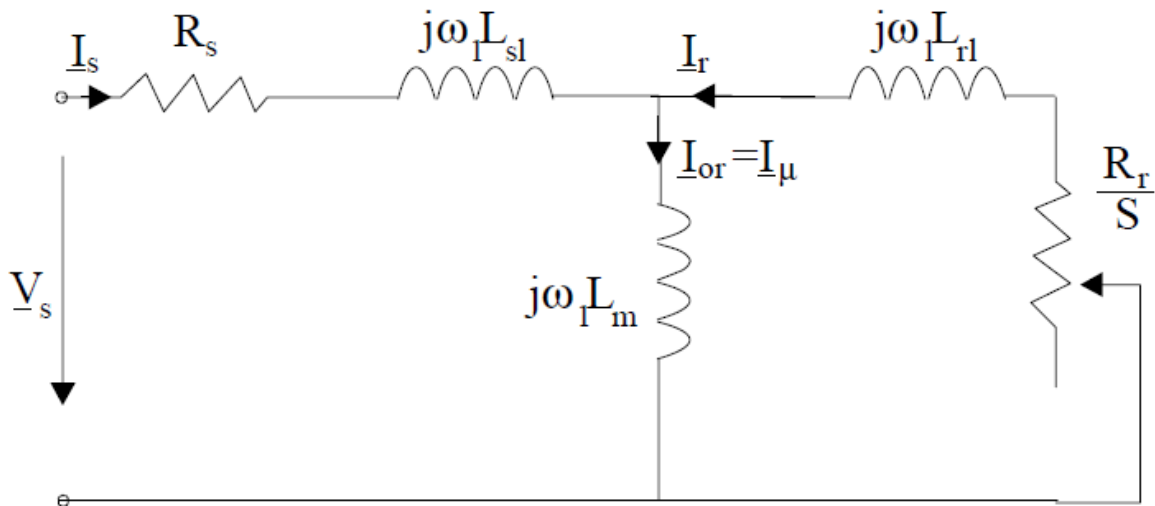
Με σχετικό ρεύμα μαγνήτισης ίσο με:

$$i_m = \frac{I_m}{I_n} = \frac{2.34}{6.1} 100 \% = 38.36 \% \quad (6.55)$$

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.

Αντιστάσεις & Αντιδράσεις Κινητήρα

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



Εικόνα 7: Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα

Το παραπάνω κύκλωμα είναι το τελικό ισοδύναμο του επαγωγικού κινητήρα. Σε αυτό το κύκλωμα έχει αφαιρεθεί από αυτό η αντίσταση του πυρήνα, λόγω ότι 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:

$$R_s = \rho_{co} \frac{l_c \cdot W_1}{A_{co} \cdot a_i}$$

Όπου ρ_{co} είναι η ειδική αντίσταση του χαλκού στους 80°C (ενδίκτικη θερμοκρασία λειτουργίας του κινητήρα). Στους 20°C η ειδική αντίσταση χαλκού είναι ίση με

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

Για τους 80 υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$\rho_{80} = \rho_{20} \left(1 + \frac{1}{273} (80 - 20) \right) = 2,1712 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

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

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

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 και από το βήμα πηνίου

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

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

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

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

Λόγω ότι χρησιμοποιούμε μονό επόπεδο στις περιελίξεις ισχυρεί ότι ($y=\tau$).

Οπότε $y=\tau=0,078 \text{ m}$

Για 4 πόλους έχουμε l_{end} ίσο με :

$$l_{end} = 2y - 0.02 = 2 \cdot 0.078 - 0.02 = 0.136 \text{ m}$$

$$l_c = 2(L + l_{end}) = 2(0.11 + 0.136) = 0.492 \text{ m}$$

Η αντίσταση τυλιγμάτων στάτη

$$R_s = \rho_{co80} \frac{l_c \cdot W_1}{A_{co} \cdot a_1} = 2,1712 \cdot 10^{-8} \frac{0.492 \cdot 264}{1.22 \cdot 1} = 2.36 \Omega$$

Η συνδυασμένη αντίσταση δρομέα και δαχτυλιδιών δίνεται από το τύπο:

$$(R_{be}^{80})_{s=1} = \rho_{Al} \left[\frac{L}{A_b} K_R + \frac{l_{er}}{2A_{er} \sin^2 \left(\frac{\pi p_i}{N_r} \right)} \right] \quad (6.58)$$

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 $\rho_{Al20}=3.1 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$.

$$\rho_{Al80} = \rho_{Al20} \left(1 + \frac{1}{273} (80 - 20) \right) = 3.1 \cdot 10^{-8} \left(1 + \frac{1}{273} (80 - 20) \right) = 3.78 \cdot 10^{-8}$$

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

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

b είναι το ύψος του δαχτυλιδιού βραχυκύκλωσης

$$b = h_r + h_{or} + d_{SL} = 13 + 0.5 + 3.7 = 17.2 \text{ mm}$$

$$D_{er} = D_{re} - 3.5 \cdot 10^{-3} - 2g = 0.1 - 3.5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0.35 = 0.0958 \text{ m}$$

Οπότε το μήκος του δακτυλιδιού βραχυκύκλωσης είναι:

$$l_{er} = \frac{\pi(D_{er} - b)}{N_r} = \frac{\pi(0.0958 - 0.0172)}{48} = 5.144 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Ο συντελεστής επιδερμικού φαινομένου υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$K_R = \xi \frac{(\sinh 2\xi + \sin 2\xi)}{(\cosh 2\xi - \cos 2\xi)} \approx \xi \quad (6.63)$$

$$\xi = \beta_s h_r \sqrt{S}$$

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

$$\beta_s = \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{2\rho_{Al}}} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 1.25 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3.78 \cdot 10^{-8}}} = 79.77 \text{ m}^{-1}$$

$$\xi = \beta_s h_r \sqrt{S} = 79.77 \cdot 0.013 \cdot 1 = 1$$

Συνεπώς η σύνθετη αντίσταση δρομέα και δακτυλιδιών είναι:

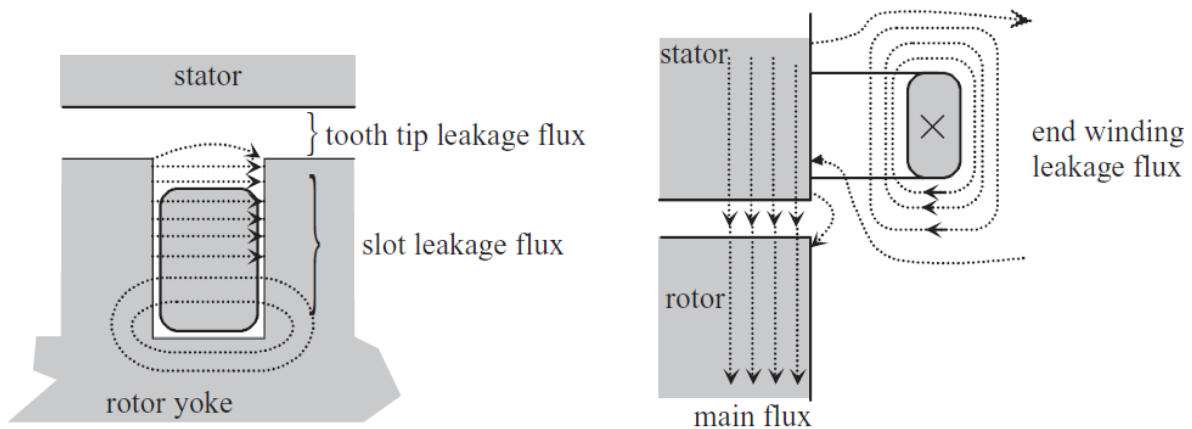
$$\begin{aligned} (R_{be}^{80})_{s=1} &= \rho_{Al} \left[\frac{L}{A_b} K_R + \frac{l_{er}}{2A_{er} \sin^2 \left(\frac{\pi p_i}{N_r} \right)} \right] \\ &= 3.78 \cdot 10^{-8} \left[\frac{0.11}{48.3} 1.03 + \frac{5.144 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 232.11 \cdot 10^{-6} \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi 2}{48} \right)} \right] \\ &= 0.235 \cdot 10^{-4} \Omega \end{aligned}$$

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:

$$(R_r)_{s=1} = \frac{4m}{N_r} (W_1 K_w)^2 (R_{be}^{80})_{s=1} = \frac{4 \cdot 3}{48} (264 \cdot 0.959)^2 \cdot 0.235 \cdot 10^{-4} = 3.76 \Omega$$

Υπολογισμός Αντιδράσεων Κινητήρα

Πέραν τις ωμικές αντιστάσεις που εμφανίζονται στα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα 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 (Εικόνα 29):



Εικόνα 8: Οι ροές διαρροής στον κινητήρα

Η επαγωγική αντίδραση του στάτη δίνεται από τον τύπο:

$$X_{sl} = 2\mu_0\omega L \frac{W_1^2}{p_1q} (\lambda_s + \lambda_{ds} + \lambda_{ec})$$

Όπου λ_s , λ_{ds} , λ_{ec} 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 [2].

Για μονού επίπεδου τυλίγματα το λ_s δίνεται από τον τύπο:

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

Ο τελευταίος όρος (0,66) μπορεί να υπολογιστεί και από τον παρακάτω τύπο [2].

$$\lambda_{u3} = 0,41 + 0,76 \log \frac{b_{s1}}{b_{os}}$$

$$\lambda_s = \frac{h_s}{3 \cdot b_{s1}} + \frac{h_{os}}{b_{os}} + 0,41 + 0,76 \log \frac{b_{s1}}{b_{os}} = \frac{19.2}{3 \cdot 5.35} + \frac{0.5}{2.5} + 0.41 + 0.76 \log \frac{19.2}{2.5} = 2.05$$

Ο συντελεστής λ_{ds} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda_{ds} = \frac{0.9\tau_s q^2 K_W^2 C_s \gamma_{ds}}{K_c g (1 + K_{st})} \quad (6.70)$$

Όπου

$$C_s = 1 - 0.033 \frac{b_{os}^2}{g\tau_s} = 1 - 0.033 \frac{2.5^2}{0.35 \cdot 0.0086} = 0.93$$

$$\gamma_{ds} = (0.11 \sin \varphi_1 + 0.28) \cdot 10^{-2}; \quad \text{for } q = 8$$

$$\gamma_{ds} = (0.11 \sin \varphi_1 + 0.41) \cdot 10^{-2}; \quad \text{for } q = 6$$

$$\gamma_{ds} = (0.14 \sin \varphi_1 + 0.76) \cdot 10^{-2}; \quad \text{for } q = 4$$

$$\gamma_{ds} = (0.18 \sin \varphi_1 + 1.24) \cdot 10^{-2}; \quad \text{for } q = 3$$

$$\gamma_{ds} = (0.25 \sin \varphi_1 + 2.6) \cdot 10^{-2}; \quad \text{for } q = 2$$

$$\gamma_{ds} = 9.5 \cdot 10^{-2}; \quad \text{for } q = 1$$

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

με φ ίσο με :

$$\varphi = \pi(6\beta - 5,5) = \pi(6 \cdot 1 - 5,5) = 1,57$$

Για $q=1$ έχουμε γ_{ds} δίνεται από τον τύπο:

$$\gamma_{ds} = 9.5 \cdot 10^{-2}$$

Ο συντελεστής λ_{ds} είναι:

$$\lambda_{ds} = \frac{0.9\tau_s q^2 K_W^2 C_s \gamma_{ds}}{K_c g (1 + K_{st})} = \frac{0.9 \cdot 8,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1^2 \cdot 0.96^2 \cdot 0.933 \cdot 9,5 \cdot 10^{-2}}{1.34 \cdot 0.35 \cdot (1 + 0,5)} = 0,89$$

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

$$\lambda_{ec} = 0.67 \frac{q}{L} (l_{end} - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau) = 0.67 \frac{1}{0.11} (0.136 - 0.64 \cdot 1 \cdot 0.078) = 0,51$$

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

$$X_{sl} = 2\mu_0\omega L \frac{W_1^2}{p_1q} (\lambda_s + \lambda_{ds} + \lambda_{ec})$$

$$= 2 \cdot 1.126 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 0,11 \frac{264^2}{4 \cdot 1} (2,05 + 0,89 + 0,51) = 4,87 \Omega$$

Οι αντίδραση του δρομέα δίνεται από τον τύπο:

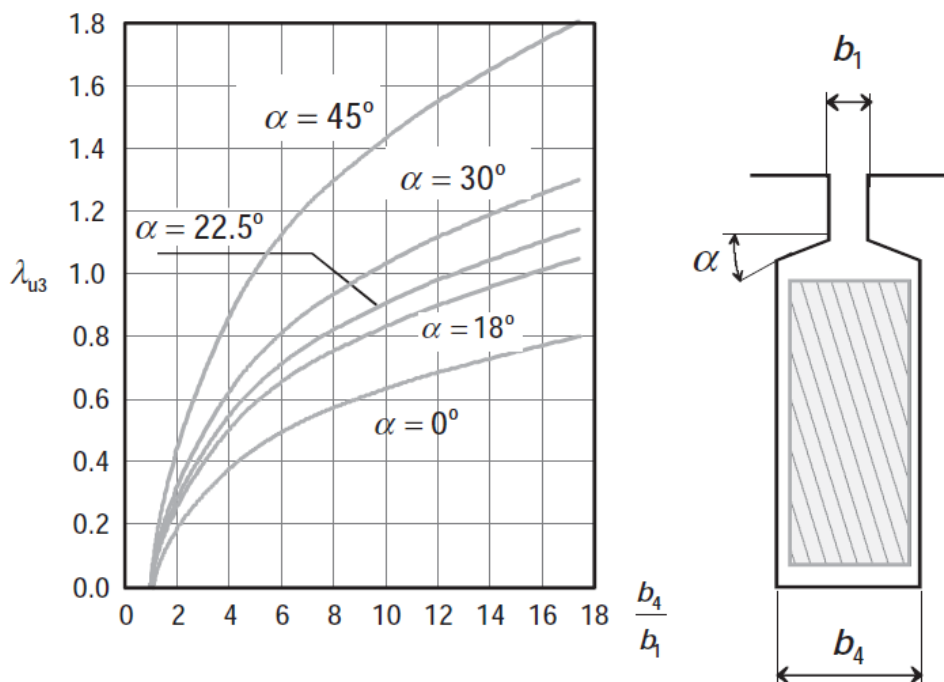
$$X_{be} = 2\pi f \mu_0 L (\lambda_r K_x + \lambda_{dr} + \lambda_{er})$$

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 $d_{SL}/b_{or}=2,4$. οπότε το λ_{u3} είναι περίπου ίσο με 0,36

Για $\alpha=0^\circ$ το $\lambda_{u3}=0,18$. Συνεπώς το λ_r είναι ίσο με:

$$\lambda_r = \frac{h_r}{3 \cdot d_{SL}} + \frac{h_{or}}{b_{or}} + \lambda_{u3} = \frac{13}{3 \cdot 3,7} + \frac{0,5}{1,5} + 0,36 = 1,86$$

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

$$\lambda_{dr} = \frac{0,9\tau_r\gamma_{dr}N_r^2}{K_c g 6p_1}$$

Όπου γ_{dr}

$$\gamma_{dr} = 9 \left(\frac{6p_1}{N_r} \right)^2 10^{-2} = 9 \left(\frac{6 \cdot 2}{48} \right)^2 10^{-2} = 0,562 \cdot 10^{-2}$$

Συνεπώς

$$\lambda_{dr} = \frac{0,9\tau_r\gamma_{dr}N_r^2}{K_c g 6p_1} = \frac{0,9 \cdot 6,4 \cdot 0,562 \cdot 10^{-2} \cdot 48^2}{1,34 \cdot 0,35 \cdot 6 \cdot 2} = 1,1$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον συντελεστή λει από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \lambda_{er} &= \frac{2,3 \cdot (D_{er} - b)}{N_r \cdot L \cdot 4 \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi \cdot P_1}{N_r} \right)} \log \frac{4 \cdot 7(D_{er} - b)}{b + 2a} \\ &= \frac{2,3(95,8 - 17,2)}{48 \cdot 110 \cdot 4 \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi 2}{48} \right)} \log \frac{4 \cdot 7(95,81 - 17,2)}{17,2 + 2 \cdot 20} = 0,79 \end{aligned}$$

Ο συντελεστής επιδερμικού φαινομένου K_x (skin effect coefficient for leakage reactance) λαμβάνεται από το εξής τύπο, για $\xi=1$:

$$K_x = \frac{3}{2\xi} \frac{(\sinh 2\xi - \sin 2\xi)}{(\cosh 2\xi - \cos 2\xi)} \approx \frac{3}{2\xi} \approx 1,94$$

Η αντίδραση του δρομέα είναι

$$\begin{aligned} (X_{be})_{s=1} &= 2\pi f \mu_0 L (\lambda_r K_x + \lambda_{dr} + \lambda_{er}) \\ &= 2\pi 50 \cdot 1.126 \cdot 10^{-6} \cdot 110 \cdot (1,86 \cdot 1,94 + 1,1 + 0,79) = 2,13 \cdot 10^{-4} \Omega \end{aligned}$$

Η αντίδραση του δρομέα ανοιγμένη ανοιγμένη στον στάτη είναι:

$$(X_{rl})_{s=1} = 4m \frac{(W_1 K_w)^2}{N_r} X_{be} = 4 \cdot 3 \frac{(264 \cdot 0,96)^2}{48} \cdot 2,13 = 3,57 \Omega$$

Η παραπάνω τιμές στάτη και δρομέα μειώνονται λόγω του κορεσμού της διαδρομής της ροής διαρροής.

Για ημιανοιχτά αυλάκια έχουμε:

$$(X_{sl})_{sat}^{s=1} = X_{sl}(0.7 - 0.8) = 4,78 \cdot 0,75 = 3,65 \Omega$$

$$(X_{rl})_{sat}^{s=1} = X_{rl}(0.6 - 0.7) = 3,57 \cdot 0.65 = 2,32 \Omega$$

Το παραπάνω φαινόμενο αφορά τις αντιδράσεις και τις αντιστάσεις όταν η ολίσθηση του κινητήρα είναι ίση με 1 ($s=1$). Όταν η ταχύτητα του κινητήρα είναι ίση με την ονομαστική τότε το φαινόμενο του κορεσμού της διαδρομής της ροής διαρροής και το επιδερμικό εξαλείφονται ($K_R=K_X=1$). Οπότε για ονομαστική ταχύτητα και $K_R=K_X=1$ έχουμε αντιστάσεις και αντιδράσεις :

$$(R_{be})_{sn} = 2,35 \cdot 10^{-5} \Omega$$

$$(X_{be})_{sn} = 1,45 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$(R_r)_{sn} = (R_r)_{s=1} \frac{(R_{be})_{sn}}{(R_{be}^{80})_{s=1}} = 3,93 \frac{2,35 \cdot 10^{-5}}{2,35 \cdot 10^{-5}} = 3,93 \Omega$$

$$(X_{rl})_{sn} = (X_{rl})_{s=1} \frac{(X_{rl})_{sn}}{(X_{be})_{s=1}} = 3,57 \frac{1,45 \cdot 10^{-4}}{2,13 \cdot 10^{-4}} = 2,43 \Omega$$

Η μαγνητική αντίδραση λαμβάνεται από τον τύπο:

$$X_m = \sqrt{\left(\frac{V_{ph}}{I_\mu}\right)^2 - R_s^2} - X_{sl} = \sqrt{\left(\frac{230}{2,34}\right)^2 - 2,36^2} - 4,87 = 93,39 \Omega$$

Φαινόμενο λοξοδρόμησης στις αντιδράσεις

Γενικά τα αυλάκια του δρομέα λοξοδρομούν, η λοξοδρόμηση c είναι συνήθως ίση με ένα βήμα πόλου του στάτη ή περισσότερο.

Για λοξοδρόμηση ($c=\tau_s$) έχουμε

$$X_m = X_m K_{skew}$$

$$K_{skew} = \frac{\sin \frac{\pi c}{2 \tau}}{\frac{\pi c}{2 \tau}} = \frac{\sin \frac{\pi \tau_s}{2 \tau}}{\frac{\pi \tau_s}{2 \tau}} = \frac{0,11}{0,17} = 0,9949$$

Οπότε από τα παραπάνω η μαγνητική αντίδραση επηρεασμένη από το φαινόμενο της λοξοδρόμησης

$$X_m = X_m K_{skew} = 93,39 \cdot 0,9949 = 92,9 \Omega$$

Επίσης η αντίδραση του δρομέα επαυξάνεται από την λοξοδρόμηση.

$$X'_{rl} = X_{rl}(1 - K_{skew}^2) = 3,57(1 - 0.647^2) = 0.036 \Omega$$

Τελική τιμή της αντίδρασης του δρομέα για $s=1$ και $s=sn$ είναι

$$(X_{rl})_{skew}^{s=1} = (X_{rl})_{sat}^{s=1} + X_{rl skew} = 2,32 + 0.036 = 2.356 \Omega$$

$$(X_{rl})_{skew}^{s=sn} = X_{rl} + X_{rl skew} = 2,43 + 0.036 = 2.466 \Omega$$

1. Απώλειες & 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:

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

Ο βαθμός απόδοσης δίνεται από τον τύπο:

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

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

$$p_{co} = 3 \cdot I_{ov}^2 \cdot R_s = 3 \cdot \left(\frac{6.1}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot 2.36 = 263.44 W$$

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

$$p_{al} = 3 \cdot (R_r)_{sn} \cdot I_{rn}^2 = 3 \cdot R_r \cdot K_I^2 \cdot I_{ov}^2 = 3 \cdot 3.93 \cdot 0.856^2 \cdot \left(\frac{6.1}{\sqrt{3}}\right)^2 = 321.45 W$$

Οι μηχανικές απώλειες εξαρτώνται από τον αριθμό των ζευγών πόλων [1].

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

$$p_{mv} = 0,012 \cdot 3000 = 36 \text{ W}$$

Οι κατανεμημένες απώλειες δίνονται από τον τύπο:

$$p_{stray} = 0.001 \cdot P_n = 0.001 \cdot 3000 = 3 \text{ W}$$

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

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

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

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

Το K_t 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

$$G_{t1} = \gamma_{iron} \cdot N_s \cdot b_{ts} \cdot (h_s + h_w + h_{os}) \cdot L \cdot K_{Fe} \\ = 7800 \cdot 48 \cdot 3.63 \cdot 10^{-3} \cdot (19.2 + 1 + 0.5) \cdot 10^{-3} \cdot 0.11 \cdot 0.96 = 2.9 \text{ kg}$$

Για $B_{ts}=1.6$ και $f=50 \text{ Hz}$ το p_{t1} είναι ίσο με :

$$p_{t1} = K_{t1} p_{10} \left(\frac{f_1}{50} \right)^{1.3} B_{ts}^{1.7} G_{t1} = 1.7 \cdot 3 \left(\frac{50}{50} \right)^{1.3} \cdot 1.6^{1.7} \cdot 2.9 = 33 \text{ W}$$

Για της απώλειες στον πίσω πυρήνα:

$$p_{y1} = K_y p_{10} \left(\frac{f}{50} \right)^{1.3} B_{cs}^{1.7} G_{y1}$$

Όπου $K_y=(1.6-1.9)$.

Το G_{y1} δίνεται από τον τύπο :

$$G_{y1} = \gamma_{iron} \frac{\pi}{4} [D_{out}^2 - (D_{out} - 2h_{cs})^2] \cdot L \cdot K_{Fe} \\ = 7800 \cdot \frac{\pi}{4} [0,16^2 - (0,16 - 2 \cdot 9.3)^2] \cdot 0,11 \cdot 0,96 = 3.68 \text{ kg}$$

$$p_{y1} = K_y p_{10} \left(\frac{f}{50}\right)^{1.3} B_{cs}^{1.7} G_{y1} = 1.7 \cdot 3 \left(\frac{50}{50}\right)^{1.3} 1.6^{1.7} 3.62 = 41 \text{ W}$$

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

$$p_{iron}^1 = p_{t1} + p_{y1} = 33 + 41 = 74 \text{ W} \quad (6.102)$$

Οι συνολικές απώλειες του κινητήρα είναι:

$$\begin{aligned} \sum \text{losses} &= p_{co} + p_{al} + p_{iron} + p_{mv} + p_{stray} = 263.44 + 321.45 + 74 + 36 + 3 \\ &= 1697.89 \text{ W} \end{aligned}$$

Η απόδοση του κινητήρα είναι ίση με

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_n}{P_n + \sum \text{losses}} = \frac{3000}{3000 + 697.89} 100\% = 81.12 \%$$

2. Χαρακτηριστικά Λειτουργίας του Κινητήρα

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

$$I_o = \frac{p_{iron} + p_{mv} + 3 \cdot I_\mu^2 \cdot R_s}{3V_{ph}} = \frac{74 + 36 + 3 \cdot 2.34^2 \cdot 2.36}{3 \cdot 230} = 0.215$$

Η ονομαστική ολίσθηση υπολογίζεται από τύπο:

$$s = \frac{p_{al}}{p_{ag}} = \frac{p_{al}}{P_n + p_{al} + p_{mv} + p_{stray}} = \frac{321.45}{3000 + 321.45 + 36 + 3} = 0.095$$

Η ονομαστική ροπή του κινητήρα λαμβάνεται από τον εξής τύπο:

$$T_n = \frac{P_n}{2\pi \frac{f}{p_1} (1 - s_n)} = \frac{3000}{2\pi \frac{50}{2} (1 - 0.095)} = 21.10 \text{ Nm}$$

Η ροπή ανατροπής υπολογίζεται από την σχέση

$$T_{bk} = \frac{3p_1}{2\omega_1} \frac{V_{ph}^2}{X_{sl} + X_{rl}} = \frac{3 \cdot 2}{2 \cdot 2\pi 50} \frac{230^2}{4.78 + 2.43} = 70.06 \text{ Nm}$$

Το ρεύμα εκκίνησης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\begin{aligned} I_{LR} &= \frac{V_{ph}}{\sqrt{(R_s + R_r^{s=1})^2 + (X_{sl}^{s=1} + X_{rl}^{s=1})^2}} = \frac{230}{\sqrt{(2.36 + 3.93)^2 + (3.65 + 2.356)^2}} \\ &= 26.44 \text{ A} \end{aligned}$$

Η ροπή εκκίνησης λαμβάνεται από τον τύπο:

$$T_{LR} = \frac{3R_r^{s=1}I_{Lr}^2}{\omega} = \frac{3 \cdot 3.93 \cdot 26.44^2}{2\pi 50} 2 = 52.46 Nm$$

Ο συντελεστής $\cos\varphi$ δίνεται

$$\cos\varphi = \frac{P_n}{\sqrt{3}V_{ph}I_{ov}n_n} = \frac{3000}{3 \cdot 230 \cdot 6.1 \cdot 0.81} = 0.87$$

16. ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

Κάνοντας επεμβάσεις και αλλαγές στις εσωτερικές διαστάσεις του στάτη και του δρομέα καταφέραμε να φτάσουμε τη ροπή εκκίνησης σε ένα επιθυμητό επίπεδο. Συγκεκριμένα η παράμετρος που αυξήσαμε για τη βελτίωση της ροπής ήταν ο αριθμός των αυλακιών του δρομέα (N_r), καθώς από 28 αυλάκια αυξήθηκαν στα 48. Με την αλλαγή αυτή χρειάστηκε να υπολογίσουμε πάλι το ρεύμα μπάρας (A_b) το οποίο από 296.4A μειώθηκε σε 165.42A. Στη συνέχεια υπολογίσαμε το ρεύμα δαχτυλιδιού βραχυκύκλωσης (I_{er}) το οποίο από 673.63A μειώθηκε στα 633.66A. Άλλαξε επίσης το βήμα του αυλακιού από 10.3mm σε 6.4mm. Συνεχίσαμε με τον υπολογισμό των αντιστάσεων και αντιδράσεων του κινητήρα, οι οποίες μεταβλήθηκαν ως εξής:

$$\text{από } R_s = 2.14\Omega \quad \text{σε } R_s = 2.36\Omega$$

$$\text{από } X_{sl} = 2.97\Omega \quad \text{σε } X_{sl} = 4.87\Omega$$

$$\text{σε } (R_r)_{sn} = 3.93\Omega$$

$$\text{σε από } (X_{rl})_{skew}^{s=sn} = 2.466\Omega$$

Κλείνοντας υπολογίσαμε τις παραμέτρους του φαινομένου λοξοδρόμησης, τις απώλειες του κινητήρα και το βαθμό απόδοσης και καταλήξαμε στο σημείο υπολογισμού των χαρακτηριστικών του κινητήρα και στο επιθυμητό επίπεδο ροπής εκκίνησης.

Ροπή Εκκίνησης:

$$\text{από } T_{LR} = 20.5 Nm \quad \text{σε } T_{LR} = 52.46 Nm$$

Βαθμός Απόδοσης:

$$\text{από } n = 86\% \quad \text{σε } n = 81.12\%$$

17. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ION BOLDEA, SYED A. NASAR «THE INDUCTION MACHINES DESIGN HANDBOOK», SECOND EDITION, CRC PRESS LLC, USA 2010.
- STEPHEN J. CHARMAN «ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC», 3η ΕΚΔΟΣΗ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2003.
- ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΤΣΙΜΟΥΡΤΑΚΗ