



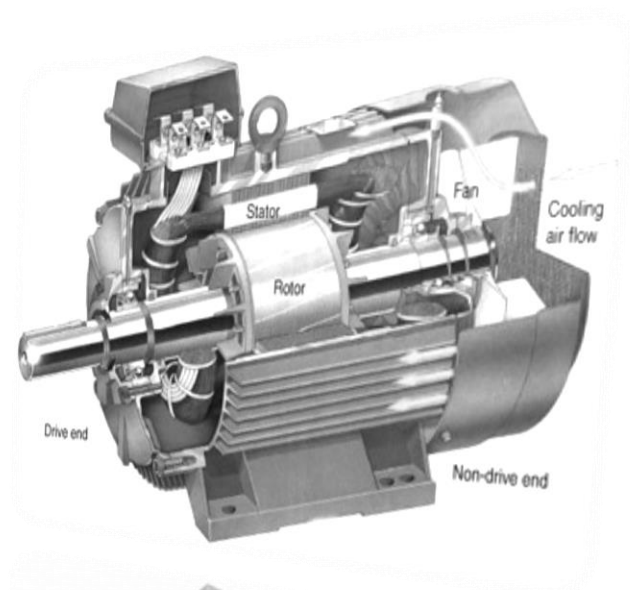
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΡΙΘΜΟΣ 1439

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΑΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ

ΜΠΟΤΑΣ ΧΡΙΣΤΟΣ 5859

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ

ΧΑΡΑΛΑΜΠΑΚΟΣ ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ- ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ ΟΚΤΩΜΒΡΙΟΣ 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία ολοκληρώθηκε με την πολύτιμη και καθοριστικής σημασίας βοήθεια του καθηγητή κ. Χαραλαμπάκου Βασίλειου Νεκτάριου τον οποίο και ευχαριστώ ιδιαίτερα.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
Κεφάλαιο 2 ΙΣΤΟΡΙΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	7
Κεφάλαιο 3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	9
Κεφάλαιο 4 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	12
4.1 Ισοδύναμο του επαγωγικού κινητήρα και απώλειες	15
4.2 Ροπή του επαγωγικού κινητήρα με εφαρμογή φορτίου στον άξονα	18
Κεφάλαιο 5 Κατασκευαστικά επαγωγικού κινητήρα	27
5.1 Πυρήνας.....	29
5.2 Γεωμετρία αυλακιών	30
5.3 Τυλίγματα	33
5.4 Ηλεκτρικοί αγωγοί.....	39
5.5 Μονωτικά υλικά	40
Κεφάλαιο 6 ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ 15 kW.....	42
6.1 Διαστασιολόγηση του κινητήρα	44
6.2 Τυλίγματα στάτη	47
6.3 Υπολογισμός διαστάσεων των αυλακιών του στάτη.....	54
6.4 Υπολογισμός διαστάσεων αυλακιών δρομέα	60
6.5 Υπολογισμός των διαστάσεων άξονα.....	64
6.6 Υπολογισμός ρεύματος μαγνήτισης	65
6.7 Αντιστάσεις και αντιδράσεις κινητήρα	69
6.8 Υπολογισμός αντιδράσεων κινητήρα	73
6.9 Απώλειες και βαθμός απόδοσης.....	79
6.10 Χαρακτηριστικά λειτουργίας του κινητήρα.....	82
6.11 Υπολογισμός ισοδύναμου thevenin	83
6.12 Χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας	84
Κεφάλαιο 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	90
ΠΗΓΕΣ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ	97

Περίληψη

Στην παρούσα πτυχιακή μελετάται ένας τετραπολικός επαγωγικός κινητήρας ισχύος 15 kW, ονομαστικής ταχύτητας 1471 rpm, με συντελεστή ισχύος 0,847 και βαθμό απόδοσης 0,91. Κύριος στόχος της πτυχιακής αποτελεί η βελτίωση της ροπής εκκίνησης.

Στα πέντε πρώτα κεφάλαια γίνεται μια αναφορά στη θεωρία των επαγωγικών κινητήρων, στην ιστορική εξέλιξη τους, και στα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τους. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται η αρχές λειτουργίας των επαγωγικών κινητήρων, γίνεται αναφορά στην μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική μέσω των νόμων που διέπουν τον μαγνητισμό και τον ηλεκτρισμό. Στο έκτο και έβδομο κεφάλαιο πραγματοποιείται η μελέτη του επαγωγικού κινητήρα. Στην αρχή πραγματεύονται τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του επαγωγικού κινητήρα που είναι προς μελέτη δηλαδή, υπολογίζονται οι διαστάσεις του κινητήρα, των αυλακιών και του άξονα και γίνεται μια αναφορά στο πώς επηρεάζουν αυτές τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του κινητήρα. Επίσης γίνεται υπολογισμός των μαγνητικών δυνάμεων που δημιουργούνται στο εσωτερικό του και των ρευμάτων που παράγονται στα τυλίγματα του. Επιπλέον μέσω των παραπάνω υπολογισμών εκτιμώνται οι αντιστάσεις και οι αντιδράσεις του επαγωγικού κινητήρα, που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή της ροπής εκκίνησης και ροπής ανατροπής. Κατόπιν με βοήθεια του προγράμματος Scilab έγινε εξομοίωση στην σχεδιαστική μελέτη του επαγωγικού κινητήρα. Μέσω αυτού εξάγονται συμπεράσματα για τους τρόπους βελτίωση της ροπής εκκίνησης και ανατροπής μεταβάλλοντας της διαστάσεις και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα.

Κεφάλαιο 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενέργεια είναι μια από της πιο σημαντικές έννοιες της φυσικής. Η μορφές της ενέργειας είναι η μηχανική, χημική, πυρηνική, θερμική και η ηλεκτρομαγνητική η οποία θα αποτελέσει και το αντικείμενο μελέτης. Χαρακτηρίζονται από την δυνατότητα τους να αλλάζουν μορφές άλλα η συνολική ενέργεια παραμένει σταθερή, αυτή η ιδιότητα αποτελεί την αρχή διατήρησης της ενέργειας, πράγμα που την καθιστά τόσο χρήσιμη.

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι πολύ σημαντική στην εποχή μας. Μέρος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προορίζεται για μετατροπή σε θερμική και σε κινητική ενέργεια. Ένα πάλι μεγάλο κομμάτι μετατρέπεται σε μηχανική με τους ηλεκτρικούς κινητήρες. Ο λόγος που χρησιμοποιούνται ηλεκτρικές μηχανές είναι ότι μπορούν να τροφοδοτούνται πολύ εύκολα από ένα ηλεκτρικό δίκτυο, μεγάλους μήκους . Το δίκτυο μπορεί να είναι τριφασικό ή μονοφασικό.

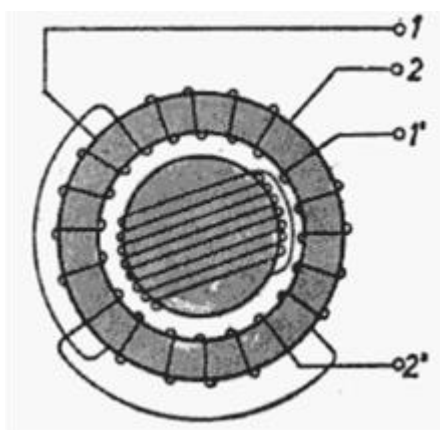
Ένα τύπος ηλεκτρικού κινητήρα είναι η επαγωγική μηχανή. Η επαγωγική μηχανή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως γεννήτρια αν από μηχανική μετατραπεί σε ηλεκτρική είτε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κινητήρας αν από ηλεκτρική μετατραπεί σε μηχανική όπου και έχει μεγάλη αποδοχή. Ένας επαγωγικός κινητήρας χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές στην καθημερινή ζωή όπως σε ψυγεία, καταψύκτες, μίξερ, αντλίες και άλλα. Επίσης χρησιμοποιείται και στην βιομηχανία σε μεταφορικές ταινίες, και σε άλλα. Αυτές οι μηχανές έχουν καταλάβει μεγάλο μέρος της αγοράς λόγω των αντοχών τους και του χαμηλού κόστους τους. Στην αρχή κυριαρχούσαν οι μηχανές συνεχούς ρεύματος, εφόσον οι επαγωγικές μηχανές είχαν πρόβλημα με τη ρύθμιση της ταχύτητας και των εκκινήσεων τους. Ωστόσο με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών και την δημιουργία inverter ,όπου είναι εφικτό να ρυθμιστεί η συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας, οι επαγωγικές μηχανές κέρδισαν μεγάλο μέρος της αγοράς.

Στις αναπτυσσόμενες χώρες το 10% όλων των επαγωγικών μηχανών τροφοδοτούνται με μεταβλητή συχνότητα, και υπάρχει και συνεχής αύξηση. Υπολογίζεται ότι την επόμενη δεκαετία πάνω από το 50% θα χρησιμοποιούν επαγωγικές με μεταβλητή ταχύτητα [1]. Οι επαγωγικές μεταβλητής ταχύτητας χρησιμοποιούνται στις μεταφορές, σε αντλίες ,σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα και άλλα.

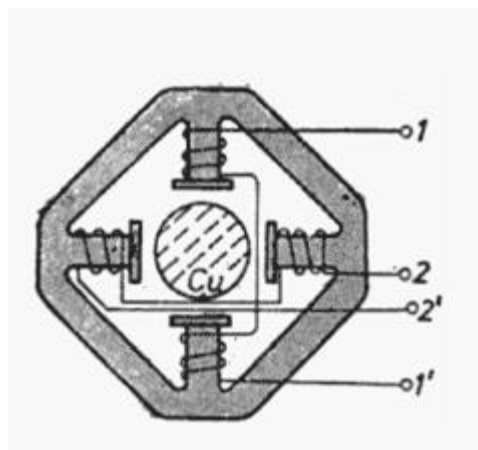
Κεφάλαιο 2

ΙΣΤΟΡΙΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Κάνοντας μια αναδρομή στην ιστορία του επαγωγικού κινητήρα, το 1831 ο Faraday ανακάλυψε τους νόμους της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής και το 1860 ο Maxwell διατύπωσε τους νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού. Το 1824 ο Γάλλος φυσικός Francois Arago διατύπωσε το



Εικόνα 1 Ευρεσιτεχνία Tesla

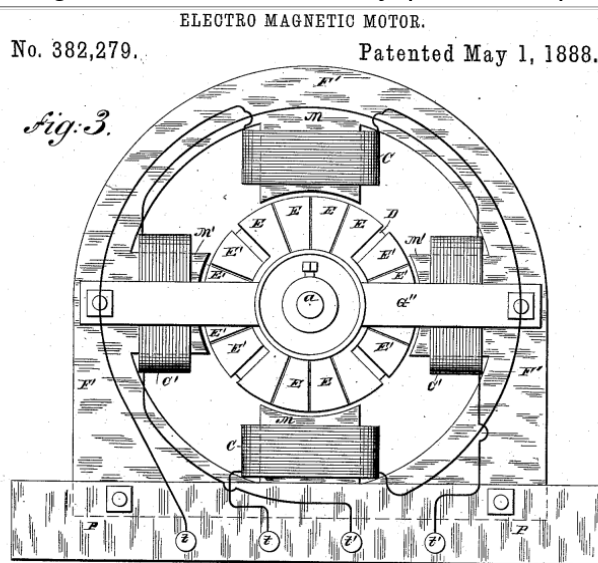


Εικόνα 2. Ευρεσιτεχνία Ferrari

περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο μέσω διακοπών on/off. Ο Walter Baily κατέδειξε για πρώτη φορά το 1879 την πρώτη πρωτογενή επαγωγική μηχανή. Οι πατέρες της επαγωγικής μηχανής είναι ο Galileo Ferrari (1886) και ο Nikola Tesla (1887) [5]. Οι ευρεσιτεχνία του Ferrari (Εικόνα 1) περιλαμβάνει έναν διπολικό στάτη από σιδηρομαγνητικό υλικό και ο δρομέας του είναι ένας χάλκινος κύλινδρος. Η ευρεσιτεχνία του Tesla (Εικόνα 2) είχε τον ίδιο στάτη αλλά ο δρομέας του περιλάμβανε επίσης τυλίγματα επάνω σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό.

Ο Tesla παρουσίασε τις ευρεσιτεχνίες του στο American Institute of Electrical Engineers (AIEE) με τίτλο *A New System for Alternating Current Motors* [5]. Οι ευρεσιτεχνίες που παρουσίασε περιλάμβαναν τρεις τετρατοπολικές μηχανές: η πρώτη αποτελούνταν από μία Reluctance motor μη αυτόματης εκκίνησης, η άλλη από μια επαγωγική δακτυλιοφόρου δρομέα αυτό-εκ κινούμενη (Εικόνα 3) και η Τρίτη από μια σύγχρονη μηχανή με συνεχή τροφοδοσία του δρομέα αυτό-εκ κινούμενη. Μια σύγχρονη επαγωγική μηχανή είναι πιο περίπλοκη κατασκευαστικά, με καλύτερη αποδοτικότητα αλλά με την ίδια αρχή λειτουργίας. Το 1889 ο Dolivo-Dobronolsky εφηύρε τον κινητήρα κλωβού και τον κινητήρα διπλού-κλωβού. Επειδή ο διπολικός κινητήρας του Tesla δεν είναι πρακτικός εξαιτίας των πολλών δονήσεων, υποστήριξε το τριφασικό δίκτυο για την τροφοδότηση των κινητήρων και άλλων καταναλωτών.

Ωστόσο ο πρώτος πρακτικός επαγωγικός κινητήρας κατασκευάστηκε από τον George Westinghouse το 1892, ο οποίος ήταν υπάλληλος της εταιρίας GF Scott και είχε οριστεί ως



Εικόνα 3 Κινητήρας επαγωγικός δακτυλιοφόρου δρομέα αυτό-εκκινούμενη

βοηθός του Tesla και αργότερα ανέλαβε την ανάπτυξη του επαγωγικού κινητήρα Westinghouse [5]. Οι κινητήρες που ανέπτυξε ήταν διπολικοί καθώς και μια σειρά πολυφασικοί των 60 Hz το 1893. Οι τριφασικοί κινητήρες αναπτύχθηκαν από την General Electric Company το 1891. Η ευρεία βιομηχανική χρήση άρχισε το 1900. Την αγορά την κατείχαν οι dc μηχανές λόγω του ότι στις επαγωγικές μηχανές υπήρχε αδυναμία ρύθμισης των στροφών μέχρι το 1986, οπότε και αναπτύχθηκαν οι ηλεκτρονικοί IGBT PWM οι οποίοι επέτρεπαν την ρύθμιση της συχνότητας. Αυτό προώθησε

θεαματικά τις επαγωγικές μηχανές μεταβλητής ταχύτητας και ιδιαίτερα στην βιομηχανία. Τα κύρια ιστορικά γεγονότα που σημάδεψαν την επαγωγική μηχανή είναι τα εξής [1]:

- Καλύτερα αναλυτικά μοντέλα σταθερότητας και σχεδιαστικά.
- Καλύτερα σιδηρομαγνητικά και μονωτικά υλικά και σύστημα ψύξης.
- Σχεδίαση βελτιστοποίησης και στοχαστική μέθοδος.
- IGBT PWM αλλαγή της συχνότητας με χαμηλές απώλειες και υψηλή πυκνότητα ισχύος (kW/m^3)
- Μέθοδος πεπερασμένων υλικών (FEM) για ανάλυση του μαγνητικού πεδίου σε συνδυασμό με κύκλωμα - FEM για περιεκτική εξερεύνηση του επαγωγικού κινητήρα με κριτήριο την μαγνητική και ηλεκτρική φόρτιση.
- Εξελίξεις στον επαγωγικό κινητήρα για υπερύψηλες ταχύτητες.
- Καινούργιες και καλύτερες μέθοδοι παραγωγής των επαγωγικών μηχανών.
- Ολοκληρωμένο σύστημα (επαγωγική μηχανή με PWM σε ένα κομμάτι).

Κεφάλαιο 3

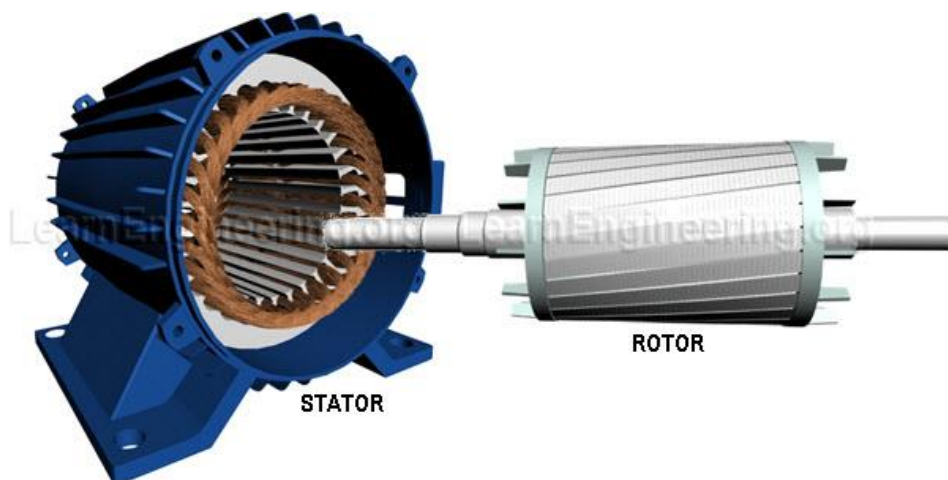
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Οι επαγωγικοί κινητήρες κατασκευάζονται για να τροφοδοτούνται από ηλεκτρικό δίκτυο. Η τροφοδοσία ενός κινητήρα είναι είτε μονοφασική είτε τριφασική. Οι μονοφασικές επαγωγικές μηχανές χρησιμοποιούνται περισσότερο για οικιακή χρήση, είναι αυτό-εκ κινούμενες και η ισχύς τους κυμαίνεται από 2,2 έως 3 kW, με συνοδεία βοηθητικού πυκνωτή. Εφαρμόζονται κυρίως σε αντλίες, μεταφορικές ταινίες, λιαστήρες κ.α [1] (Εικόνα 4).



Εικόνα 4 Μονοφασικός κινητήρας

Οι τριφασικές επαγωγικές μηχανές χρησιμοποιούνται όταν επιδιώκεται μεγάλη ισχύς. Η κατασκευή τους γίνεται από αλουμίνιο για κατασκευές κάτω από 55kW. Επίσης το περίβλημα κατασκευάζεται από σιδερένια πτερύγια ψύξης για μηχανές έως 2MW (Εικόνα 5).



Εικόνα 5 Επαγωγικός κινητήρας με πτερύγια ψύξης

Οι επαγωγικές μηχανές χωρίζονται σε κλάσεις ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους (πίνακας 3.1). Η κλάση B (η EFF2 στην EU) είναι η κανονική μηχανή μέτριας απόδοσης. Για εφαρμογές που χρειάζονται μεγάλες ροπές εκκίνησης χρησιμοποιείται επαγωγικός κινητήρας διπλού κλωβού. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε γεραμούς όπου απαιτείται μεγάλη ροπή εκκίνησης. Επίσης αυτοί οι κινητήρες έχουν ανάγκη από άμεση πέδη για αυτό συνοδεύονται με ηλεκτρομαγνητικά φρένα. Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε χώρους όπου υπάρχει δυσμενές περιβάλλον θα πρέπει να καθαρίζονται και η επιλογή του κινητήρα θα πρέπει να έχει καλή κλάση προστασίας [1].

Type	Starting Torque	Starting Current	Slip	Uses	Locked-Rotor Current With Full Voltage
<u>Class A</u>	Normal	Normal	Normal	Fans, Pumps, Low inertia loads which are frequently started and stopped.	More than 6 times the rated full load current
<u>Class B</u>	Normal	Low	Normal	Loads which has High Moment of inertia. Large Fans Pumps	5 to 5.5 times the full load current
<u>Class C</u>	High	Low	Normal	Crushers, boring mills, conveyors, textile machineries, wood working equipment	5 to 5.5 times the full load current
<u>Class D</u>	High	Low	High	Bulldozers, shearing machines, punch presses, hoists, foundry & stamping machines	5 to 5.5 times the full load current
<u>Class E</u>	Low	Normal	Low		
<u>Class F</u>	Low	Low	Normal		5 to 5.5 times the full load current

Πίνακας 3.1 Πίνακας με τις κλάσεις του επαγωγικού κινητήρα και με τα χαρακτηριστικά κάθε κλάσης

Η κλάση προστασίας συμβολίζεται με IP και αριθμό (π.χ IP55) όπου ο πρώτος αριθμός αναπαριστά την προστασία από στερεά και ο δεύτερος από υγρά. Ο αλουμινένιος σκελετός θα πρέπει να προστατεύεται λόγω της εύκολης διάβρωσης του. Η επαγωγική μηχανή χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό στις ανεμογεννήτριες έως και 2000kW ανά μονάδα [1].

Μία επαγωγική μηχανή μπορεί να τροφοδοτείται από IGBT PWM που δίνει την ικανότητα μεταβολής της ταχύτητας. Το Inverter μπορεί να τροφοδοτεί με ισχύ έως 500kW με 690 V [1].

Ένας άλλος τύπος επαγωγικού κινητήρα είναι ο Roller table. Αυτός ο τύπος κινητήρα χρησιμοποιείται για χαμηλές ταχύτητες (με ή χωρίς μηχανικά γρανάζια ή συνοδεύεται με inverter) και για υψηλή ροπή, επίσης μπορεί να δουλεύει σε περιβάλλον με υψηλές θερμοκρασίες και σε χώρου με υγρασία και σκόνη. Αυτός ο κινητήρας έχει εφαρμογή σε ταινίες, σε ανυψωτικά και τραίνα. (Εικόνα 6).

Η επαγωγική μηχανή χρησιμοποιείται και σε θαλάσσιο περιβάλλον, η ισχύς αυτών των κινητήρων είναι έως 700 kW. Οι συγκεκριμένοι κινητήρες είναι κατασκευασμένοι από αλουμίνιο για χαμηλές ισχύεις, επίσης κατασκευάζεται από χάλυβα και σίδηρο. Η κατασκευή είναι τελείως κλειστή



Εικόνα 6 Κινητήρας Roller table

Κεφάλαιο 4

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή ο ηλεκτρικός κινητήρας είναι μια μηχανή που μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Ένας επαγωγικός κινητήρας αποτελείται από το περιστρεφόμενο μέρος (δρομέα) και από το στάσιμο (στάτη). Η μετατροπή της ενέργειας γίνεται μέσω της δράσης ενός μαγνητικού πεδίου, που αναπτύσσεται από τα τυλίγματα του στάτη. Αυτό το μαγνητικό πεδίο δρα επάνω στα τυλίγματα του δρομέα, εξεπάγοντας τάση σε αυτά. Η τάση στα άκρα των αγωγών του δρομέα προκαλείται από την σχετική κίνηση του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη.

Αυτή η τάση δίνεται από την εξίσωση:

$$e_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad (4.1)$$

v : ταχύτητα του δρομέα

B : μαγνητική επαγωγή

l : μήκος των αγωγών

Η τάση εξ επαγωγής στα τυλίγματα του δρομέα εξαρτάται από:

- Τη μαγνητική ροή
- Την ταχύτητα περιστροφής
- Τη σταθερά κατασκευαστικών χαρακτηριστικών της μηχανής

Όταν τα τυλίγματα του δρομέα διαρρέονται από ρεύμα δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από αυτά, με κατεύθυνση ανάλογη της φοράς του ρεύματος και κάθετο στο πηνίο που διαρρέεται από ρεύμα. Η μαγνητική επαγωγή του δρομέα και η μαγνητική επαγωγή του στάτη δημιουργούν μία ροπή ανάλογη της μεταξύ τους γωνίας. Αυτή η επαγόμενη ροπή θα είναι μέγιστη όταν η μεταξύ γωνία των μαγνητικών επαγωγών του δρομέα και του στάτη είναι 90 μοίρες [3].

Η εξίσωση αυτής της δύναμης είναι:

$$F = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \quad (4.2)$$

i : Μέγεθος του ρεύματος

Η ροπή που εφαρμόζεται στον δρομέα του κινητήρα από την αλληλεπίδραση των δύο μαγνητικών επαγωγών, δίνεται από την εξής εξίσωση:

$$\tau = k \mathbf{B}_r \times \mathbf{B}_s \quad (4.3)$$

B_r : Μαγνητική επαγωγή του δρομέα

B_s : Μαγνητική επαγωγή του στάτη

k : συντελεστής που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του στάτη

Η επαγόμενη ροπή της μηχανής εξαρτάται από τα εξής:

- Τη μαγνητική επαγωγή του δρομέα
- Τη μαγνητική επαγωγή του στάτη
- Το ημίτονο της μεταξύ τους γωνίας και
- Μία σταθερά που εξαρτάται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

Με την εφαρμογή μιας εναλλασσόμενης τάσης στα τυλίγματα του στάτη δημιουργείται ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτό το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο θα αναγκάσει τον δρομέα να περιστρέφεται κυκλικά, προσπαθώντας να ευθυγραμμιστεί με το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη. Αν η ταχύτητα του δρομέα ήταν ίση με τη σύγχρονη ταχύτητα, δεν θα υπήρχε σχετική ταχύτητα των αγωγών του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη και δε θα αναπτύσσονταν τάση εξ επαγωγής στα άκρα τους. Οπότε αν η τάση στους αγωγούς του δρομέα είναι μηδέν δεν θα αναπτύσσεται ρεύμα άρα και μαγνητικό πεδίο. Η επαγόμενη ροπή θα ήταν μηδέν [3].

Η ταχύτητα του δρομέα εξαρτάται από την συχνότητα της τάσης που εφαρμόζεται στον στάτη και από τον αριθμό των πόλων που δημιουργούν τα τυλίγματα του στάτη.

Η ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, δίνεται από την σχέση :

$$n_{sync} = \frac{120 \cdot f_e}{P} \quad (4.4)$$

P : ζεύγη πόλων

f_e : συχνότητας της εφαρμοζόμενης τάσης

Όπως προαναφέρθηκε η επαγόμενη τάση στους αγωγούς του δρομέα εξαρτάται από την σχετική κίνηση δρομέα με το μαγνητικό πεδίο. Δύο είναι τα μεγέθη που περιγράφουν αυτή τη σχετική κίνηση. Το πρώτο μέγεθος είναι η ταχύτητα ολίσθησης, που ορίζει την διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από την σύγχρονη ταχύτητα [3].

$$n_{slip} = n_{sync} - n_m \quad (4.5)$$

n_{slip} : ταχύτητα ολίσθησης

n_m : ταχύτητα του κινητήρα

Το δεύτερο μέγεθος είναι η ολίσθηση που ουσιαστικά εκφράζει την σχετική κίνηση, πρόκειται για τη σχετική ταχύτητα ολίσθησης εκφρασμένη σε εκατοστιαία βάση.

$$s = \frac{n_{slip}}{n_{sync}} 100\% \quad (4.6)$$

s: ολίσθηση

Από τον τύπο της ολίσθησης και της ταχύτητας ολίσθησης εξάγεται η εξίσωση:

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} 100\% \quad (4.7)$$

Οπότε για ταχύτητα δρομέα ίση με την σύγχρονη ταχύτητα η ολίσθηση είναι μηδέν ($s=0$), και για σταματημένο δρομέα η ολίσθηση είναι ίση με ένα ($s=1$).

Μιας και το τύλιγμα του δρομέα είναι στρεφόμενο η συχνότητα στο δευτερεύον δεν είναι απαραίτητα ίση με την συχνότητα του στάτη. Όταν ο δρομέας είναι ακίνητος τότε η συχνότητα του δρομέα είναι ίση με του στάτη, ενώ όταν η ταχύτητα του δρομέα είναι ίση με την σύγχρονη ταχύτητα τότε η συχνότητα δρομέα είναι μηδενική. Η συχνότητα του δρομέα είναι ανάλογη της διαφοράς της ταχύτητας του πεδίου με την ταχύτητα δρομέα.

Από τα παραπάνω η συχνότητα ολίσθησης είναι δυνατό να γραφεί ως εξής:

$$f_r = s f_e \quad (4.8)$$

f_r : συχνότητα δρομέα

Από την εξίσωση (4.7) και (4.8) η συχνότητα δρομέα είναι ίση :

$$f_r = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} f_e \quad (4.9)$$

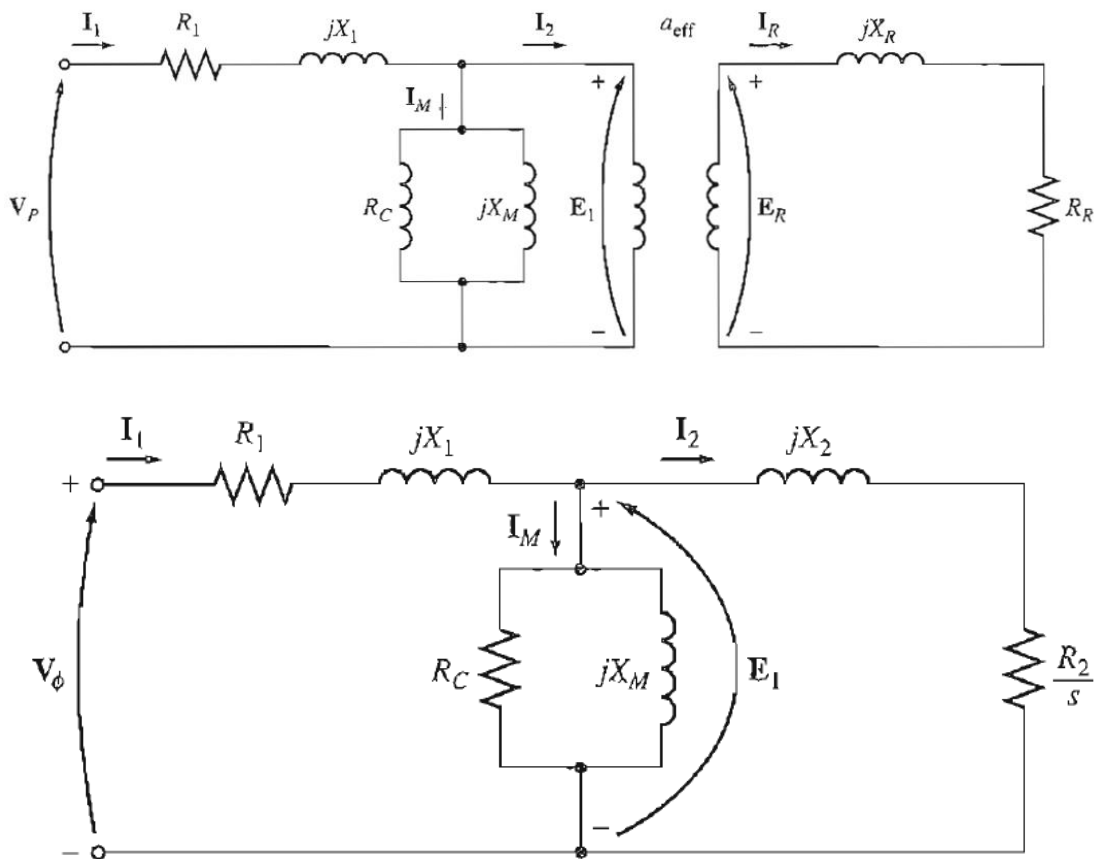
Από την εξίσωση (4.4), η συχνότητα δρομέα

$$f_r = \frac{P}{120} (n_{sync} - n_m) \quad (4.10)$$

Οπότε παρατηρείται από τον τύπο (4.10) ότι η συχνότητα του δρομέα για ενδιάμεσες καταστάσεις από την ακινησία και την σύγχρονη ταχύτητα εξαρτάται από την ταχύτητα του δρομέα.

4.1 Ισοδύναμο του επαγωγικού κινητήρα και απώλειες

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. Ο επαγωγικός κινητήρας δύναται να εξομοιωθεί με ένα ισοδύναμο κύκλωμα παρόμοιο με αυτό του μετασχηματιστή (Εικόνα 7).



Εικόνα 7 Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα. Στην πρώτη εικόνα απεικονίζεται πραγματικό ισοδύναμο. Στην δεύτερη το τελικό ισοδύναμο.

Στην εικόνα 7 παρουσιάζεται το μετασχηματισμένο ισοδύναμο ως προς το πρωτεύον και με ξεχωριστό κύκλωμα το δευτερεύον. Στην πραγματικότητα το κύκλωμα του δρομέα είναι ένα ξεχωριστό κύκλωμα από αυτό του στάτη και ενώνονται με την μαγνητική επαγωγή μέσω του διακένου. Η τάση του πρωτεύοντος συνδέεται με την τάση στο δευτερεύον μέσω του ενεργού λόγου μετασχηματισμού a_{eff} . Αυτός ο λόγος είναι ίσος με τον αριθμό των αγωγών ανά φάση του στάτη προς τον αριθμό των αγωγών ανά φάση του δρομέα επί τους συντελεστές βήματος και κατανομής. Από αυτόν τον τύπο συμπεραίνεται ότι σε έναν επαγωγικό κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα θα ήταν εύκολο να βρεθεί ο λόγος μετασχηματισμού σε αντίθεση με

έναν βραχυκυκλωμένου κλωβού που δεν γνωρίζουμε τον ακριβή αριθμό αγωγών στον δρομέα και για αυτό είναι δύσκολος ο προσδιορισμός του [3].

Σε έναν επαγωγικό κινητήρα υπάρχουν ηλεκτρικές και μηχανικές απώλειες. Αυτές οι απώλειες εξομοιώνονται στο ισοδύναμο του κινητήρα.

Στον στάτη του επαγωγικού κινητήρα εμφανίζονται ωμικές απώλειες

$$P_{cu\ stator} = 3I_s^2 R_s \quad (4.11)$$

και απώλειες πυρήνα λόγω υστέρησης και δινορευμάτων

$$P_{core} = 3E_s^2 G_c \quad (4.12)$$

Εξαιτίας του διακένου που υπάρχει ανάμεσα από τον στάτη και τον δρομέα το ρεύμα μαγνήτισης είναι μεγάλο, για αυτό και η τιμή της X_M είναι μικρή. Η ισχύς που διασχίζει το διάκενο του κινητήρα είναι αυτή που απέμεινε αφού αφαιρέθηκαν οι απώλειες του στάτη. Στο κύκλωμα του δρομέα όπως και στον στάτη υπάρχουν ωμικές απώλειες, επίσης και αντίδραση μαγνητικής διαρροής (X_R).

$$P_{RCL} = 3I_R^2 R_2 \quad (4.13)$$

Η αντίδραση και η τάση του δευτερεύοντος σε αντίθεση με τον μετασχηματιστή επηρεάζονται από την μεταβολή της συχνότητας του δρομέα. Η ισχύς που απομένει είναι η ισχύς που μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική ενέργεια (P_{conv}). Επίσης στον κινητήρα κατά την περιστροφή υπάρχουν τριβές, και αέρας στο διάκενο του. Από την P_{conv} θα πρέπει να αφαιρεθούν η απώλειες τριβής, εξαιρισμού και οι κατανεμημένες, το αποτέλεσμα θα είναι η ισχύς εξόδου (P_{out}).

$$P_{out} = P_{conv} - P_{F\&W} - P_{misc} \quad (4.14)$$

$P_{F\&W}$: απώλειες τριβής και εξαιρισμού

P_{misc} : κατανεμημένες απώλειες.

Η επαγόμενη τάση και η σύνθετη αντίσταση είναι ανάλογες της ολίσθησης. Οι ωμικές απώλειες δεν επηρεάζεται από την ολίσθηση.

$$E_R = sE_{rr} \quad (4.15)$$

$$X_{lr} = sX_{rr} \quad (4.16)$$

Όπου X_{R0} η αντίδραση του ακινητοποιημένου δρομέα (ανάλογο του f_e).

Από τα παραπάνω στο κύκλωμα του δρομέα προκύπτει το εξής ρεύμα δρομέα.

$$I_R = \frac{E_{R0}}{R_R/s + jX_{R0}} \quad (4.17)$$

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι η μεταβολή της ταχύτητας μπορεί να εκφραστεί με μία μεταβλητή αντίσταση που τροφοδοτείται από μία σταθερή πηγή.

Το τελικό ισοδύναμο προκύπτει με την βοήθεια του λόγου μετασχηματισμού όπως και σε έναν μετασχηματιστή (Εικόνα 7 δευτευρη).

$$E_{rr} = a_{eff} E_R \quad (4.18)$$

$$I_r = \frac{I_{rr}}{a_{eff}} \quad (4.19)$$

$$R_r = a_{eff}^2 R_{rr} \quad (4.20)$$

$$X_{lr} = a_{eff}^2 X_{rr} \quad (4.21)$$

Η εισαγωγή του ισοδύναμου βοηθά στην εξαγωγή των εξισώσεων ισχύος. Οι ισχύεις που καταναλώνονται στον στάτη αναφέρθηκαν παραπάνω.

Αυτή η ισχύς που απομένει από τον στάτη είναι η ισχύς διακένου που επάγεται στον δρομέα. Στον δρομέα το μοναδικό στοιχείο που καταναλώνεται είναι η R_r/s .

$$P_{AG} = 3I_r^2 \frac{R_r}{s} \quad (4.22)$$

Από τις εξισώσεις (4.13) και (4.22) προκύπτει

$$P_{RCL} = sP_{AG} \quad (4.23)$$

Από την εξίσωση (4.23) συμπεραίνεται ότι οι ωμικές απώλειες του δρομέα εξαρτώνται από την ολίσθηση.

Το αποτέλεσμα με την αφαίρεση των ωμικών απωλειών είναι η P_{conv} και με την εξίσωση (4.22) εξάγεται η σχέση

$$P_{CONV} = (1 - s)P_{AG} \quad (4.24)$$

Η επαγόμενη ροπή είναι αυτή που παράγεται από την μετατροπή της ηλεκτρικής σε μηχανική ισχύ. Προσοχή η επαγόμενη ροπή δεν είναι η ροπή εξόδου που κινητήρα. Αν από την επαγόμενη ροπή αφαιρεθεί η ροπή τριβής, εξαιρισμού τότε εξάγεται η ροπή εξόδου.

Η επαγόμενη ροπή δίνεται από την εξίσωση

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \quad (4.25)$$

Επίσης η εξίσωση της επαγόμενης ροπής εξάγεται σε σχέση με την ισχύ διακένου και την σύγχρονη ταχύτητα

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_m} \quad (4.26)$$

4.2 Ροπή του επαγωγικού κινητήρα με εφαρμογή φορτίου στον άξονα

Σε έναν επαγωγικό κινητήρα (βραχυκυκλωμένου ή δακτυλιοφόρου) στα τυλίγματα του στάτη εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση. Αυτή θα παράγει ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Με την σειρά του αυτό το μαγνητικό πεδίο θα επάγει τάση στα τυλίγματα του δρομέα (αυτή η τάση είναι ανάλογη της ταχύτητα του δρομέα σχέση (4,15)) και επειδή αυτά είναι βραχυκυκλωμένα θα παράγεται ρεύμα. Το μαγνητικό πεδίο που παράγει ο στάτης θα έχει σταθερό μέτρο και θα είναι πάντα μεγάλο εφόσον θα πρέπει να παράγει το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού μαγνητικού πεδίου.

Χωρίς φορτίο

Στην περίπτωση που στον κινητήρα δεν υπάρχει φορτίο στον άξονα του, η τάση που επάγεται στα τυλίγματα είναι μικρή, διότι η ταχύτητα του δρομέα είναι κοντά στην σύγχρονη ταχύτητα δηλαδή η ολίσθηση είναι μικρή, τότε η σχετική ταχύτητα ανάμεσα στο μαγνητικό πεδίο του στάτη και ταχύτητα του δρομέα είναι μικρή άρα και η επαγόμενη τάση είναι και αυτή μικρή. Με την σειρά του και το ρεύμα του δρομέα είναι μικρό επειδή εξαρτάται από την τάση.

Επιπλέον η συχνότητα του δρομέα είναι μικρή λόγω της μικρής ολίσθησης. Στο προηγούμενο κεφάλαιο, στο ισοδύναμο του δρομέα υπήρχε μία αντίδραση X_r . Αυτή η αντίδραση στην περίπτωση χωρίς φορτίο θα είναι σχεδόν μηδενική λόγω της μικρής συχνότητας στον δρομέα. Άρα το ρεύμα και η τάση στον δρομέα θα είναι σχεδόν σε φάση μεταξύ τους. Το μαγνητικό πεδίο του δρομέα θα έχει μικρό μέτρο εφόσον το ρεύμα του δρομέα είναι μικρό. Η ροπή στον κινητήρα θα είναι μικρή και τόσο ώστε να μπορεί να ξεπεράσει την ροπή τριβής και εξασρισμού.

$$\tau = k_B B_S \sin \delta \quad (4.27)$$

Η γωνία δ εξαρτάται από το πόσο το ρεύμα του δρομέα έπεται από την τάση του δρομέα.

Το μαγνητικό πεδίο του δρομέα έπεται του ρεύματος δρομέα κατά 90° . Από αυτό συμπεραίνεται ότι η γωνία δ είναι ίση με την γωνία του συντελεστή ισχύος συν 90° . [3]

$$\delta = \theta_r + 90 \quad (4.28)$$

Όπου η θ_r υπολογίζεται από την εξίσωση

$$\theta_r = \tan^{-1} \frac{X_r}{R_r} \quad (4.29)$$

Αν εξεταστούν τα ημίτονα των δύο όρων θα προκύψει ότι, ο όρος $\sin \delta$ είναι ίσος με τον συντελεστή ισχύος

$$\sin \delta = \sin(\theta_r + 90) = \cos \theta_r \quad (4.30)$$

Με φορτίο

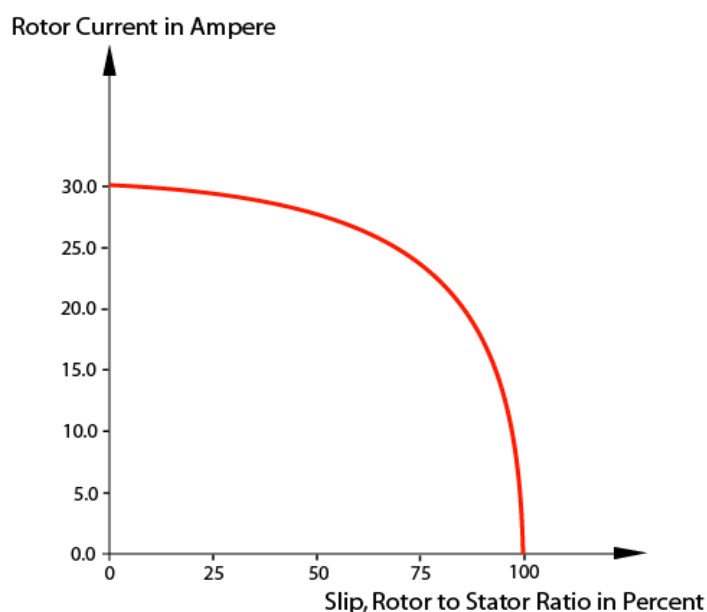
Όταν στον άξονα του κινητήρα προστεθεί μηχανικό φορτίο τότε αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της ταχύτητας του δρομέα. Από αυτό συνεπάγεται αύξηση της ολίσθησης. Η μείωση της ταχύτητας του δρομέα θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της σχετικής ταχύτητας δρομέα και μαγνητικών πεδίων του στάτη. Η αύξηση της σχετικής ταχύτητας θα προκαλέσει αύξηση της επαγόμενης τάσης στον δρομέα και η τάση με την σειρά της θα αυξήσει το ρεύμα του δρομέα. Λόγω της αύξησης της ολίσθησης, η συχνότητα του δρομέα θα αυξηθεί. Η αύξηση της f_r θα προκαλέσει αύξηση της αντίδρασης. Το ρεύμα που δημιουργήθηκε στον δρομέα θα έπεται περισσότερο της τάσης από ότι χωρίς φορτίο, εξαιτίας της περαιτέρω αύξησης της αντίδρασης. Έτσι και το μαγνητικό πεδίο (B_r) που θα δημιουργηθεί από το ρεύμα του δρομέα (I_r), θα είναι αναλόγως αυξημένο με το I_r και θα καθυστερεί της τάσης όσο και το ρεύμα δρομέα (I_r), δηλαδή η γωνία δ θα αυξηθεί.

Η αύξηση του B_r τείνει να αυξήσει την επαγόμενη ροπή ενώ η αύξηση της γωνίας δ τείνει να μειώσει την επαγόμενη ροπή (διότι $\delta \geq 90$ μοιρών). Όμως η επαγόμενη ροπή αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί το πρώτο φαινόμενο (η αύξηση του μαγνητικού πεδίο του δρομέα) είναι εντονότερο από την αύξηση της γωνίας δ . Επίσης η μείωση που προκαλείται στην επαγόμενη ροπή από την αύξηση της γωνίας δ είναι ανάλογη του ημιτόνου αυτής της γωνίας (τ_{ind} ανάλογη $\sin \delta$), η τιμή της γωνίας δ είναι μεγαλύτερη των 90° .

Αυτή η αύξηση της ροπής δεν γίνεται εφ' άπειρον με την αύξηση του φορτίου. Μετά από κάποιο σημείο η μείωση που προκαλεί ο όρος $\sin \delta$ με την αύξηση του φορτίου γίνεται μεγαλύτερη από την αύξηση του B_r . Η επαγόμενη ροπή στον κινητήρα θα φτάσει σε ένα σημείο όπου με μία περεταίρω αύξηση του φορτίου, η ροπή θα μειώνεται και ο κινητήρας θα αδυνατεί να περιστρέψει το φορτίο και θα σταματήσει. Αυτή κρίσιμη μέγιστη ροπή ονομάζεται ροπή ανατροπής.

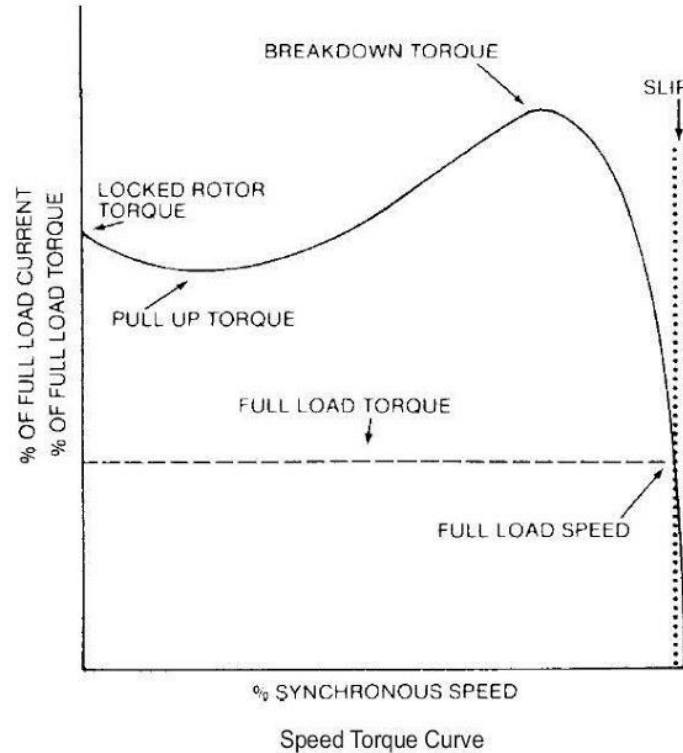
Χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας

Από τον τύπο της επαγόμενης ροπής (4.27), η ροπή είναι ανάλογη του συνολικού μαγνητικού πεδίου (B_s), του μαγνητικού πεδίου του δρομέα (B_r) και του $\sin \delta$. Το συνολικό μαγνητικό πεδίο όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως προκαλείται από την τάση στον στάτη E_s που θεωρείται σταθερή. Στην πραγματικότητα δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται από της μεταβαλλόμενες πτώσεις τάσης των R_s και X_{ls} [3]. Επειδή θεωρείται σταθερή άρα και το ρεύμα που προκαλεί θα είναι σταθερό (I_s). Επομένως το B_s που προκαλείται στην πραγματικότητα από το ρεύμα του στάτη θα είναι και αυτό σταθερό. Η χαρακτηριστική του συνολικού μαγνητικού πεδίου – ταχύτητας δρομέα θα είναι μία ευθεία οριζόντια γραμμή.



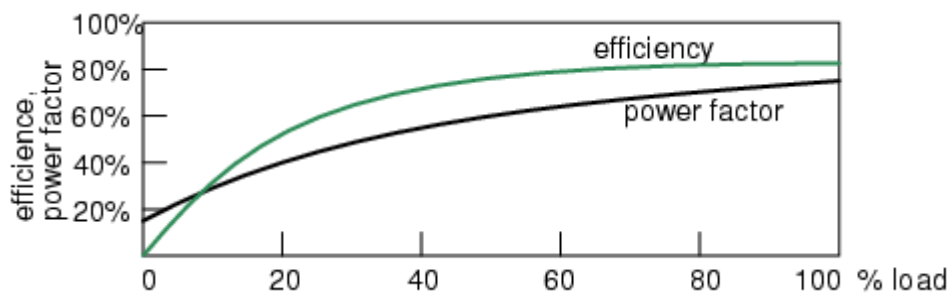
Εικόνα 8 Ρεύμα δρομέα συνάρτηση της ταχύτητας

Ένα άλλο μέγεθος από το οποίο εξαρτάται η επαγόμενη ροπή είναι το μαγνητικό πεδίο του δρομέα (B_r). Το B_r δημιουργείται από το ρεύμα του δρομέα, άρα η μεταβολή του θα είναι ανάλογη με αυτή του ρεύματος, η χαρακτηριστική του μαγνητικού πεδίου του δρομέα θα είναι ίδια με αυτή του ρεύματος δρομέα (Εικόνα 8).



Εικόνα 9 Χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας δρομέα

Το άλλο μέγεθος που εξαρτάται η ροπή είναι το ημίτονο του δ ($\sin\delta$). Από την εξίσωση (4.30) συμπεραίνεται ότι το ημίτονο της δ είναι ίσο και με συντελεστή ισχύος, άρα η γραφική παράσταση του ημιτόνου θα είναι ίση με την γραφική του συντελεστή ισχύος (Εικόνα 10).



Εικόνα 10 Χαρακτηριστική συντελεστής ισχύος - ταχύτητας δρομέα

Με τον γραμμικό πολλαπλασιασμό των χαρακτηριστικών από αυτά τα τρία αναφερθέντα μεγέθη (το B_s , B_r , $\sin\delta$) προκύπτει η εξής χαρακτηριστική ροπής – ταχύτητας (Εικόνα 9).

Η χαρακτηριστική καμπύλη ροπής ταχύτητας χωρίζεται σε τρεις περιοχές. Αυτές οι περιοχές διακρίνονται από την διαφορά ολίσθησης που υπάρχει στην κάθε μία.

Η πρώτη περιοχή είναι το σημείο που δείχνει το slip (Εικόνα 9). Σε αυτό το διάστημα η μηχανή βρίσκεται σε κανονική λειτουργία. Το χαρακτηριστικό αυτής της περιοχής είναι ότι η ταχύτητα του δρομέα είναι κοντά στην σύγχρονη ταχύτητα, δηλαδή η ολίσθηση είναι σε χαμηλά επίπεδα. Όπως διακρίνεται και από την χαρακτηριστική σε αυτό το σημείο η ταχύτητα μειώνεται γραμμικά με την αύξηση του φορτίου, και το ρεύμα του δρομέα έχει γραμμική αύξηση. Επίσης από τις προηγούμενες παραγράφους είναι γνωστό ότι η συχνότητα του δρομέα είναι μικρή, αυτό έχει ως αποτέλεσμα η αντίδραση του δρομέα να είναι αμελητέα. Άρα ο συντελεστής ισχύος είναι κοντά στην μονάδα.

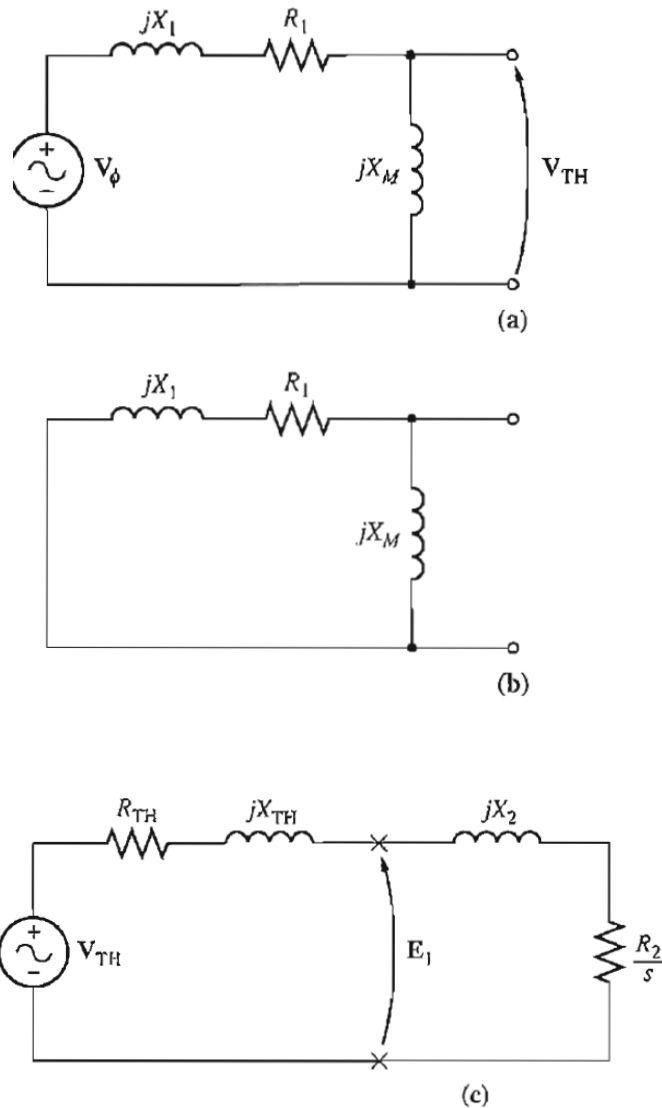
Η δεύτερη περιοχή ονομάζεται μέτριας ολίσθηση και τα όρια της είναι από το σημείο full load speed έως και breakdown torque (Εικόνα 10). Στο διάστημα αυτό η ολίσθηση αυξάνει με μεγαλύτερο ρυθμό με την αύξηση του φορτίου, επίσης το ρεύμα του δρομέα έχει μικρότερη αύξηση (Εικόνα 8). Η αύξηση της ολίσθησης προκαλεί αύξηση στην συχνότητα του δρομέα, με αποτέλεσμα η αντίδραση δρομέα να γίνεται σχεδόν ίση με την αντίσταση του. Με την αύξηση της αντίδρασης ο συντελεστής ισχύος αρχίζει να μειώνεται, αυτή η μείωση του συντελεστή εξουδετερώνει την αύξηση του ρεύματος δρομέα. Ο κινητήρας σε αυτή την περιοχή μπορεί να αποκτήσει την μέγιστη ροπή.

Η Τρίτη περιοχή διακρίνεται από την αστάθεια της ροπής, αυτή η περιοχή ονομάζεται υψηλής ολίσθησης. Στην περιοχή υψηλής ολίσθησης η ροπή του κινητήρα μειώνεται με την αύξηση του φορτίου. Αυτό γίνεται λόγω ότι η περεταίρω αύξηση του ρεύματος δρομέα επικαλύπτεται από την μείωση του συντελεστή ισχύος.

Η ροπή ανατροπή ενός κανονικού ασύγχρονου κινητήρα είναι περίπου 200 έως και 250% της ονομαστικής, ενώ η ροπή εκκίνησης είναι έως και 150% της ονομαστικής.

Εξίσωση επαγόμενης ροπής

Η ροπή ενός επαγωγικού κινητήρα όπως αναφέρεται και στην εξίσωση (4.26) εξαρτάται από την ισχύ διακένου. Επίσης η ισχύς διακένου από την εξίσωση (4.22) είναι συνάρτηση του τετραγώνου του ρεύματος δρομέα. Για να εξαχθεί η εξίσωση της ροπής θα πρέπει να απλοποιηθεί το τελικό ισοδύναμο για να βρεθεί το I_r . Η απλοποίηση του ισοδύναμου μπορεί να γίνει με τη χρήση του ισοδύναμου Thevenin, όπου το τελικό ισοδύναμο θα είναι ίσο με ένα κύκλωμα στοιχείων σε σειρά (Εικόνα 11).



Εικόνα 11 Απλοποίηση του ισοδύναμου κυκλώματος με Thevenin

Η τάση κατά Thevenin δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_{TH} = V_{\phi} \frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} \quad (4.31)$$

Και η σύνθετη αντίσταση δίνεται από την σχέση :

$$Z_{TH} = R_{TH} + jX_{TH} = \frac{jX_M(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_M)} \quad (4.32)$$

Λόγο ότι το $X_M \gg X_1$ και το $X_M + X_1 \gg R_1$ η αντίσταση και η αντίδραση δίνονται κατά προσέγγιση :

$$R_{TH} \approx R_1 \left(\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right)^2$$

$$X_{TH} \approx X_1$$

Χρησιμοποιώντας το 2 νόμο του Kirchhoff στο βρόγχο είναι δυνατό να υπολογιστεί το ρεύμα I_2 . Το μέτρο του ρεύματος δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (4.33)$$

Αφού γίνει γνωστό το μέτρο του ρεύματος με την βοήθεια την εξίσωσης 4.33, από τον τύπο της ισχύς διακένου (4.22) εξάγεται η εξίσωση της επαγόμενης ροπής συνάρτηση της ολίσθησης και της τάσης εισόδου.

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{TH}^2 R_2/s}{\omega_{sync} \left[(R_{TH} + R_2/s)^2 + (X_{TH} + X_2)^2 \right]} \quad (4.34)$$

Από την παραπάνω εξίσωση εξάγει την γραφική παράσταση που απεικονίζεται στην εικόνα 9. [3]

Ροπή ανατροπής

Ένα άλλο σημαντικό μέγεθος στον επαγωγικό κινητήρα είναι η ροπή ανατροπής. Η ροπή ανατροπής εμφανίζεται όταν η ισχύς που καταναλώνεται επάνω στην αντίσταση R_2/s είναι μέγιστη, δηλαδή όταν η ισχύς διακένου είναι μέγιστη. Η ισχύς είναι μέγιστη όταν το μέτρο αυτής της αντίστασης είναι ίσο με το μέτρο της εσωτερικής σύνθετης αντίστασης.

$$\frac{R_2}{s} = \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2} \quad (4.35)$$

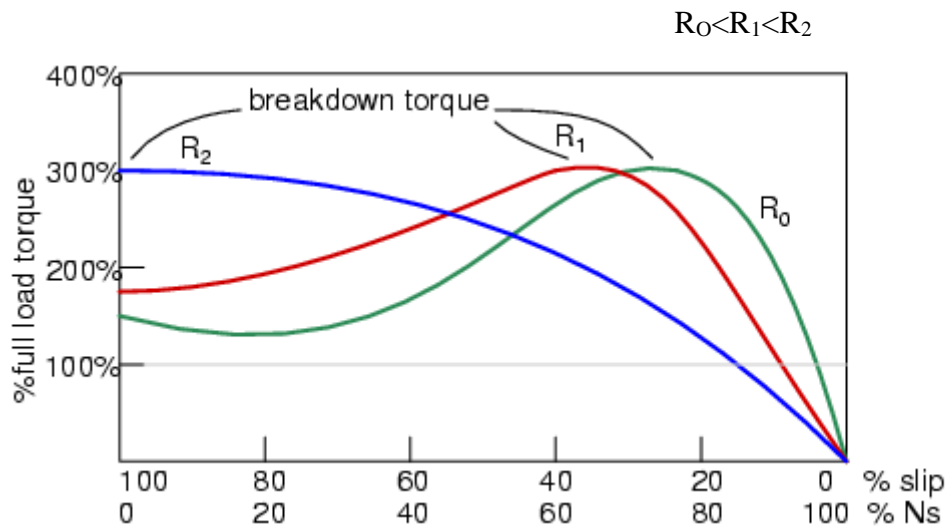
Από την παραπάνω εξίσωση λύνοντας ως προς την ολίσθηση τότε προκύπτει η μέγιστη ολίσθηση:

$$s_{max} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (4.36)$$

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι η μέγιστη ολίσθηση εξαρτάται από την αντίσταση του δρομέα. Για την εξαγωγή της μέγιστης ροπής, εισάγεται στην εξίσωση (4.34) την μέγιστη ολίσθηση. Η εξίσωση που προκύπτει είναι η μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής :

$$\tau_{max} = \frac{3V_{TH}^2}{2\omega_{sync} [R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}]} \quad (4.37)$$

Από την παραπάνω εξίσωση διαφαίνεται ότι η μέγιστη ροπή ανατροπής είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης εισόδου και αντιστρόφως ανάλογη της σύνθετης αντίστασης του στάτη και της αντίδρασης του δρομέα (Εικόνα 12).



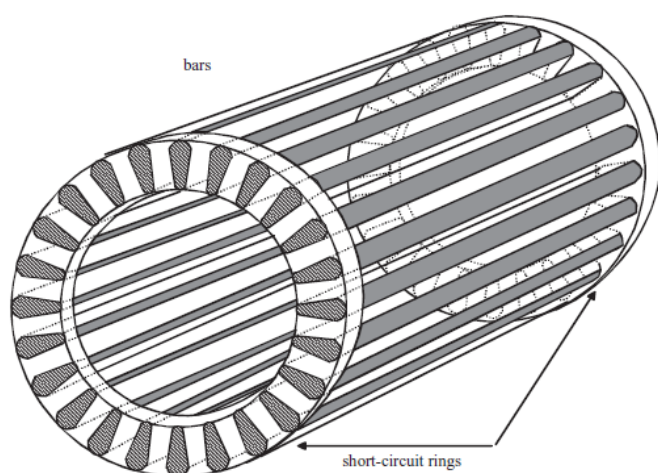
Εικόνα 12 Χαρακτηριστικές ροπές ταχύτητας με διαφορετικές τιμές αντίστασης δρομέα

Από την εικόνα 12 συμπεραίνεται ότι καθώς αυξάνεται η αντίσταση του δρομέα η μέγιστη ολίσθηση μειώνεται, ενώ η ροπή ανατροπής παραμένει σταθερή. Επίσης παρατηρείται ότι η ροπή εκκίνησης αυξάνεται. Αυτό δίνει το πλεονέκτημα στον κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα. Μεταβάλλοντας την αντίσταση του δρομέα, γίνεται να παράγει ο κινητήρας την μέγιστη ροπή κατά την εκκίνηση του.

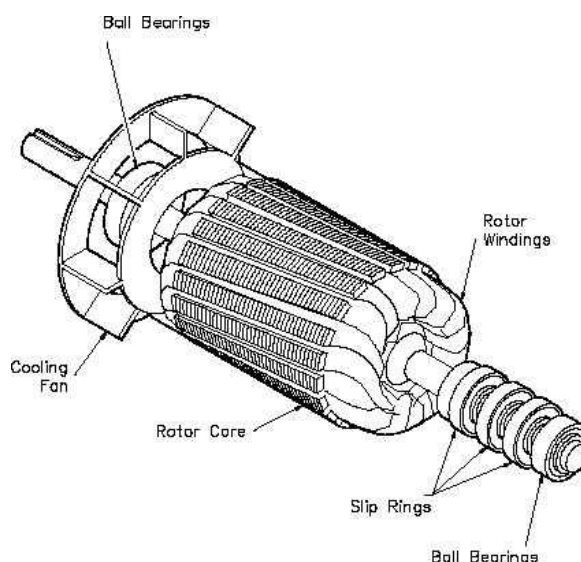
Κεφάλαιο 5

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε αναφορά στην αρχή λειτουργίας του επαγωγικού κινητήρα που στηρίζεται στην δημιουργία μαγνητικού πεδίου από τον στάτη και την επαγωγή τάσης στον δρομέα. Η δημιουργία του μαγνητικού πεδίου γίνεται από τυλίγματα (πηνία) που είναι τοποθετημένα σε αυλάκια μονωμένα από τον πυρήνα του στάτη. Τα τυλίγματα του στάτη είναι κατασκευασμένα από χαλκό και είναι τοποθετημένα έτσι ώστε να δημιουργείται στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο επάγεται στα τυλίγματα του δρομέα αν είναι δακτυλιοφόρου δρομέα ή στις μπάρες αν είναι κλωβού.



Εικόνα 13 Βραχυκυκλωμένου κλωβού



Εικόνα 14 Δακτυλιοφόρου δρομέα

Σε έναν δρομέα βραχυκυκλωμένου κλωβού (Εικόνα 13) για την δημιουργία ρεύματος βραχυκυκλώνονται όλες τις μπάρες αναμεταξύ τους με τα δαχτυλίδια βραχυκύκλωσης. Σε αυτόν τον τύπο δρομέα οι μπάρες κατασκευάζονται από χυτό αλουμίνιο πρεσαρισμένο μέσα στα αυλάκια του δρομέα [1]. Στον δακτυλιοφόρο δρομέα (Εικόνα 14) τα τυλίγματα του είναι πανομοιότυπα με αυτά του στάτη, με την μόνη διαφορά ότι οι άκρες τους συνδέονται σε δαχτυλίδια ολίσθησης. Αυτό δίνει και το πλεονέκτημα της ρύθμισης της ροπής εκκίνησης του κινητήρα. Το υλικό κατασκευής των τυλιγμάτων γίνεται από αλουμίνιο για μικρής ισχύς κινητήρες και από ορείχαλκο ή χαλκό για μεγάλης ισχύς κινητήρες [1].

Τα τυλίγματα που είναι τοποθετημένα στον στάτη ονομάζονται πρωτεύοντα και του δρομέα δευτερεύοντα. Το διάστημα ανάμεσα στο στάτη και τον δρομέα το ονομάζεται διάκενο. Το πλάτος του διακένου στην επαγωγική μηχανή είναι από 0,2 mm έως 0,3 mm. Όσο μεγαλύτερη

είναι αυτή η τιμή αντιστοιχεί ανάλογα και σε μεγαλύτερη ισχύ. Επίσης υπάρχουν και επαγωγικές μηχανές με διπλό τύλιγμα στάτη για να μεταβάλλεται την ταχύτητα. Αυτές οι μηχανές έχουν αντικατασταθεί από ηλεκτρονικές διατάξεις. Τα κύρια μέρη μιας επαγωγικής μηχανής είναι τα εξής:

- Αυλάκια στον μαγνητικό πυρήνα του στάτη
- Ηλεκτρική περιέλιξη του στάτη
- Αυλάκια στον μαγνητικό πυρήνα του δρομέα
- Ηλεκτρική περιέλιξη του δρομέα
- Άξονας στον δρομέα
- Σκελετός του κινητήρα με ρουλεμάν
- Σύστημα ψύξης
- Τερματικό κουτί

Μία επαγωγική μηχανή ταξινομείται στις εξής κατηγορίες:

- περιστροφικής ή γραμμικής κίνησης
- τριφασική ή μονοφασική
- δακτυλιοφόρου ή βραχυκυκλωμένου κλωβού

5.1 Πυρήνας

Ο μαγνητικός πυρήνας μιας επαγωγικής μηχανής αποτελείται από μαγνητικό υλικό με υψηλή διαπερατότητα για να μπορεί να περιορίσει όσο πιο πολύ τη σκέδαση του μαγνητικού πεδίου της μηχανής. Το μαγνητικό υλικό είναι κατασκευασμένο από σιδηρομαγνητικά υλικά. Η υψηλή διαπερατότητα του υλικού σε σχέση με τον αέρα έχει ως αποτέλεσμα την συγκέντρωση του μαγνητικών γραμμών μέσα από το υλικό. Οι ιδιότητες ενός μαγνητικού πυρήνα εξαρτώνται από τους εξής παράγοντες:

- Την γεωμετρία του υλικού.
- Το διάκενο.
- Τις ιδιότητες του υλικού (ειδική διαπερατότητα, υστέρηση).
- Την θερμοκρασία λειτουργίας.
- Αν είναι με ελάσματα ο πυρήνας.

Ο πυρήνας του στάτη και του δρομέα μιας επαγωγικής μηχανής αποτελείται από λεπτά ελάσματα πυριτιούχου χάλυβα [1] .(Εικόνα 15)



Εικόνα 15 Διάφοροι τύποι ελασμάτων στάτη

Η συσκευασία των ελασμάτων γίνεται σε μία ενιαία στοίβα (Εικόνα 16) ή σε πολλαπλές στοίβες (Εικόνα 17). Η ισχύς μίας επαγωγικής μηχανής που έχει ενιαία κατασκευή μπορεί να

είναι κάτω από 100kW αλλά πρόσφατα έχει φτάσει μέχρι 2 MW με δραστικό αξονικό αερισμό . Όταν η κατασκευή γίνεται σε πολλαπλές στοίβες το ακτινικό κανάλι είναι από 5 έως 15 mm και το κάθε στοιχείο έχει πλάτος από 50 έως 150 mm. [1]

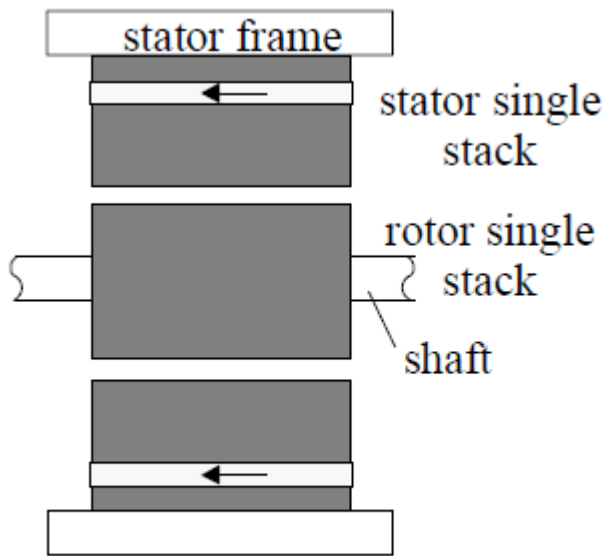


Figure 2.1 Single stack magnetic core

Εικόνα 16 Επαγωγικός κινητήρας ενιαίας στοίβας

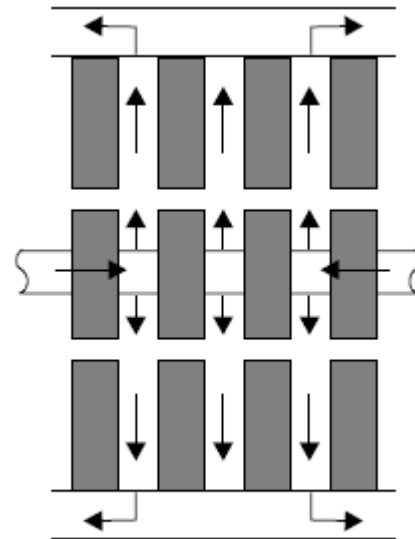


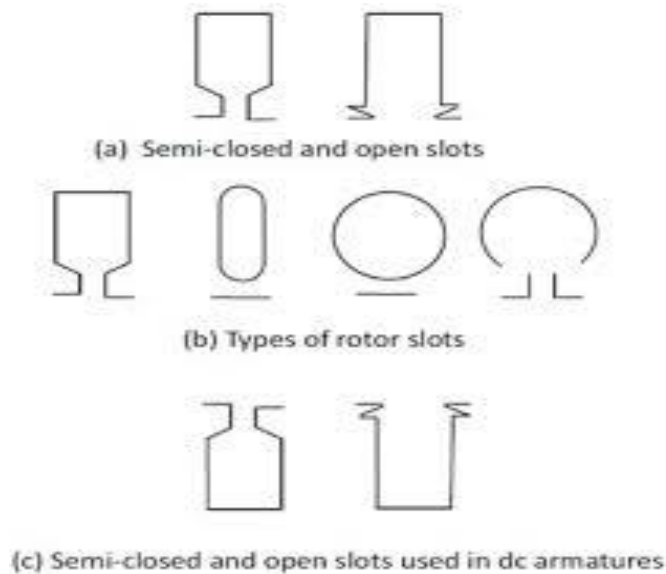
Figure 2.2 Multiple stack IM

Εικόνα 17 Πολλαπλής στοίβας επαγωγικός κινητήρας

Αυτή η μέθοδος κατασκευής χρησιμοποιείται όταν απαιτούνται μεγάλες ισχύεις . Μια τέτοια κατασκευή έχει αύξηση κατά 10% στις απώλειες χαλκού. Επίσης έχει αύξηση του ροής διαρροής της επαγωγής, μείωση του συντελεστή ισχύος και μείωση του ρεύματος εκκίνησης άρα και της ροπής εκκίνησης. Για υψηλές συχνότητες τα ελάσματα θα πρέπει να είναι λεπτότερα, ή να χρησιμοποιείται ανισότροπη μαγνητική πούδρα η οποία περιορίζει τις απώλειες του χαλκού και μπορεί να φτάσει μέχρι και 500 Hz.

5.2 Γεωμετρία αυλακιών

Ο στάτης περιλαμβάνει τον πυρήνα και τα αυλάκια. Η τοποθέτηση των τυλιγμάτων σε αυλάκια , έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του απαιτούμενου ρεύματος μαγνήτισης. Για μεγάλης ισχύος κινητήρες τα αυλάκια χωρίζονται γενικά σε δυο κατηγορίες, στα ανοιχτά και στα ημίκλειστα, επίσης υπάρχουν και τα τελείως κλειστά που χρησιμοποιούνται για μικρή ισχύ (Εικόνα 18).



Εικόνα 18 Τύποι αυλακίων a) στρογγυλλά ανοιχτά αυλάκια b) τραπεζοειδές στρογγυλλά ανοιχτά c) κλειστά αυλάκια

Ο στάτης με ανοιχτά αυλάκια έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να γίνει εύκολα αντικατάσταση στα τύλιγματα. Για ανοιχτά αυλάκια σε μεγάλης ισχύος κινητήρες το άνοιγμα είναι όσο και το πλάτος τους. Ωστόσο με τα ανοιχτά αυλάκια απαιτείται μεγαλύτερο διάκενο και έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του συντελεστή ισχύος.

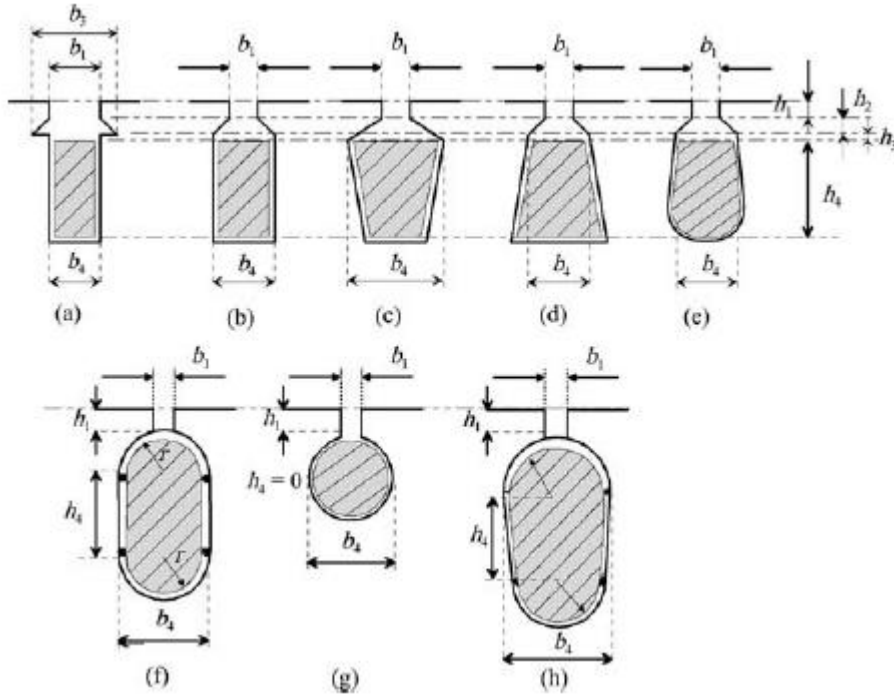
Για μεγάλο άνοιγμα αυλακίων, ο λόγος του ανοίγματος προς του διάκενο είναι μεγαλύτερος από 6 ($bos/g > 6$), κάτι που οδηγεί σε μικρή μέση πυκνότητα ροής μαγνητικού πεδίου, μεγάλη πυκνότητα ροής στα δόντια του δρομέα, αύξηση των αρμονικών και απώλειες πυρήνα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παρασιτικής ροπής, του θορύβου και της δόνησης. Ως εκ τούτου αυτός ο τύπος σπάνια χρησιμοποιείται σε τριφασικές μηχανές.

Το ημίκλειστο αυλάκι έχει άνοιγμα μικρότερο από το πλάτος του. Με το ημίκλειστο αυλάκι έχουμε μικρότερο διάκενο άρα και καλύτερο συντελεστή ισχύος. Η τοποθέτηση τυλιγμάτων γίνεται πιο δύσκολη σε αυτόν τον τύπο. Το διάκενο ενός κινητήρα εξαρτάται από τη μηχανική κατασκευή και το άνοιγμα στα αυλάκια του στάτη και του δρομέα. Σε ημιανοικτά και σε ημίκλειστα αυλάκια ο λόγος είναι $bos/g \cong (4-6)$.

Για μικρού ανοίγματος αυλάκια δημιουργείται μεγάλο μαγνητικό πεδίο στο λαιμό του και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της διαρροής, αυτό οδηγεί σε μείωση της ροπής εκκίνησης, του ρεύματος εκκίνησης και της ροπή ανατροπής. Ο λόγος του ανοίγματος ανά διάκενο στον δρομέα είναι ($bos/g=(3-4)$). [1]

Το επίπεδο της ροπής εξαρτάται από την γεωμετρία στα αυλάκια και από τον τύπο των καλωδίων περιέλιξης (στρογγυλά ή ορθογώνια). Τα στρογγυλά καλώδια χρησιμοποιούνται σε

κινητήρες με μικρή ισχύ, μέχρι 100kW. Η τοποθέτηση στα αυλάκια γίνεται καλώδιο- καλώδιο και έτσι το άνοιγμα στο αυλάκι είναι μικρό. Για ορθογώνια καλώδια τοποθετούνται σε ανοιχτά αυλάκια ή σε ημιανοιχτά και τα τυλίγματα είναι προσχεδιασμένα. Οι κινητήρες που χρησιμοποιούν ορθογώνια καλώδια είναι συνήθως μεγάλης ισχύος. Γενικά το σχήμα στα αυλάκια είναι ευθεία τραπεζοειδής ή στρογγυλεμένος τραπεζοειδής.



Εικόνα 19 Είδη αυλακιών επαγωγικού κινητήρα

Τα αυλάκια που αναλύθηκαν παραπάνω αφορούν και δακτυλιοφόρο δρομέα. Σε έναν δρομέα κλωβού τα αυλάκια διαφέρουν και εξαρτώνται από τα εξής.:

- Από προδιαγραφές για το φορτίο εκκίνησης.
- Ανάλογα με την τάση/συχνότητα τροφοδοσίας και αν είναι μεταβλητή.
- Ονομαστική ροπή.

Για κινητήρες με μικρή ροπή εκκίνησης και μεγάλη απόδοση, μικρής ισχύος με σταθερή

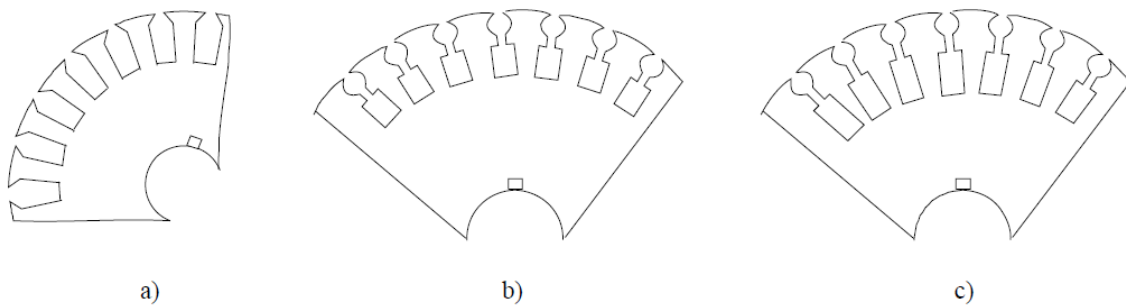


Figure 2.5 Rotor slots for low starting current IMs:
a) high slip, high starting torque, b) moderate starting torque, c) very high starting torque

Εικόνα 20 Αυλάκια δρομέα για χαμηλά ρεύματα εκκίνησης και υψηλές ροπές εκκίνησης

τροφοδοσία η μεταβλητής, χρησιμοποιούνται ημίκλειστα αυλάκια. Για μεσαία ροπή εκκίνησης και χαμηλής ισχύς χρησιμοποιείται ημίκλειστο κυκλικό τραπέζιο με τετράγωνο δόντι. Το τελείως κλειστό χρησιμοποιείται για μείωση του θορύβου και την ροπή παλμού, επίσης έχουν μικρή ροπή ανατροπής. Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται για κυκλοφορητές ρευστού σε σπίτια [1]. Με ορθογώνιο βαθύ (Εικόνα 20) αυλάκι πετυχαίνεται υψηλή ροπή εκκίνησης και υψηλή ονομαστική ολίσθηση, επίσης για μικρό ρεύμα και μεσαία ή μεγάλη ροπή εκκίνησης.

Το μειονέκτημα σε αυτόν τον τύπο είναι ότι υπάρχει αύξηση της ροής σκέδασης με αποτέλεσμα μείωση της ροπής ανατροπής σε βαθμό 150 έως και 200% της ονομαστικής ροπής. Για ειδικές εφαρμογές ο υπολογισμός στα αυλάκια γίνεται με FEM προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση. Η συχνότητα ολίσθησης επιδρά στην διαρροή αυτεπαγωγής και στην αντίσταση του δρομέα.

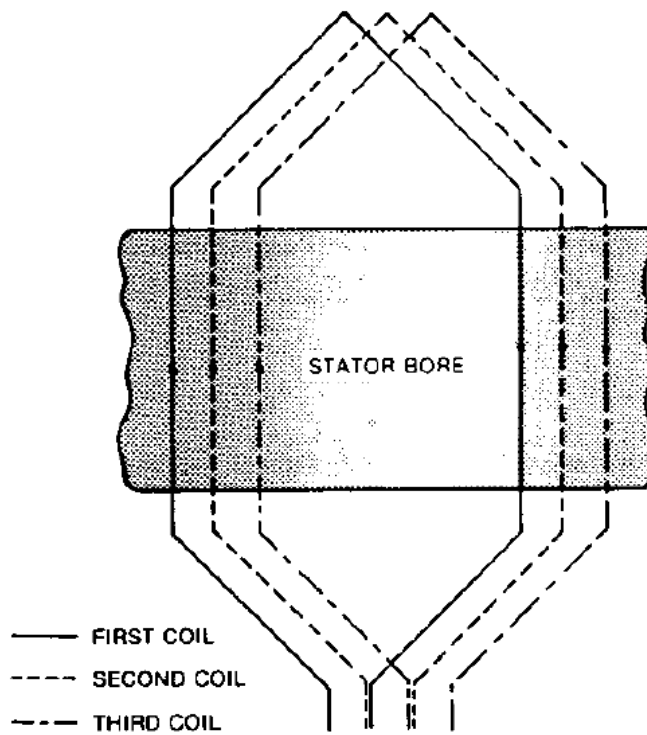
5.3 Τυλίγματα

Στα αυλάκια ενός επαγωγικού κινητήρα τοποθετούνται τα πηνία. Σκοπός των τυλιγμάτων του κινητήρα είναι να παράγουν μια mmf (μαγνητοενεργητική δύναμη) κινούμενη στο διάκενο. Η παραγόμενη mmf μπορεί να δημιουργείται από δύο συμμετρικές περιελίξεις που θα έχουν διαφορά φάσης $\pi/2$. Επίσης και με τρεις συμμετρικές περιελίξεις μπορεί να παραχθεί καθαρή mmf με διαφορά φάσης $2\pi/3$ (120 μοίρες) μεταξύ τους.

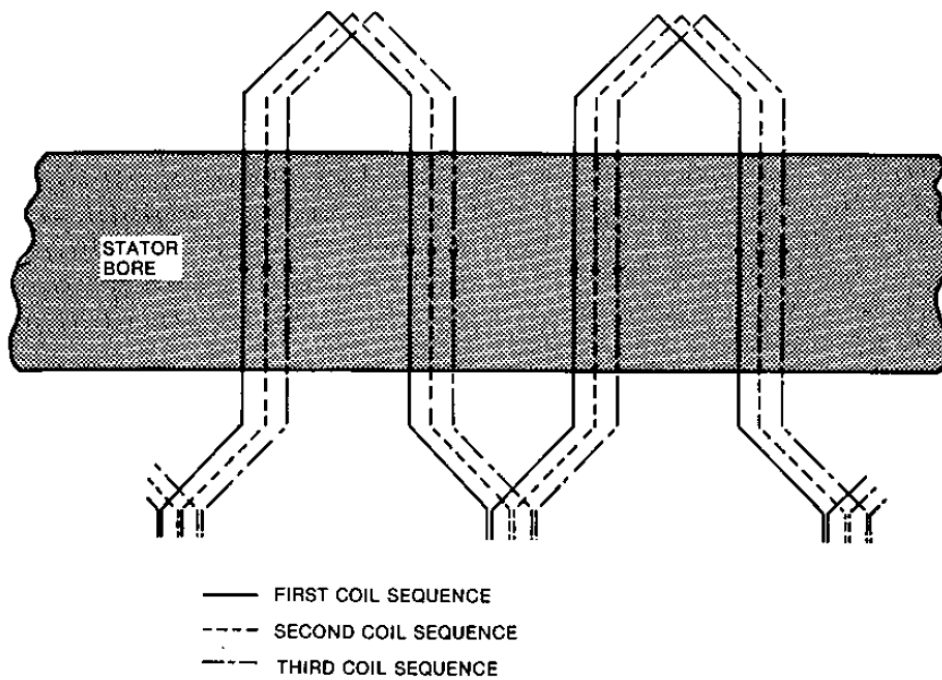
Οι περιελίξεις του κινητήρα αποτελούνται από πηνία. Τα πηνία τοποθετούνται στα αυλάκια του στάτη. Οι προτεινόμενοι τρόποι σχεδίασης των πηνίων είναι η βροχοειδής, κυματοειδής και ομόκεντρη περιέλιξη.

Βροχοειδές

Στην βροχοειδή περιέλιξη, τα πηνία είναι ίδια το ένα με το άλλο όπως φαίνεται και στην εικόνα 21. Το κάθε πηνίο έχει δύο όμοιες πλευρές και δύο ακροδέκτες, η μία πλευρά του πηνίου τοποθετείται στον πάτο του αυλακιού και η άλλη πλευρά στην κορυφή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα δημιουργία διπλού επιπέδου σε κάθε αυλάκι. Τα βροχοειδή πηνία συνδέονται σε σειρά για να φτιάξουν μία ομάδα πηνίων. Το κάθε βροχοειδές πηνίο έχει δύο ακροδέκτες, ο πρώτος είναι η αρχή της ομάδας, ο τελευταίος συνδέεται με τον πρώτο του δεύτερου πηνίου και ο τελευταίος του δεύτερου με τον πρώτο του τρίτου πηνίου (Εικόνα 21). Η κάθε ομάδα πηνίων έχει δύο ακροδέκτες. Στην συνέχεια οι ομάδες μπορούν να συνδεθούν σε σειρά ή παράλληλα με άλλες ομάδες πηνίων της ίδιας φάσης. Η σύνδεση των πηνίων γίνεται με χαλκό-συγκόλληση, με συγκόλληση ή με πρεσάρισμα. Ο τρόπος σύνδεσης των άκρων εξαρτάται από την διατομή των αγωγών [4].



Εικόνα 21 Βροχοειδές σύνδεση των πηνίων



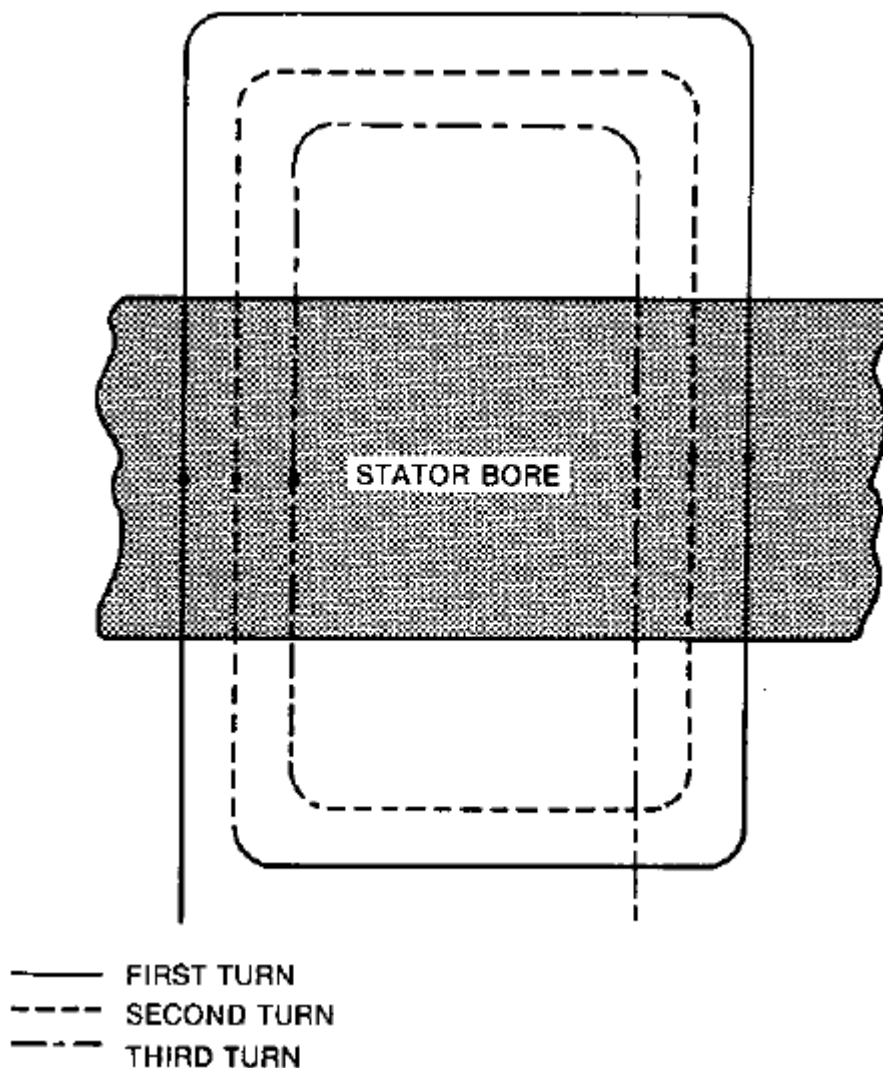
Εικόνα 22 Κομματοειδές σύνδεση των πηνίων

Κυματοειδής

Η κυματοειδής σύνδεση των πηνίων γίνεται από άκρο σε άκρο, με τον ίδιο σχεδόν τρόπο που γίνεται στην βροχοειδή (Εικόνα 22). Κάθε κόμβος των πηνίων συνδέεται με τον συλλέκτη. Για αυτό και η κυματοειδής περιέλιξη καλείται και κλειστή περιέλιξη. Αυτού του είδους περιέλιξη είναι κατάλληλη για λίγες στροφές ανά πηνίο και για χαμηλή τάση. Ωστόσο αυτός ο τύπος σύνδεσης των πηνίων είναι κατάλληλος για δακτυλιοφόρο δρομέα και σπάνια χρησιμοποιείται για στάτη. Παρουσιάζει ευρεία χρήση σε μηχανές με κατευθυνόμενο – ρεύμα (direct – current machine) [4].

Ομόκεντρα

Ο τελευταίος τύπος περιέλιξης είναι τα ομόκεντρα πηνία. Είναι πηνία συνδεδεμένα σε σειρά. Αυτό του είδους σχεδίασης των πηνίων για να τοποθετηθεί με διπλό επίπεδο στα αυλάκια θα πρέπει να δοθεί κατάλληλο σχήμα και πρόσθετη κάμψη. Ωστόσο τα ομόκεντρα χρησιμοποιούνται κυρίως σε απλό επίπεδο. Τα πηνία αυτά δεν μπορούν να έχουν το ίδιο σχήμα (Εικόνα 23). [4]

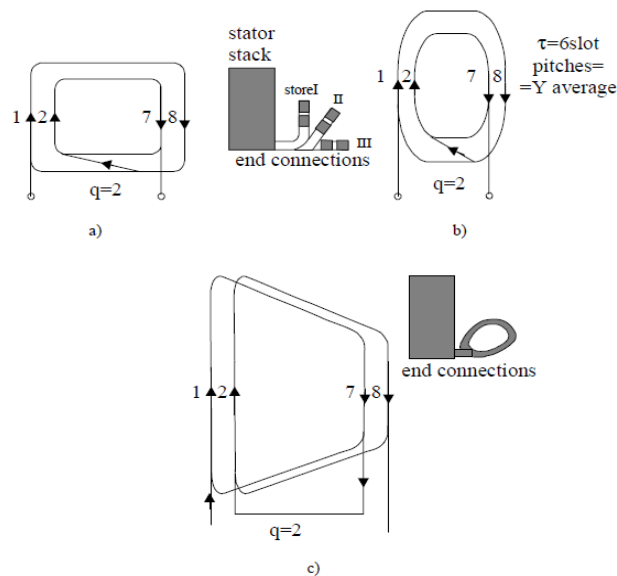


Εικόνα 23 Ομόκεντρα πηνία

Ωστόσο τα τυλίγματα στον επαγωγικό κινητήρα χωρίζονται ανάλογα με την κατασκευή τους σε τυχαία (Random coils) και σε προκατασκευασμένα πηνία (Formed coils)

Τυχαία τυλίγματα ή στρογγυλεμένα πηνία

Αυτά τα πηνία έχουν κυκλική διατομή, είναι μηχανικά ευέλικτα πηνία και τοποθετούνται σε ημίκλειστα αυλάκια ή κλειστά. Τέτοια πηνία μπορούν να έχουν διάφορα σχήματα. (Εικόνα 24)



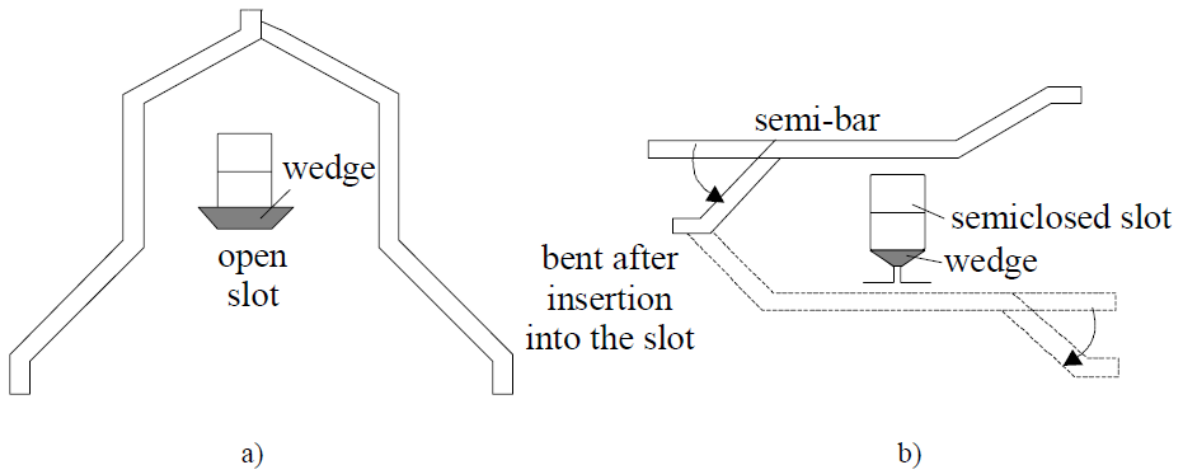
Εικόνα 24 Διάφορα σχήματα κυκλικών πηνίων

Τα στρογγυλεμένα πηνία χρησιμοποιούνται για ένα επίπεδο στρώμα, για μικρής ισχύος κινητήρες και χαμηλής τάσης, 600V ή μικρότερη [4]. Επίσης τα πηνία είναι ομόκεντρα ή πανομοιότυπα, το κύριο μέλημα είναι να παραχθεί ίση αντίσταση και αυτεπαγωγή διαρροής [1]. Ωστόσο το σχήμα και ο αριθμός των στροφών αυτών των πηνίων δίνεται από αυτόματο μηχάνημα κατασκευής πηνίων. Το κόστος το στρογγυλεμένων πηνίων είναι μικρότερο από ότι στα προκατασκευασμένα πηνία.

Προκατασκευασμένα

Τα προκατασκευασμένα πηνία τοποθετούνται σε ανοιχτά αυλάκια. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε κινητήρες μεγάλης ισχύος και για τάση άνω των 600V. Τέτοια πηνία είναι τα πηνία μπάρας. Τα πηνία μπάρας γίνονται με συνεχείς μπάρες λυγισμένες και συγκολλημένες μεταξύ

τους για ανοιχτά αυλάκια ή για ημι-κλειστά. (Εικόνα 25). Συνεχή πηνία μπάρας μπορούν να κατασκευαστούν από μερικούς παράλληλους στοιχειώδεις αγωγούς.[1]



Εικόνα 25 Πηνία μπάρας a) Συνεχής πηνία b) ημι-μπάρας

Στα προκατασκευασμένα υπάρχει καλύτερη μηχανική αντοχή, λόγω της ακαμψίας και της καλύτερης μεταφοράς θερμότητας. Το μειονέκτημα των προκατασκευασμένων πηνίων είναι ότι δεν δίνεται η δυνατότητα παραγωγής ημιτονοειδούς διανομής κατά μήκος του διακένου [1].

Με τυλίγματα διπλού επιπέδου επιτυγχάνονται συντομότερες συνδέσεις στα άκρα των πηνίων με αποτέλεσμα την μείωση των απωλειών χαλκού. Επίσης παρατηρείται μείωση των αρμονικών [1].

Μια σημαντική παράμετρος στα τυλίγματα του στάτη είναι ο αριθμός των αυλακιών ανά φάση ανά πόλο.

$$q = \frac{N_s}{2p_1m}$$

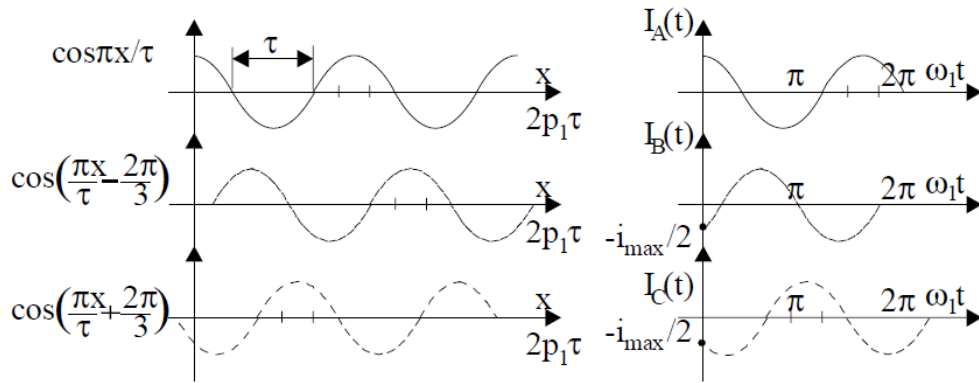
N_s : αριθμός των αυλακιών του στάτη.

Ο αριθμός των mmf- ηλεκτρικών περιόδων ανά μια περιστροφή -(Εικόνα 26) ονομάζεται αριθμός των πόλων και δίνεται από τον εξής τύπο[1] :

$$p_1 = \frac{\pi D}{2\tau}$$

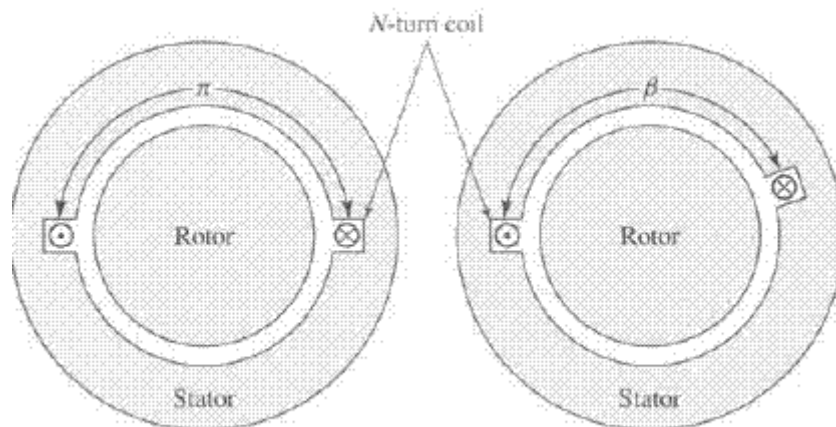
D : εσωτερική διάμετρος του στάτη

τ : βήμα πόλου



Εικόνα 26 Τρία συμμετρικά μαγνητοενεργητικά κύματα που παράγονται από τα τρία τυλίγματα στον κινητήρα

Το βήμα πόλου (τ) για μονό επίπεδο είναι ίσο με το βήμα πηνίων (y) (Εικόνα 27). Ενώ για διπλό επίπεδο y είναι μικρότερο του (τ) ($y < \tau$). Για συμμετρικά πλήρη τυλίγματα θα πρέπει $y/\tau \geq 2/3$. Ο λόγος του y/τ είναι ίσο με $5/6$ ή $7/9$ για να κρατούνται οι αρμονικές σε χαμηλά επίπεδα.



Εικόνα 27 α) Στην πρώτη μηχανή το βήμα πόλου (τ) είναι ίσο με το βήμα του πηνίου (y). β) Το βήμα πόλου είναι μικρότερο από το βήμα πηνίων.

Τα πηνία ανά φάση συνδέονται είτε σε σειρά είτε παράλληλα. Όταν υπάρχει παράλληλη σύνδεση το ρεύμα διαιρείται. Με την διαίρεση του ρεύματος μειώνεται η απαιτούμενη διατομή του αγωγού.

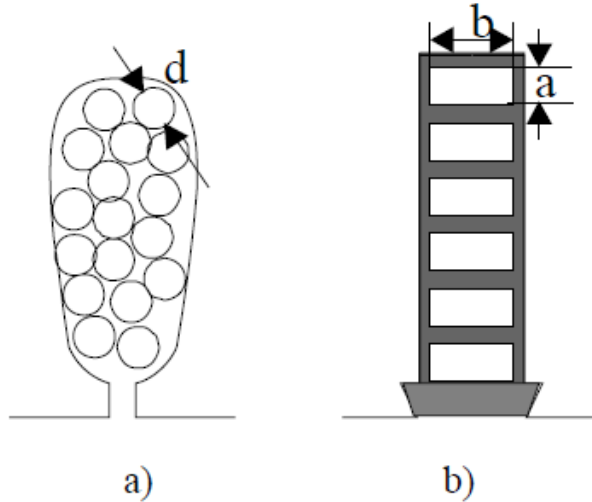
Ο αριθμός των πηνίων για μονό επίπεδο δίνεται από τον εξής τύπο:

$$\left(\frac{N_s}{2}\right)$$

Ενώ για διπλό επίπεδο ο αριθμός των πηνίων είναι ίσος με τον αριθμό των αυλακιών του στάτη. Για ένα επίπεδο οι περιελίξεις κατασκευάζονται για ακέραιο αριθμό αυλακιών ανά πόλο ανά φάση (q =ακέραιος). Ενώ το κλασματικό q , χρησιμοποιείται μόνο για διπλού επίπεδο.

5.4 Ηλεκτρικοί αγωγοί

$$\rho_{Co}(T) = (\rho_{Co})_{20^\circ} \left[1 + (T - 20) / 273 \right]$$



Εικόνα 28 a) Στρογγυλοί b) Τετράγωνοι αγωγοί

Τα πηνία του κινητήρα αποτελούνται από στρογγυλούς ή ορθογώνιους ηλεκτρικούς αγωγούς. Οι αγωγοί είναι από χαλκό, από αλουμίνιο ή ορείχαλκο. Η ειδική αντίσταση του χαλκού είναι ίση με $\rho_{Co} = (1.65 \text{ to } 1.8) \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ για 20°C . Η ειδική αντίσταση του αλουμινίου είναι $\rho_{Al} \cong (2.7 - 3.0)10^{-8} \Omega\text{m}$ για 20°C .

Οι καθορισμένες διαστάσεις στρογγυλών αγωγών είναι έως 2,5 mm. Η τελική διατομή εξαρτάται από το ονομαστικό ρεύμα και την πυκνότητα ρεύματος. Η πυκνότητα ρεύματος παίρνει τις τιμές (3,5- 15 A/mm²) και εξαρτάται από το σύστημα ψύξης, από το service duty cycle και από την στοχευμένη απόδοση κινητήρα. Για υψηλή απόδοση η πυκνότητα ρεύματος κυμαίνεται από (3,5 έως 6 A/mm²) [1].

Αν η διατομή είναι πολύ μεγάλη και δεν είναι διαθέσιμη τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν παράλληλα αγωγοί μικρότερης διατομής. Ο μέγιστος αριθμός των παράλληλων αγωγών μπορεί να είναι από 6 έως 8. Αν η διατομή είναι πάνω από 30 έως 40 mm², τότε προτείνεται να χρησιμοποιηθεί ορθογώνιος αγωγός.[1] Για μικρούς ορθογώνιους αγωγούς χρησιμοποιούνται διαστάσεις (0,8 έως 2) x 2 mm² ή (0,8 έως 6) x 6 mm². Σε ορθογώνιους αγωγούς το ύψος κρατείται χαμηλό, για μείωση του επιδερμικού φαινομένου (skin effect) . Ο μεγάλος ορθογώνιος αγωγός χρησιμοποιείται για μεγάλους κινητήρες.

5.5 Μονωτικά υλικά

Η μόνωση σε έναν επαγωγικό κινητήρα είναι από τα κύρια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του. Σκοπός είναι η μόνωση της κάθε σπείρας ξεχωριστά από τις άλλες, στην κάθε περιέλιξη ,δημιουργώντας έτσι μια διαδρομή για το ρεύμα μέσα από αυτές. Επίσης είναι σημαντικό να υπάρχει μόνωση ανάμεσα στα τυλίγματα και στον πυρήνα και να υπάρχει μόνωσή από περιέλιξη σε περιέλιξη. Σε έναν δακτυλιοφόρο δρομέα μονώνονται μεταξύ τους και τα δαχτυλίδια σύνδεσης. Επιπλέον τα ελάσματα του στάτη μονώνονται το καθένα μεταξύ τους για μείωση των δινορευμάτων. Το μέγεθος της μόνωσης σε κάθε έλασμα είναι (0,013mm). Επιπροσθέτως, μόνωση χρειάζεται και στον δρομέα του κινητήρα, εκτός αν η ολίσθηση είναι μικρή οπότε ενδέχεται να μην είναι απαραίτητη. Μια σημαντική μόνωση, είναι η μόνωση του ρουλεμάν. Με αυτή την μόνωση επιτυγχάνεται μείωση της τάσης ρουλεμάν στάτη, ειδικά για μεγάλες μηχανές που έχουν μία επιτρεπτή ροή διαφυγής. Με αυτόν τον τρόπο κατορθώνεται 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 (μικροί, κυκλικοί αγωγοί).
- Προκατασκευασμένα - δακτύλιοι αγωγοί (ορθογώνιοι μεγάλοι 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 δημιουργήσουν 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 κατανέμονται ανάλογα με την κλάση θερμοκρασίας τους. Η κλάσης θερμοκρασίας της μόνωσης είναι:

A: 105°C

B: 130°C

F: 155°C

G: 180°C

Σε έναν κινητήρα με τυχαία – τυλίγματα το κάθε καλώδιο στα πηνία είναι μονωμένο μεταξύ των άλλων. Επίσης θα υπάρχει μόνωση ανάμεσα στα τοιχώματα των αυλακίων και τα πηνία, και στην φάση. Η μόνωση έχει πολλά στρώματα μαζί ,πάχους 0,025mm. Η σμάλτωση στα καλώδια γίνεται με τον αγωγό να περνά μέσα από πολυμερισμένη ρητίνη και στην συνέχεια θερμαίνεται ώσπου 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 χρησιμοποιείται 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. Οι εφαρμοζόμενες θερμοκρασίες είναι μεγαλύτερες από την θερμοκρασία λειτουργίας του κινητήρα.

Η τοποθέτηση των πηνίων θα πρέπει να γίνει με προσοχή εφόσον 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 έχει φύλλα εύκαμπτα (όπως φύλλα κυτταρίνης) πάχους 0,125mm έως 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 αμιάντο.

Σε κινητήρες μεγάλων ισχύων όπου τα τυλίγματα είναι εφαρμοστά έχουμε αύξηση του fill factor λόγω 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 1 έως 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 τοποθετείται μίκα. Επίσης για την αποφυγή εκκενώσεων στο αυλάκια χρησιμοποιείται ένα αγωγίμο χρώμα για να εμπλουτιστεί το κενό ανάμεσα στα τοιχώματα από τα αυλάκια και στην μόνωση τυλιγμάτων.

Κεφάλαιο 6

ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ 15 KW.

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

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ: 15kW

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ: 1471στρ./λεπτό

ΤΑΣΗ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ (ΠΟΛΙΚΗ): 400V

ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ: 50Hz

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΑΣΕΩΝ: 3

ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑΣ: ΤΡΙΓΩΝΟ

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ: 0,847

ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ: 0,91

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗ:97,43N.m

ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΡΕΥΜΑ:28,07A

ΡΟΠΗ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ:211,52N.m

ΡΟΠΗ ΑΝΑΤΡΟΠΗΣ:257N.m

ΟΛΗΣΘΗΣΗ:1,933%

ΚΛΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ: B

Κάποια από τα παραπάνω στοιχεία (π.χ. συντελεστής απόδοσης, συντελεστής ισχύος, ροπή κλπ) θα υπολογιστούν κατά την σχεδίαση του κινητήρα και θα συγκριθούν με τα

αναγραφόμενα παραπάνω. Αν υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις θα πρέπει να αλλάξουν κάποια από τα χαρακτηριστικά του κινητήρα .

Στο υποκεφάλαιο που ακολουθεί λαμβάνει χώρα η σχεδίαση με την αρχική διαστασιολόγηση του κινητήρα.

6.1 Διαστασιολόγηση του κινητήρα

Για τον υπολογισμό του $Dis^2 \cdot L$, θα ξεκινήσουμε με τον υπολογισμό της φαινόμενης ισχύς διακένου S_{gap} . Η εσωτερικής διαμέτρου του στάτη Dis υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$Dis = \sqrt[3]{\frac{2p_i p_i S_{gap}}{\pi \lambda f C_o}} \quad (6.01)$$

με S_{gap}

$$S_{gap} = \frac{K_E P_n}{nN \cos\varphi} \quad (6.02)$$

$$K_E = \frac{E_A}{V\varphi} \approx 0,98 - 0,005 p_i = 0,97 \quad (6.03)$$

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 6.1 Ο λόγος του μήκους του πυρήνα προς το πολικό βήμα

Η φαινόμενη ισχύς διακένου ισούται :

$$S_{gap} = \frac{K_E P_n}{nN \cos\varphi} = \frac{0,964 * 15000}{0,91 * 0,847} = 18877.226VA$$

Την σταθερά Esson (C_o) λαμβάνεται από την (figure 1).

Στην πραγματικότητα η σταθερά Esson δεν είναι σταθερή, εφόσον 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:

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

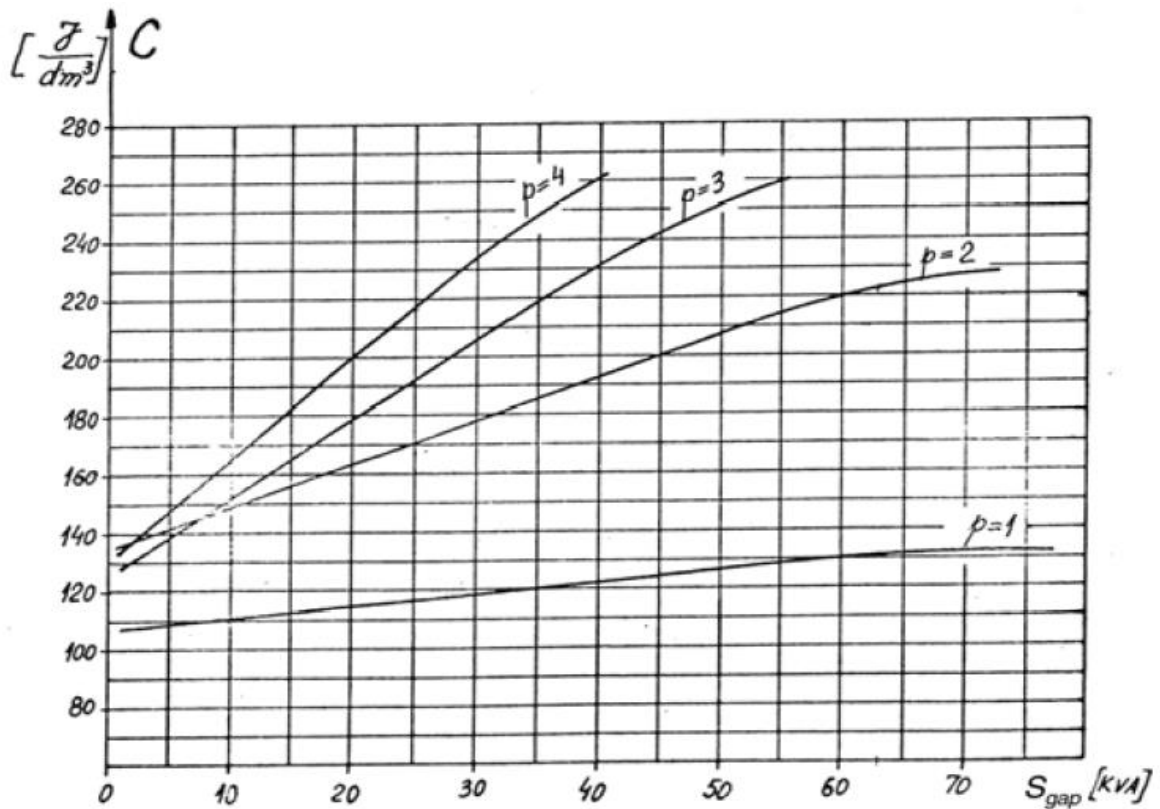


Figure 1 Σταθερά Esson (Co) σε σχέση με την ισχύς διακένου

Για $S_{gap}=18766,143$, το $Co=160 \cdot 10^3 \text{ J/m}^3$ και λ είναι ίσο με 1,5

$$Dis = \sqrt[3]{\frac{2\rho_i \rho_i S_{gap}}{\pi \lambda f Co}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 18877.226}{\pi \cdot 1,5 \cdot 50 \cdot 160000}} = 0.1588 \text{ m} = 15,88 \text{ cm}$$

Το πολικό βήμα είναι ίσο με :

$$\tau = \frac{\pi Dis}{2 \rho_i} = \frac{\pi \cdot 0,1588}{2 \rho_i} = 0.1247 \text{ m} \quad (6.04)$$

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:

$$\tau_s = \frac{\tau}{3q} = \frac{0.1247}{3 \cdot 3} = 0.013859 \text{ m} = 13.859 \text{ mm}$$

Για να μειωθούν οι αρμονικές στην διανομή μαγνητοενεργητική δύναμη (mmfs), θα ήταν αποτελεσματικό να αυξηθεί το q. Επίσης θα υπάρχει και μείωση των απωλειών.[1]

Το μήκος του πυρήνα θα υπολογιστεί από την σχέση:

$$\lambda = \frac{L}{\tau} \Leftrightarrow L = \lambda * \tau = 1,5 * 0.1247 = 0,1871 \text{ m} \quad (6.06)$$

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. Το K_D δίνεται από τον πίνακα 6.2:

$2p_1$	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 6.2 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 η εξωτερική διάμετρος πυρήνα είναι:

$$\frac{D_{is}}{D_{out}} = 0.62 \Rightarrow D_{out} = \frac{D_{is}}{0.62} = \frac{0.1588}{0.62} = 0.2561 \text{ m}$$

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_1 ίσο με 2, το διάκενο είναι:

$$g = (0.1 + 0.02 \sqrt[3]{P_n}) 10^{-3} = (0.1 + 0.02 \sqrt[3]{15000}) 10^{-3} = 0.395 * 10^{-3} \text{ m} \quad (6.07)$$

Οι τυπικές τιμές διακένου είναι 0.3, 0.35, 0.4, 0.45 mm. Άρα το διάκενο του κινητήρα θα είναι 0,4 mm. Για μεγάλες τιμές του διακένου απαιτείται μεγάλη mmfs. Οι επαγωγικοί κινητήρες μεγάλης ισχύος έχουν μεγάλο διάκενο. Ένα πολύ μικρό διάκενο προκαλεί αύξηση αρμονικών στο πεδίο διακένου και πρόσθεση απώλειών ενώ για πολύ μεγάλο διάκενο επέρχεται μείωση

του συντελεστή ισχύος και της απόδοσης [1]. Για μεγάλες τιμές του διακένου απαιτείται μεγάλη mmfs.

6.2 Τυλίγματα στάτη

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

$$N_s = 2 \cdot p_i \cdot q \cdot m \quad (6.08)$$

Όπου m ο αριθμός των φάσεων.

$$N_s = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 3 = 36$$

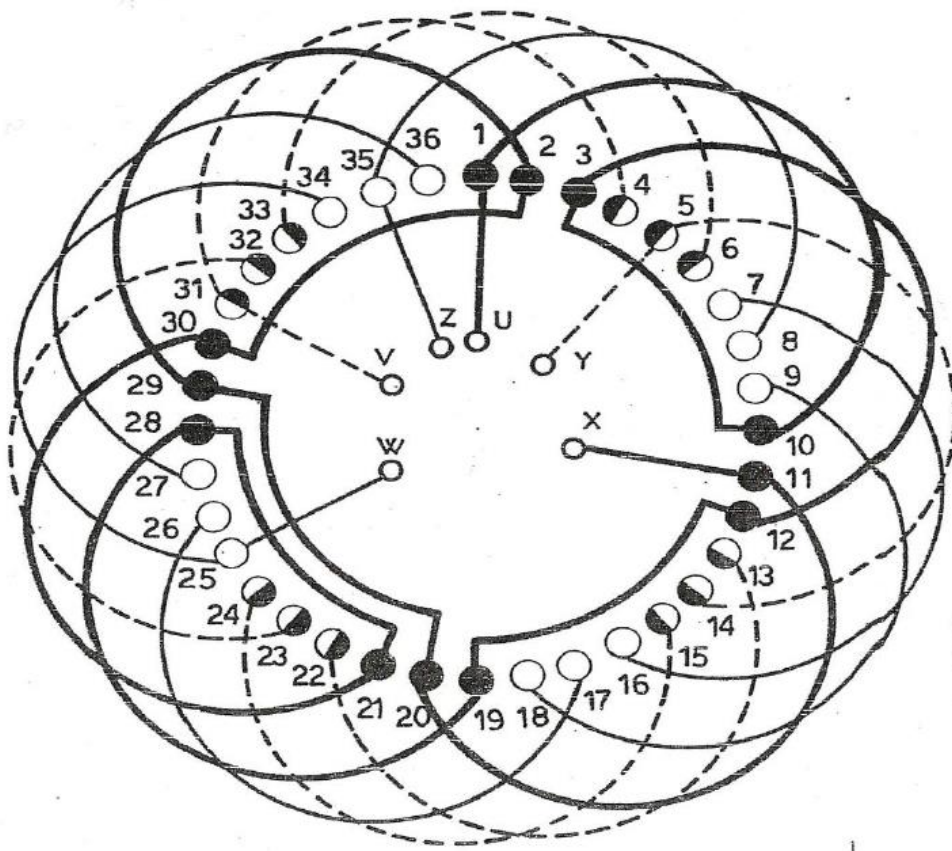
Θα πρέπει ο λόγος των αριθμών αυλακιών του στάτη ανά των αριθμό των φάσεων να είναι ακέραιος [1]

$$\frac{N_s}{m} = \text{ακέραιο}$$

Το πολικό βήμα του κινητήρα είναι:

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

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



Εικόνα 29 Τυλίγματα σε μία στρώση του κινητήρα, με δύο φανταστικούς και δύο πραγματικούς πόλους

Οι ηλεκτρικές μοίρες ανάμεσα σε δύο διαδοχικά αυλάκια είναι:

$$a_{ec} = \frac{2\pi \cdot p_i}{N_s} = \frac{2\pi \cdot 2}{36} = \frac{\pi}{9} = 20 \text{ μοίρες} \quad (6.09)$$

Ο συντελεστής ζώνης θα δίνεται από την σχέση:

$$K_q = \frac{\sin \frac{q \cdot a}{2}}{q \cdot \sin \frac{a}{2}} = \frac{\sin \frac{3 \cdot 20}{2}}{3 \cdot \sin \frac{20}{2}} = 0,959 \quad (6.10)$$

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

Ο συντελεστής τυλίγματος δίνεται από τον τύπο:

$$K_w = K_\tau = K_q \cdot K_y = 0,959 \cdot 1 = 0,959$$

Στην συνέχεια θα υπολογιστεί ο αριθμός των 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:

$$\varphi = a_i \cdot \tau \cdot L \cdot B_g \quad (6.11)$$

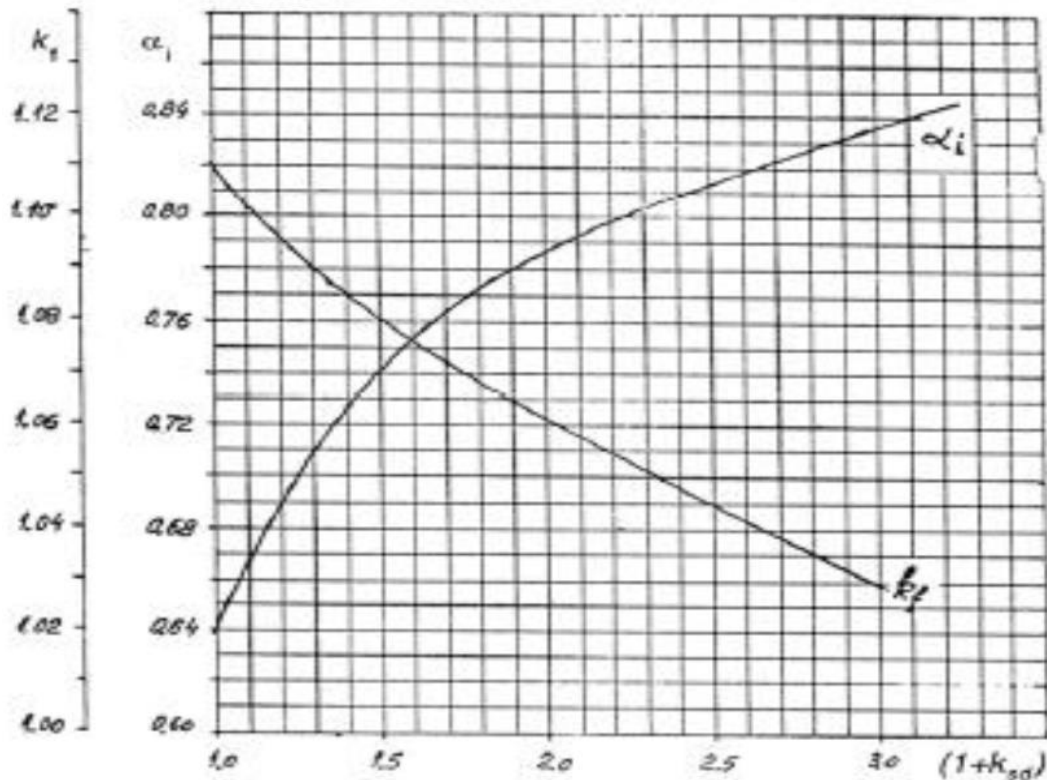


Figure 2 Γραφική παράσταση συντελεστή κορεσμού δοντιών (1+Kst) σε σχέση με τους συντελεστες flux density shape factor και form factor

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 γραφική παράσταση (figure 2):

Η σταθερά a_i όπως βλέπουμε στην (figure 2) εξαρτάται από το συντελεστή κορεσμού δοντιών (1+Kst). Η σταθερά K_f ονομάζεται form factor και εξαρτάται από τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του υλικού του πυρήνα.

Θεωρώντας το $K_{st}=1$ το a_i θα γίνει ίσο με 0,786 και το K_f είναι ίσο με 1,062.

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

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

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

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

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

Οπότε το B_g θα παίρνει τις τιμές από 0,65 έως 0,78 T. Επιλέγεται το $B_g=0.78$.

Άρα η μαγνητική ροή γίνεται:

$$\varphi = a_i \cdot \tau \cdot L \cdot B_g = 0,786 \cdot 0,1247 \cdot 0,1871 \cdot 0,78 = 14.308 \cdot 10^{-3} \text{ Wd}$$

Ο αριθμός των στροφών ανά φάση δίνεται από τον τύπο:

$$W_1 = \frac{K_E \cdot V_\varphi}{4 \cdot K_f \cdot K_w \cdot f \cdot \varphi} \quad (6.12)$$

Η V_φ θα είναι ίση με 400V διότι ο τρόπος συνδεσμολογίας του κινητήρα είναι σε τρίγωνο. Άρα:

$$W_1 = \frac{K_E \cdot V_\varphi}{4 \cdot K_f \cdot K_w \cdot f \cdot \varphi} = \frac{0,97 \cdot 400}{4 \cdot 1,062 \cdot 0,959 \cdot 50 \cdot 14.308 \cdot 10^{-3}} = 133.018 \text{ σπείρες/φάση}$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τον αριθμό αγωγών ανά αυλάκι:

$$n_s = \frac{a_1 \cdot W_1}{p_1 \cdot q} \quad (6.13)$$

Το a_1 είναι ο αριθμός των παράλληλων αγωγών. Θα επιλεγθεί για αρχή 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:

$$n_s = \frac{a_1 \cdot W_1}{p_1 \cdot q} = \frac{1 \cdot 133,018}{2 \cdot 3} = 22,16$$

Το n_s θα πρέπει να είναι ακέραιος αριθμός, όποτε στρογγυλοποιώντας, θα γίνει ίσο με $n_s=22$. Συνεπώς οι στροφές ανά φάση θα είναι

$$W_1 = \frac{p_1 \cdot q \cdot n_s}{a_1} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 22}{1} = 132$$

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 :

$$I_{ov} = \frac{Pn}{n_n \cos \varphi \sqrt{3} V_{\pi}} = \frac{15000}{0,91 \cdot 0,847 \sqrt{3} \cdot 400} = 28,08 \text{ A} \quad (6.14)$$

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:

$$A_{co} = \frac{I_{ov}}{J_{\cos} \cdot a_1} = \frac{28,08}{5 \cdot 1} = 5.617 \text{ mm}^2 \quad (6.15)$$

Με διάμετρος ίση:

$$d_{co} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{co}}{\pi \cdot a_p}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5.617}{\pi}} = 2.67 \text{ mm} \quad (6.16)$$

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 [1]. Επομένως θα χρησιμοποιηθούν 5 παράλληλοι αγωγοί για να επιτευχθεί αποδεκτή τιμή.

$$d_{co} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{co}}{\pi \cdot a_p}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5.617}{\pi \cdot 5}} = 1,19 \text{ mm}$$

Αν ο αριθμός των παράλληλων αγωγών είναι μεγαλύτερος από 4 ($a_p > 4$), τότε ο αριθμός των διαδρομών του ρεύματος (a_1) θα πρέπει να αυξηθεί. Η αύξηση του a_1 θα προκαλέσει μείωση της διατομής του αγωγού. Επίσης προκαλεί μείωση της μη αντιροπούμενης μαγνητικής έλξης μεταξύ δρομέα και στάτη παρουσία εκκεντρικότητας του δρομέα.[1]

Για $a_1 = 2$ η διατομή του αγωγού θα γίνει:

$$ns = \frac{a_1 \cdot W_1}{p_1 \cdot q} = \frac{2 \cdot 133,018}{2 \cdot 3} = 44,33$$

Το n_s θα πρέπει να είναι ακέραιος αριθμός, όποτε στρογγυλοποιώντας το θα γίνει ίσο με $n_s=47$.
 Συνεπώς οι στροφές ανά φάση θα είναι:

$$W_1 = \frac{p_1 \cdot q \cdot n_s}{a_1} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 44}{2} = 132$$

$$A_{co} = \frac{I_{ov}}{J_{cos} \cdot a_1} = \frac{28,089}{5 \cdot 2} = 2,809 \text{ mm}^2$$

$$d_{co} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{co}}{\pi \cdot a_p}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,809}{\pi \cdot 1}} = 1.891 \text{ mm}$$

Επειδή ισχύει ότι το $d_{cu} > 1.3$ θα πρέπει να αυξήσουμε τους παράλληλους αγωγούς. Για $a_p = 3$ τότε η διατομή του αγωγού γίνεται :

$$d_{co} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{co}}{\pi \cdot a_p}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,809}{3\pi}} = 1.09 \text{ mm}$$

Μετά θα πρέπει να επιλεγεί διατομή αγωγού από τον πίνακα 6.3. Η διατομή είναι ίση με 1.10mm

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

Πίνακας 6.3 Τοποποιημένες διαμέτρη αγωγών τυλιγμάτων

6.3 Υπολογισμός διαστάσεων των αυλακιών του στάτη

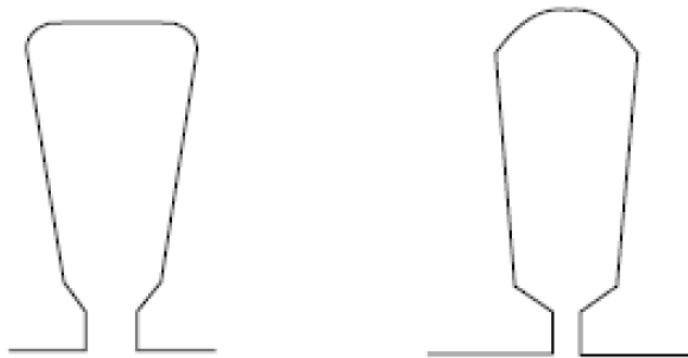
Ο υπολογισμός του n_s και της διαμέτρου των αγωγών θα βοηθήσει στον υπολογισμό της απαιτούμενης διατομής των αυλακιών του στάτη:

$$A_{su} = \frac{\pi d_{co}^2 a_p n_s}{4 K_{fill}} \quad (6.17)$$

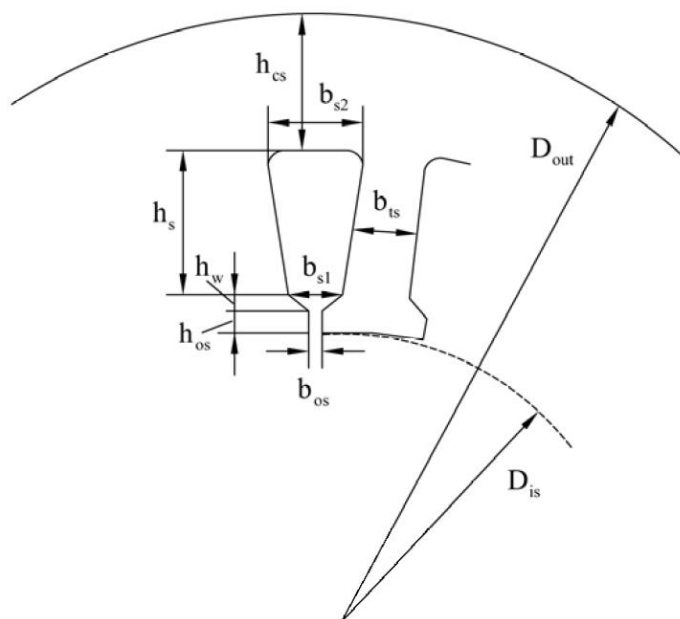
Όπου K_{fill} είναι μια σταθερά (fill factor) η οποία εξαρτάται από το πάχος της μόνωσης που χρησιμοποιείται, για τον συγκεκριμένο κινητήρα ισχύος 15kW θα επιλέχθει η τιμή 0,44.

$$A_{su} = \frac{\pi d_{co}^2 a_p n_s}{4 K_{fill}} = \frac{\pi 1.10^2 \cdot 3 \cdot 44}{4 \cdot 0.44} = 285.099 \text{ mm}^2$$

Η μορφή των αυλακιών του στάτη έχουν συνήθως μια από τις μορφές στην Εικόνα 30.



Εικόνα 30 Μορφές αυλακιών στάτη



Εικόνα 31 Διαστάσεις αυλακιού στάτη

Επιλέγοντας το αυλάκιο με το τετραγωνοειδές σχήμα οι διαστάσεις του φαίνονται στη εικόνα 31. Η 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 $2,5\text{mm}$.

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

$h_w=1-4\text{mm}$, επιλέγουμε 1mm .

Αν υποθεθεί 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 $0,5\text{mm}$, λαμβάνει υπόψη του την επίδραση στις μόνωσης των ελασμάτων.

Το B_{ts} είναι η μαγνητική πυκνότητα των δοντιών στάτη, οι τιμές που παίρνει δίνονται από τον πίνακα 6.4 [2]:

	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 (apparent maximum value)	1.4–2.1 (stator) 1.5–2.2 (rotor)	1.6–2.0	1.5–2.0	1.6–2.0 (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 6.4 Επιτρεπτές τιμές πυκνοτήτων ροής στον επαγωγικό κινητήρα

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

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

$$b_{ts} = \frac{B_g \cdot \tau_s}{B_{ts} \cdot K_{Fe}} = \frac{0.78 \cdot 13.859 \cdot 10^{-3}}{1.7 \cdot 0.96} = 6.317 \text{ mm}$$

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 προκύπτουν οι εξής διαστάσεις:

$$b_{s1} = \frac{\pi(D_{is} + 2h_{os} + 2h_w)}{N_s} - b_{ts} = \frac{\pi(158.8 + 2 \cdot 0.5 + 2 \cdot 1)}{36} - 6.317$$

$$= 7.446 \text{ mm} \quad (6.19)$$

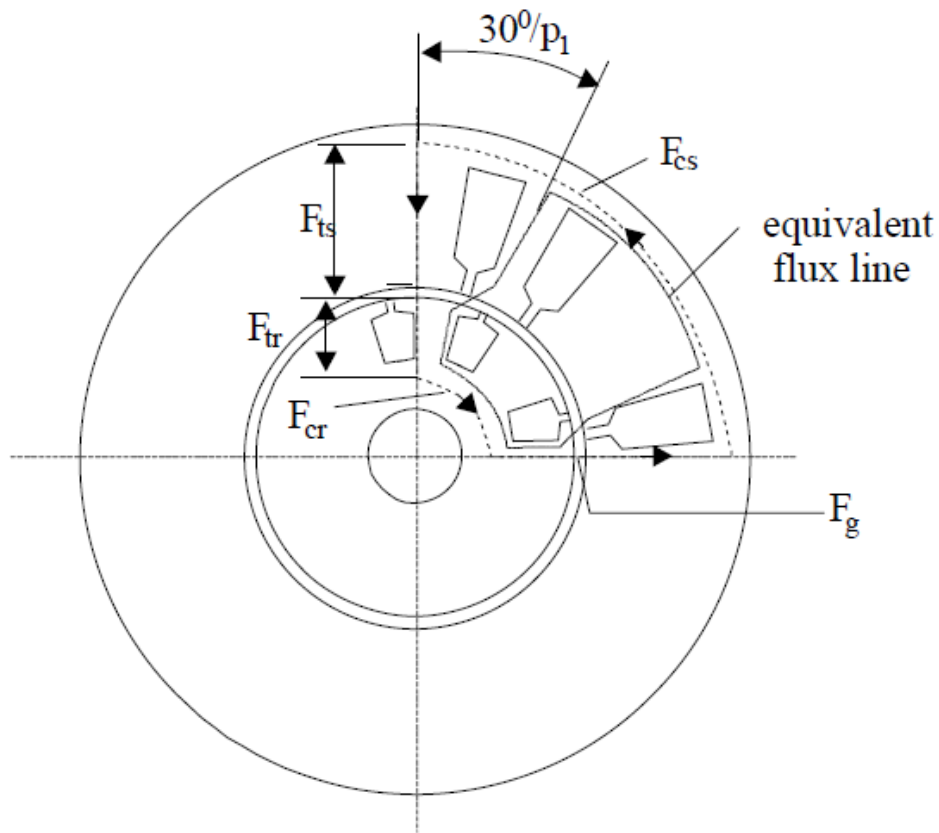
$$b_{s2} = \sqrt{4 A_{su} \tan \frac{\pi}{N_s} + b_{s1}^2} = \sqrt{4 \cdot 285.099 \tan \frac{\pi}{36} + 7.446^2} = 12.458 \text{ mm} \quad (6.20)$$

$$A_{su} = h_s \frac{(b_{s1} + b_{s2})}{2} \Rightarrow h_s = \frac{2 \cdot A_{su}}{(b_{s1} + b_{s2})} = \frac{2 \cdot 285.099}{(7.446 + 12.458)} = 28.646 \text{ mm} \quad (6.21)$$

Στην συνέχεια θα υπολογιστεί ο συντελεστής $(1 + K_{st})$ που είχε θεωρηθεί με την τιμή $K_{st}=1$. Ο συντελεστής δίνεται από την σχέση:

$$1 + K_{st} = 1 + \frac{F_{mts} + F_{mtr}}{F_{mg}} \quad (6.22)$$

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



Εικόνα 32 Η μαγνητοεργετικές δυνάμεις στον επαγωγικό κινητήρα

Η Mmfs του διακένου δίνεται από σχέση:

$$F_{mg} \approx Kc \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0} \quad (6.23)$$

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

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

$$F_{mg} \approx Kc \cdot g \cdot \frac{B_g}{\mu_0} = 1.2 \cdot 0.4 \cdot \frac{0,78}{1.256 \cdot 10^{-6}} = 300.389 \text{ Aturns}$$

Η Mmfs του στάτη υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$F_{mts} = H_{ts}(h_s + h_{os} + h_w) \quad (6.24)$$

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 πίνακα 6.5 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

Πίνακας 6.5 Η μαγνητική ένταση (H) σε σχέση με την πυκνότητα ροής (B)

Οπότε για $B_{ts}=1,7$ το H_{ts} θα είναι ίσο με 4800 A/m. Συνεπώς η mmf του στάτη θα είναι:

$$F_{mts} = H_{ts}(h_s + h_{os} + h_w) = 4800 \cdot (28.646 + 0,5 + 1)10^{-3} = 144.702 \text{ At}$$

Η Mmfs του δρομέα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$F_{mtr} = K_{st} \cdot F_{mg} - F_{mts} = 1 \cdot 300.389 - 144.702 = 155.686 \text{ At} \quad (6.25)$$

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:

$$B_{cs} = \frac{\varphi}{2Lh_{cs}} \quad (6.26)$$

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

$$h_{cs} = \frac{D_{out} - (D_{is} + 2(h_{os} + h_w + h_s))}{2} = \frac{256.1 - (158.8 + 2(28.646 + 0,5 + 1))}{2} = 18.52 \text{ mm} \quad (6.27)$$

Συνεπώς η B_{cs} είναι:

$$B_{cs} = \frac{\varphi}{2Lh_{cs}} = \frac{14.308}{2 \cdot 0,1871 \cdot 18.52 \cdot 10^{-3}} = 2.064 \text{ T}$$

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 επιλυθεί το πρόβλημα παρουσιάζονται τρεις δυνατότητες:

1. Να αυξηθεί το μήκος του πίσω πυρήνα, όπου με την σειρά της θα αυξηθεί η εξωτερική διάμετρος του κινητήρα.
2. Να εισαχθεί 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 μειωθεί 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:

$$B_{cs} = \frac{\varphi}{2Lh_{cs}} \Rightarrow h_{cs} = \frac{\varphi}{2LB_{cs}} = \frac{14.308}{2 \cdot 0,1871 \cdot 1.6} = 23.897 \text{ mm}$$

6.4 Υπολογισμός διαστάσεων αυλακιών δρομέα

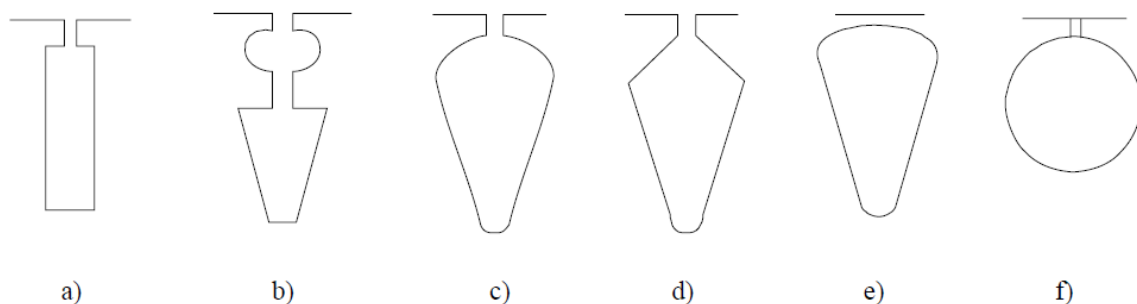
Στην αρχή θα γίνει επιλογή του πλήθους των αυλακιών του δρομέα. Ο αριθμός των αυλακιών του δρομέα σχετίζεται με τον αριθμό των πόλων και με το πλήθος των αυλακιών του στάτη. Η επιλογή γίνεται από τον πίνακα 6.6

$2p_1$	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 6.6 Πλήθος αυλακιών δρομέα σε σχέση με το πλήθος των αυλακιών στάτη

Για αυτήν την περίπτωση θα επιλεγεί $N_s \neq N_r = 48$. 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 33 Τύποι αυλακιών στάτη

Αφού έχει επιλεγθεί 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:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_1 \cdot K_w \cdot K_I \cdot I_{ov}}{N_r} \quad (6.27)$$

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:

$$K_I \approx 0.8 \cdot \cos \varphi + 0.2 = 0.8 \cdot 0.847 + 0.2 = 0.877 \quad (6.28)$$

Οπότε το ρεύμα μπάρας είναι:

$$I_b = \frac{2 \cdot m \cdot W_1 \cdot K_w \cdot K_I \cdot I_{ov}}{N_r} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 132 \cdot 0,959 \cdot 0,877 \cdot 28,08}{48} = 390.395 \text{ A}$$

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

$$A_b = \frac{I_b}{J_b} = \frac{390.395}{3.42} = 114.150 \text{ mm}^2 \quad (6.29)$$

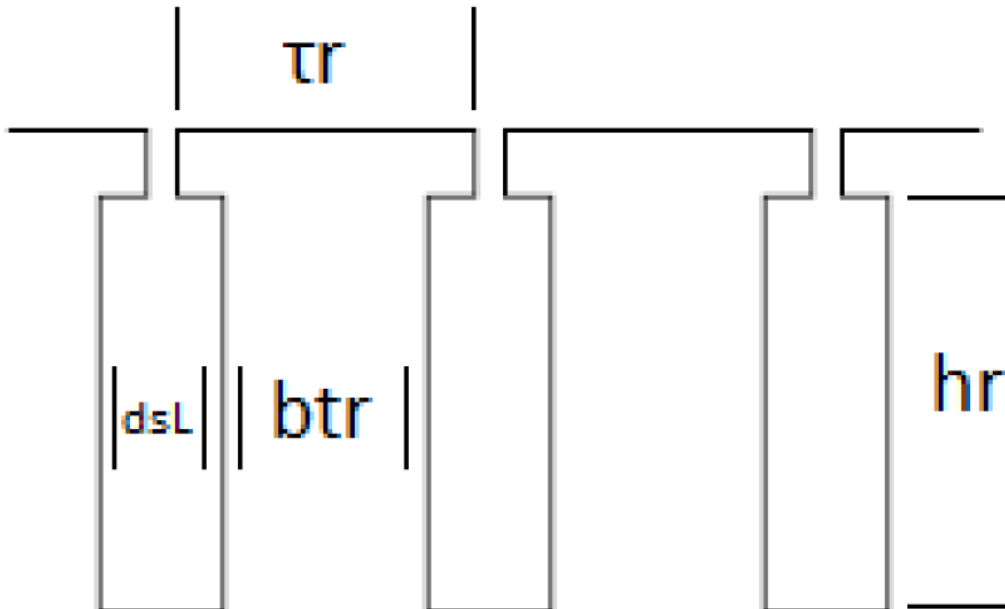
Το ρεύμα δαχτυλιδιού υπολογίζεται:

$$I_{er} = \frac{I_b}{2 \sin \frac{2\pi}{N_r}} = \frac{390.395}{2 \cdot \sin \frac{2\pi}{48}} = 1495.468 \text{ A} \quad (6.30)$$

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 [1]. 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 :

$$A_{er} = \frac{I_{er}}{J_{er}} = \frac{1495.468}{2.73 \cdot 10^6} = 583.028 \cdot 10^{-6} m^2 \quad (6.31)$$



Εικόνα 34 Διαστάσεις αυλακίων δρομέα

Σύμφωνα με τον τύπο του αυλακιού που έχει επιλεγεί, θα πρέπει να υπολογιστούν οι διαστάσεις που φαίνονται στην (Εικόνα 34).

Το βήμα αυλακιού του δρομέα είναι :

$$\tau_r = \frac{\pi(D_{is} - 2g)}{N_r} = \frac{\pi(158,8 - 2 \cdot 0,4)}{48} = 10,342 \text{ mm} \quad (6.32)$$

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

$$b_{tr} = \frac{B_g}{K_{Fe} \cdot B_{tr}} \tau_r = \frac{0,78}{0,96 \cdot 1,7} 10,342 \cdot 10^{-3} = 4.981 \text{ mm} \quad (6.33)$$

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:

$$C = 2\pi \cdot \frac{D_{re}}{2} = \frac{2\pi \cdot 158,8}{2} = 498.64 \text{ mm} \quad (6.34)$$

Το πλάτος του αυλακιού είναι:

$$d_{SL} = \tau_r - b_{tr} = 10,342 - 4.981 = 5.361 \text{ mm} \quad (6.35)$$

Το ύψος των αυλακίων δρομέα είναι :

$$h_r = \frac{A_b}{d_{SL}} = \frac{114.150}{5.361} = 21.292 \text{ mm} \quad (6.36)$$

Με πιο βαθιά αυλάκια δρομέα, θα αυξάνονταν η αντίσταση του δρομέα με αποτέλεσμα να αυξάνονταν η ροπή εκκίνησης και η ονομαστική ολίσθηση του κινητήρα [3].

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.
bor=1.5 mm.

hor= 0.5 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 αυλακίων του δρομέα, θα ξανά υπολογιστεί η μαγνητοενεργετική δύναμη δρομέα.

$$\begin{aligned} F_{mtr} &= H_{tr} \cdot (h_r + h_{or} + d_{SL}) = 4800 \cdot (21.292 + 0.5 + 5,361) \\ &= 130.336 \text{ Aturns} \quad (6.37) \end{aligned}$$

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:

$$h_{cr} = \frac{\varphi}{2LB_{cr}} = \frac{14.308 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0.1871 \cdot 1.6} = 23.897 \text{ mm}$$

6.5 Υπολογισμός των διαστάσεων άξονα

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

$$\begin{aligned} D_{shaft} &\leq D_{is} - 2 \cdot (h_{or} + h_r + h_{cr}) - 2g \Rightarrow D_{shaft} \\ &\leq 158,8 - 2(0,5 + 21,292 + 23,897) - 2 \cdot 0,4 \Rightarrow D_{shaft} \\ &\leq 66,637 \text{ mm} \quad (6.38) \end{aligned}$$

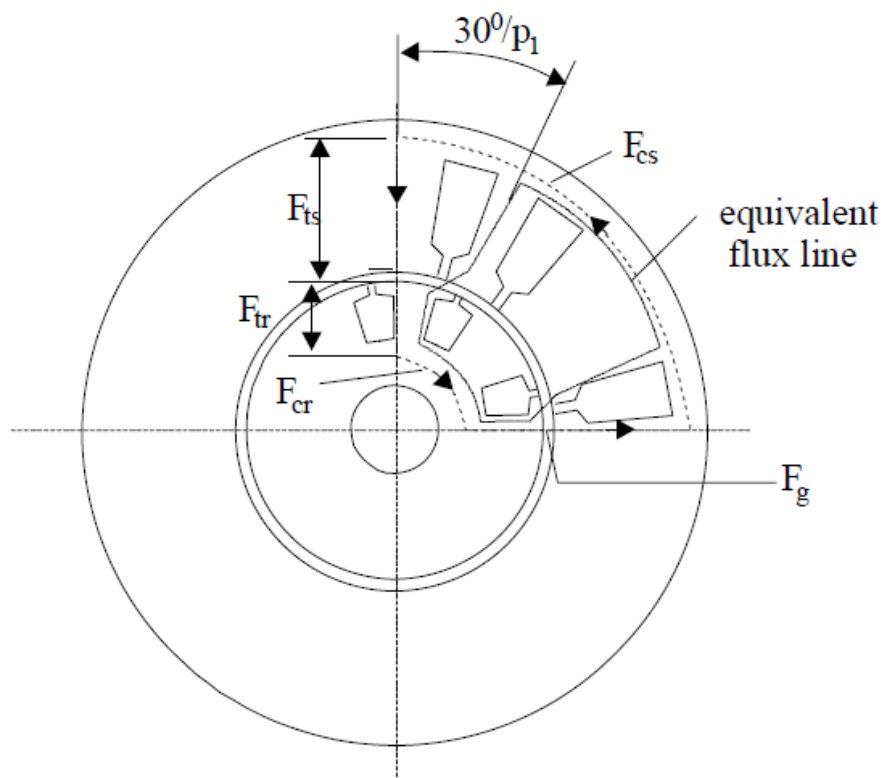
Με την αύξηση της εσωτερικής διαμέτρου του κινητήρα θα προκαλούνταν αύξηση του D_{shaft} , αλλά και μείωση στην ροπή εκκίνησης και ανατροπής. Μια άλλη λύση αποτελεί η μείωση της διατομής στα αυλάκια του δρομέα για να μειωθεί το ύψος τους. Αυτό καθίσταται δυνατό με την αύξηση του αριθμού των αυλακιών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

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

$$T = \frac{P_n}{2\pi \frac{f_1}{p_1} (1 - s)} = \frac{15000}{2\pi \frac{50}{2} (1 - 0,02)} = 97,441 \text{ Nm} \quad (6.39)$$

6.6 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 35 Μαγνητοενεργητικές δυνάμεις στον επαγωγικό κινητήρα

Η ολική mmf του κινητήρα υπολογίζεται από τον τύπο:

$$F_{1m} = 2 \left(K_c \cdot g \frac{B_g}{\mu_0} + F_{mts} + F_{mtr} + F_{mcs} + F_{mcr} \right) \quad (6.40)$$

Όπου K_c είναι ο συντελεστής Carter. Μέχρι στιγμής το K_c το έχει θεωρηθεί ίσο με 1,2. Ο λόγος της μέγιστης πυκνότητας 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 [1]. Οι διαστάσεις του στάτη και του δρομέα που έχουν υπολογιστεί θα βοηθήσουν στον προσδιορισμό του K_c .

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

Όπου K_{c1} είναι ίσο με

$$K_{c1} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1} \quad (6.42)$$

$$K_{c2} = \frac{\tau_r}{\tau_r - \gamma_2} \quad (6.43)$$

Με γ_1 και γ_2 ίσο με

$$\gamma_1 = \frac{b_{os}^2}{5g + b_{os}} = \frac{2.5^2}{5 \cdot 0.4 + 2.5} = 1.38 \quad (6.44)$$

$$\gamma_2 = \frac{b_{or}^2}{5g + b_{or}} = \frac{1.5^2}{5 \cdot 0.4 + 1.5} = 0.64 \quad (6.45)$$

$$K_{c1} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1} = \frac{13.85}{13.85 - 1.38} = 1.11 \quad (6.46)$$

$$K_{c2} = \frac{\tau_r}{\tau_r - \gamma_2} = \frac{10,342}{10,342 - 0.64} = 1,06 \quad (6.47)$$

$$K_c = K_{c1} \cdot K_{c2} = 1.11 \cdot 1.06 = 1,185$$

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:

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 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.

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

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

$$F_{mcs} = C_{cs} \frac{\pi(D_{is} - h_{cs})}{2p_1} H_{cs} = 0.35 \frac{\pi(158,8 - 23.897)}{4} 2460 = 167.982 \text{ Aturns}$$

$$F_{mcr} = C_{cr} \frac{\pi(D_{shaft} + h_{cr})}{2p_1} H_{cr} = 0.31 \frac{\pi(67,63 + 23.897)}{4} 2460 = 55.285 \text{ Aturns}$$

Η συνολική mmf του κινητήρα είναι:

$$\begin{aligned} F_{1m} &= 2 \left(K_c \cdot g \frac{B_g}{\mu_0} + F_{mts} + F_{mtr} + F_{mcs} + F_{mcr} \right) \\ &= 2 \left(1,185 \cdot 0,4 \frac{0,78}{1,256 \cdot 10^{-6}} + 144.702 + 130.336 + 167.982 + 55.285 \right) \\ &= 1589.899 \text{ Aturns} \end{aligned}$$

Ο συντελεστής κορεσμού πυρήνα δίνεται από τον τύπο:

$$K_{sc} = 1 + \frac{F_{mcs} + F_{mcr}}{2F_{mg}} = 1 + \frac{167.982 + 55.285}{2 \cdot 300.389} = 1,371 \quad (6.52)$$

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 [1].

Ο συνολικός συντελεστής κορεσμού είναι:

$$K_s = \frac{F_{1m}}{2F_{mg}} - 1 = \frac{1589.899}{2 \cdot 300.389} - 1 = 1.646 \quad (6.53)$$

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:

$$I_m = \frac{\pi \cdot p_1 \cdot \left(\frac{F_{1m}}{2}\right)}{3\sqrt{2} \cdot W_i \cdot K_w} = \frac{\pi \cdot 2 \cdot \left(\frac{1589.899}{2}\right)}{3\sqrt{2} \cdot 132 \cdot 0,959} = 8.560 \text{ A} \quad (6.54)$$

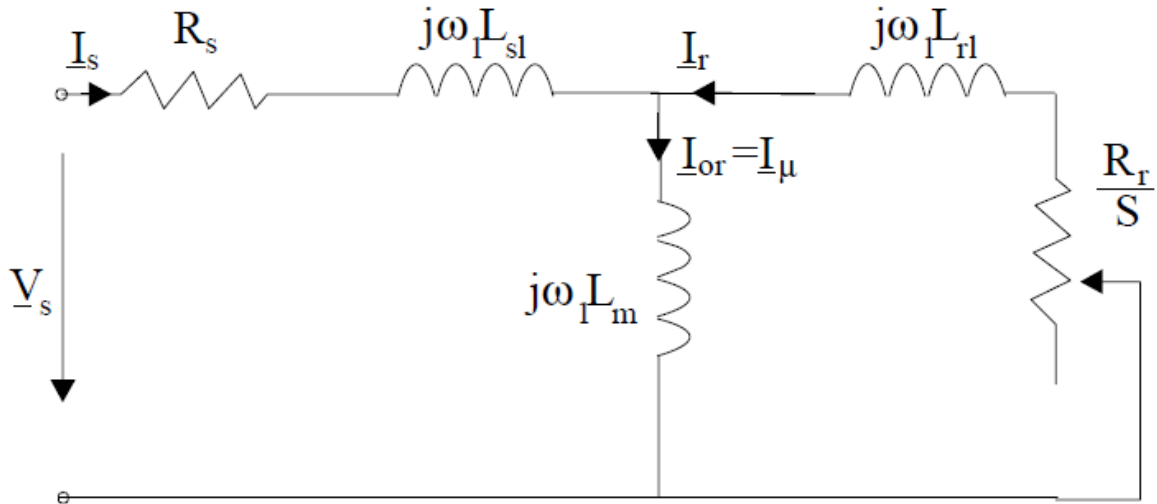
Με σχετικό ρεύμα μαγνήτισης ίσο με:

$$i_m = \frac{I_m}{I_n} = \frac{8.560}{28.08} 100 \% = 30.47 \% \quad (6.55)$$

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 [3].

6.7 Αντιστάσεις και αντιδράσεις κινητήρα

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



Εικόνα 36 Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα

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.[3] .

Οι απώλειες χαλκού στα τυλίγματα του στάτη αντιπροσωπεύονται από μία ωμική αντίσταση (R_s). Η αντίσταση του στάτη δίνεται από τον τύπο:

$$R_s = \rho_{co} \frac{l_c \cdot W_1}{A_{co} \cdot a_i} \quad (6.56)$$

Όπου ρ_{co} είναι η ειδική αντίσταση του χαλκού στους 80°C (ενδεδειγμένη 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:

$$\rho_{80} = \rho_{20} \left(1 + \frac{1}{273} (80 - 20) \right) = 2,1712 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m} \quad (6.57)$$

Το l_c είναι το μήκος πηνίων, όπου είναι 2 φορές το μήκος πυρήνα (L) και 2 φορές τέλος σύνδεσης (lend)

$$l_c = 2(L + l_{end}) \quad (6.58)$$

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 ($y=\tau$). [1]

Οπότε $y=\tau=0,1247\text{m}$

Για 4 πόλους έχουμε l_{end} ίσο με :

$$l_{end} = 2y - 0.02 = 2 \cdot 0.1247 - 0.02 = 0.2295 \text{ m}$$

$$l_c = 2(L + l_{end}) = 2(0.1871 + 0.2294) = 0.8331 \text{ m}$$

Η αντίσταση τυλιγμάτων στάτη :

$$R_s = \rho_{co80} \frac{l_c \cdot W_1}{A_{co} \cdot a_1} = 2,1712 \cdot 10^{-8} \frac{0.8331 \cdot 132}{2.809 \cdot 2} = 0.425 \Omega$$

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:

$$l_{er} = \frac{\pi(D_{er} - b)}{N_r} \quad (6.59)$$

b είναι το ύψος του δακτυλιδιού βραχυκύκλωσης :

$$b = h_r + h_{or} + d_{sL} = 21.292 + 0.5 + 5.361 = 27.153 \text{ mm} \quad (6.60)$$

$$D_{er} = D_{re} - 3.5 \cdot 10^{-3} - 2g = 0.1588 - 3.5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0.4 = 0.15502 \text{ m} \quad (6.61)$$

Οπότε το μήκος του δακτυλιδιού βραχυκύκλωσης είναι:

$$l_{er} = \frac{\pi(D_{er} - b)}{N_r} = \frac{\pi(155.02 - 27.153)}{48} = 8.368 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (6.62)$$

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:

$$\beta_s = \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{2\rho_{Al}}} = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 1.25 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 3.78 \cdot 10^{-8}}} = 79.77 \text{ m}^{-1} \quad (6.64)$$

$$\xi = \beta_s h_r \sqrt{S} = 79.77 \cdot 21.292 \cdot 1 = 1.698 \quad (6.65)$$

Συνεπώς η σύνθετη αντίσταση δρομέα και δακτυλιδιών είναι:

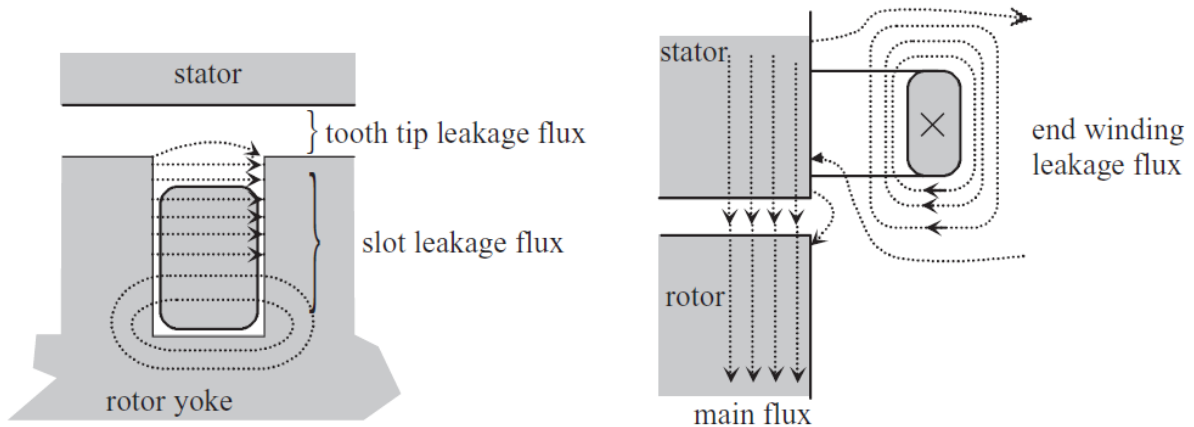
$$\begin{aligned}
 (R_{be}^{80})_{s=1} &= \rho_{Al} \left[\frac{L}{A_b} K_R + \frac{l_{er}}{2A_{er} \sin^2\left(\frac{\pi p_i}{N_r}\right)} \right] \\
 &= 3.78 \cdot 10^{-8} \left[\frac{0.1871}{114.150} 1.698 + \frac{8.368 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 583.028 \cdot 10^{-6} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi 2}{48}\right)} \right] \\
 &= 1.05295 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (6.66)
 \end{aligned}$$

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:

$$\begin{aligned}
 (R_r)_{s=1} &= \frac{4m}{N_r} (W_1 K_w)^2 (R_{be}^{80})_{s=1} = \frac{4 \cdot 3}{48} (132 \cdot 0.959)^2 \cdot 1.05295 \cdot 10^{-4} \\
 &= 0.422 \Omega \quad (6.67)
 \end{aligned}$$

6.8 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 (Εικόνα 37).



Εικόνα 37 Οι ροές διαρροής στον κινητήρα

Η επαγωγική αντίδραση του στάτη δίνεται από τον τύπο:

$$X_{sl} = 2\mu_0\omega L \frac{W_1^2}{p_1 q} (\lambda_s + \lambda_{ds} + \lambda_{ec}) \quad (6.68)$$

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:

$$\lambda_s = \frac{h_s}{3 \cdot b_{s1}} + \frac{h_{os}}{b_{os}} + 0.66 \quad (6.69)$$

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

$$\lambda_{u3} = 0,41 + 0,76 \log \frac{b_{s1}}{b_{os}} \quad (6.70)$$

$$\lambda_s = \frac{h_s}{3 \cdot b_{s1}} + \frac{h_{os}}{b_{os}} + 0,41 + 0,76 \log \frac{b_{s1}}{b_{os}} = \frac{28.646}{3 \cdot 7.446} + \frac{0.5}{2.5} + 0.41 + 0.76 \log \frac{7.446}{2.5} = 2.252$$

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

$$C_s = 1 - 0,033 \frac{b_{os}^2}{g \tau_s} = 1 - 0,033 \frac{2.5^2}{0.4 \cdot 0.0139} = 0.962 \quad (6.71)$$

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

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

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

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

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

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

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

με φ ίσο με :

$$\varphi = \pi(6\beta - 5,5) = \pi(6 \cdot 1 - 5,5) = 1,57 \quad (6.72)$$

Για $q=3$ έχουμε γ_{ds} δίνεται από τον τύπο:

$$\gamma_{ds} = (0,18 \sin \varphi + 1,24)10^{-2} = 1.42 \cdot 10^{-2} \quad (6.73)$$

Ο συντελεστής λ_{ds} είναι:

$$\lambda_{ds} = \frac{0.9\tau_s q^2 K_W^2 C_s \gamma_{ds}}{K_c g (1 + K_{st})} = \frac{0.9 \cdot 13.9 \cdot 10^{-3} \cdot 3^2 \cdot 0.959^2 \cdot 0.962 \cdot 1.42 \cdot 10^{-2}}{1.185 \cdot 0.4 \cdot (1 + 1)} = 1.491$$

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

$$\begin{aligned} \lambda_{ec} &= 0.67 \frac{q}{L} (l_{end} - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau) = 0.67 \frac{3}{0.187} (0.2295 - 0.64 \cdot 1 \cdot 0.1247) \\ &= 1.607 \quad (6.74) \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} X_{sl} &= 2\mu_0 \omega L \frac{W_1^2}{p_1 q} (\lambda_s + \lambda_{ds} + \lambda_{ec}) \\ &= 2 \cdot 1.126 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 0.187 \frac{132^2}{4 \cdot 3} (2.252 + 1.491 + 1,607) \\ &= 2.294 \Omega \end{aligned}$$

Η αντίδραση του δρομέα δίνεται από τον τύπο:

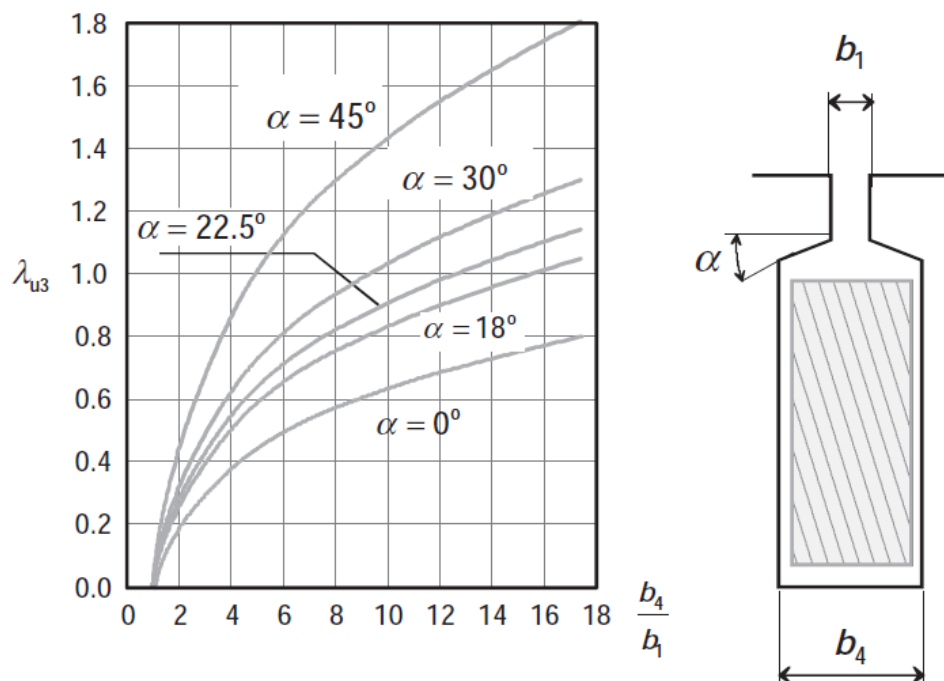
$$X_{be} = 2\pi f \mu_0 L (\lambda_r K_x + \lambda_{dr} + \lambda_{er}) \quad (6.75)$$

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 [2]:

$$\lambda_r = \frac{h_r}{3 \cdot d_{SL}} + \frac{h_{or}}{b_{or}} + \lambda_{u3} \quad (6.76)$$

Όπου λ_{u3} δίνεται από τον παρακάτω διάγραμμα



Το $d_{SL}/b_{or}=3.574$. οπότε το λ_{u3} είναι περίπου ίσο με 0,3489

Για $\alpha=0^\circ$ το $\lambda_{u3}=0.18$. Συνεπώς το λ_r είναι ίσο με :

$$\lambda_r = \frac{h_r}{3 \cdot d_{SL}} + \frac{h_{or}}{b_{or}} + \lambda_{u3} = \frac{21.292}{3 \cdot 5.361} + \frac{0,5}{1,5} + 0,3489 = 2.006$$

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

$$\lambda_{dr} = \frac{0,9\tau_r\gamma_{dr}N_r^2}{K_c g 6p_1} \quad (6.77)$$

Όπου γ_{dr}

$$\gamma_{dr} = 9 \left(\frac{6p_1}{N_r} \right)^2 10^{-2} = 9 \left(\frac{6 \cdot 2}{48} \right)^2 10^{-2} = 0,562 \cdot 10^{-2} \quad (6.78)$$

Συνεπώς

$$\lambda_{dr} = \frac{0,9\tau_r\gamma_{dr}N_r^2}{K_c g 6p_1} = \frac{0,9 \cdot 10,34 \cdot 0,562 \cdot 10^{-2} \cdot 48^2}{1,185 \cdot 0,4 \cdot 6 \cdot 2} = 1,767$$

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

$$\begin{aligned}\lambda_{er} &= \frac{2.3 \cdot (D_{er} - b)}{N_r \cdot L \cdot 4 \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi \cdot P_1}{N_r} \right)} \log \frac{4 \cdot 7(D_{er} - b)}{b + 2a} \\ &= \frac{2.3(155.01 - 27.153)}{48 \cdot 187.1 \cdot 4 \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi 2}{48} \right)} \log \frac{4 \cdot 7(155.01 - 27.153)}{27.153 + 2 \cdot 21.471} = 0,448 \quad (6.79)\end{aligned}$$

Ο συντελεστής επιδερμικού φαινομένου K_x (skin effect coefficient for leakage reactance) λαμβάνεται από τον εξής τύπο, για ξ=1,698:

$$K_x = \frac{3 (\sinh 2\xi - \sin 2\xi)}{2\xi (\cosh 2\xi - \cos 2\xi)} \approx \frac{3}{2\xi} \approx 0,841 \quad (6.80)$$

Η αντίδραση του δρομέα είναι:

$$\begin{aligned}(X_{be})_{s=1} &= 2\pi f \mu_0 L (\lambda_r K_x + \lambda_{dr} + \lambda_{er}) \\ &= 2\pi 50 \cdot 1.126 \cdot 10^{-6} \cdot 187,1 \cdot (2.006 \cdot 0,841 + 1,767 + 0,448) \\ &= 2,8822 \cdot 10^{-4} \Omega\end{aligned}$$

Η αντίδραση του δρομέα ανοιγμένη στον στάτη είναι:

$$(X_{rl})_{s=1} = 4m \frac{(W_1 K_w)^2}{N_r} = 4 \cdot 3 \frac{(132 \cdot 0.959)^2}{48} = 1,156 \Omega \quad (6.81)$$

Οι παραπάνω τιμές στάτη και δρομέα μειώνονται λόγω του κορεσμού της διαδρομής της ροής διαρροής [1].

Για ημι-ανοιχτά αυλάκια έχουμε:

$$(X_{sl})_{sat}^{s=1} = X_{sl}(0.7 - 0.8) = 0.75 \cdot 2.294 = 1,721 \Omega \quad (6.82)$$

$$(X_{rl})_{sat}^{s=1} = X_{rl}(0.6 - 0.7) = 1,156 \cdot 0.65 = 0,751 \Omega \quad (6.83)$$

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 $K_R=K_X=1$, από τον τύπο 6.66 και 6.75 ανακύπτουν αντιστάσεις και αντιδράσεις :

$$(R_{be})_{sn} = 6,1994 \cdot 10^{-5} \Omega$$

$$(X_{be})_{sn} = 3.1169 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$(R_r)_{sn} = (R_r)_{s=1} \frac{(R_{be})_{sn}}{(R_{be}^{80})_{s=1}} = 0.422 \frac{6.1994 \cdot 10^{-5}}{1.05295 \cdot 10^{-4}} = 0.2487 \Omega \quad (6.84)$$

$$(X_{rl})_{sn} = (X_{rl})_{s=1} \frac{(X_{rl})_{sn}}{(X_{be})_{s=1}} = 1.156 \frac{3.1169 \cdot 10^{-4}}{2.8822 \cdot 10^{-4}} = 1.2507 \Omega \quad (6.85)$$

Η μαγνητική αντίδραση λαμβάνεται από τον τύπο:

$$X_m = \sqrt{\left(\frac{V_{ph}}{I_\mu}\right)^2 - R_s^2 - X_{sl}} = \sqrt{\left(\frac{400}{8,560}\right)^2 - 0.425^2 - 2,294} = 44,430 \Omega \quad (6.86)$$

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 ($c=\tau_s$) ισχύει:

$$X_m = X_m K_{skew} \quad (6.87)$$

$$K_{skew} = \frac{\sin \frac{\pi c}{2 \tau}}{\frac{\pi c}{2 \tau}} = \frac{\sin \frac{\pi \tau_s}{2 \tau}}{\frac{\pi \tau_s}{2 \tau}} = \frac{\sin \frac{\pi 1}{2 \cdot 3q}}{\frac{\pi 1}{2 \cdot 3q}} = \frac{\sin \frac{\pi}{18}}{\frac{\pi}{18}} = 0.9954 \quad (6.88)$$

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

$$X_m = X_m K_{skew} = 44,430 \cdot 0,9954 = 44,205 \Omega$$

Επίσης η αντίδραση του δρομέα επαυξάνεται από την λοξοδρόμηση.

$$X'_{rl} = X_{rl}(1 - K_{skew}^2) = 1,156(1 - 0,9954^2) = 0,449 \Omega \quad (6.89)$$

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

$$(X_{rl})_{skew}^{s=1} = (X_{rl})_{sat}^{s=1} + X_{rl skew} = 0,751 + 0,449 = 1,201 \Omega \quad (6.90)$$

$$(X_{rl})_{skew}^{s=s_n} = X_{rl} + X_{rl skew} = 1,250 + 0,449 = 1,7 \Omega \quad (6.91)$$

6.9 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:

$$\sum losses = p_{co} + p_{al} + p_{iron} + p_{mv} + p_{stray} \quad (6.92)$$

Ο βαθμός απόδοσης δίνεται από τον τύπο:

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{in} + \sum losses} \quad (6.93)$$

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

$$p_{co} = 3 \cdot I_{ov}^2 \cdot R_s = 3 \cdot \left(\frac{28,08}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot 0,425 = 335,36 W \quad (6.94)$$

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

$$p_{al} = 3 \cdot (R_r)_{sn} \cdot I_{rn}^2 = 3 \cdot R_r \cdot K_l^2 \cdot I_{ov}^2 = 3 \cdot 0.422 \cdot 0.8776^2 \cdot \left(\frac{28.08}{\sqrt{3}}\right)^2$$

$$= 151,177 \text{ W} \quad (6.95)$$

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

$$p_{mv} = 0,012 \cdot 15000 = 180 \quad (6.96)$$

Οι κατανεμημένες απώλειες δίνονται από τον τύπο:

$$p_{stray} = 0.001 \cdot P_n = 0.001 \cdot 15000 = 150 \quad (6.97)$$

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:

$$p_{t1} = K_{y1} p_{10} \left(\frac{f_1}{50}\right)^{1.3} B_{ts}^{1.7} G_{t1} \quad (6.98)$$

Όπου p_{10} είναι οι ιδικές 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 :

$$\begin{aligned}
G_{t1} &= \gamma_{iron} \cdot N_s \cdot b_{ts} \cdot (h_s + h_w + h_{os}) \cdot L \cdot K_{Fe} \\
&= 7800 \cdot 36 \cdot 6.675 \cdot 10^{-3} \cdot (28,646 + 1 + 0.5) \cdot 10^{-3} \cdot 0.1871 \cdot 0.96 \\
&= 10,149 \text{ kgr} \quad (6.99)
\end{aligned}$$

Για Bts= και f=50 Hz το pt1 είναι ίσο με :

$$p_{t1} = K_{t1} p_{10} \left(\frac{f_1}{50} \right)^{1.3} B_{ts}^{1.7} G_{t1} = 1.7 \cdot 3 \left(\frac{50}{50} \right)^{1.3} \cdot 1.7^{1.7} \cdot 10,149 = 112,434 \text{ W}$$

Για τις απώλειες στον πίσω πυρήνα:

$$p_{y1} = K_y p_{10} \left(\frac{f}{50} \right)^{1.3} B_{cs}^{1.7} G_{y1} \quad (6.100)$$

Όπου Ky= (1.6-1.9).

Το Gy1 δίνεται από τον τύπο :

$$\begin{aligned}
G_{y1} &= \gamma_{iron} \frac{\pi}{4} [D_{out}^2 - (D_{out} - 2h_{cs})^2] \cdot L \cdot K_{Fe} \\
&= 7800 \cdot \frac{\pi}{4} [0,2665^2 - (0,2665 - 2 \cdot 23,897)^2] \cdot 0,1871 \cdot 0,96 \\
&= 25,56 \text{ kgr} \quad (6.101)
\end{aligned}$$

$$p_{y1} = K_y p_{10} \left(\frac{f}{50} \right)^{1.3} B_{cs}^{1.7} G_{y1} = 1.7 \cdot 3 \left(\frac{50}{50} \right)^{1.3} 1.6^{1.7} 25,56 = 289,832 \text{ W}$$

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

$$p_{iron}^1 = p_{t1} + p_{y1} = 112,434 + 289,832 = 402,267 \text{ W} \quad (6.102)$$

Οι συνολικές απώλειες του κινητήρα είναι:

$$\begin{aligned}
\sum losses &= p_{co} + p_{al} + p_{iron} + p_{mv} + p_{stray} \\
&= 335,36 + 151,177 + 402,267 + 180 + 150 = 1218,805 \text{ W}
\end{aligned}$$

Η απόδοση του κινητήρα είναι ίση με:

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_n}{P_n + \sum losses} = \frac{15000}{1500 + 1218.805} 100\% = 92.485 \%$$

6.10 Χαρακτηριστικά λειτουργίας του κινητήρα

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

$$I_o = \frac{p_{iron} + p_{mv} + 3 \cdot I_\mu^2 \cdot R_s}{3V_{ph}} = \frac{402.267 + 180 + 3 \cdot 8.56^2 \cdot 0.425}{3 \cdot 400} = 0.5631 \quad (6.103)$$

Η ονομαστική ολίσθηση υπολογίζεται από τύπο:

$$s = \frac{p_{al}}{p_{ag}} = \frac{p_{al}}{P_n + p_{al} + p_{mv} + p_{stray}} = \frac{151.177}{15000 + 151.177 + 180 + 150} = 0.0098 \quad (6.104)$$

Η ονομαστική ροπή του κινητήρα λαμβάνεται από τον εξής τύπο:

$$T_n = \frac{P_n}{2\pi \frac{f}{p_1} (1 - s_n)} = \frac{15000}{2\pi \frac{50}{2} (1 - 0.0095)} = 96.434 \text{ Nm} \quad (6.105)$$

Η ροπή ανατροπής υπολογίζεται από την σχέση :

$$\begin{aligned} T_{bk} &= \frac{3p_1}{2\omega_1} \frac{V_{ph}}{[R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + C_1 X_{rl})^2}]} \\ &= \frac{3 \cdot 2}{2 \cdot 2\pi 50} \frac{400}{[0.425 + \sqrt{0.425^2 + (2.294 + 1.0636 \cdot 1.7)^2}]} \\ &= 337.27 \text{ Nm} \quad (6.106) \end{aligned}$$

Όπου το C_1 είναι ίσο με :

$$C_1 = 1 + \frac{X_{sl}}{X_{m skew}} = 1 + \frac{2.294}{44.205} = 1.0519 \quad (6.107)$$

Το ρεύμα εκκίνησης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$I_{LR} = \frac{V_{ph}}{\sqrt{(R_s + R_r^{s=1})^2 + (X_{sl}^{s=1} + X_{rl}^{s=1})^2}} = \frac{400}{\sqrt{(0.425 + 0.422)^2 + (2.294 + 1.201)^2}} = 131.468 \text{ A} \quad (6.108)$$

Η ροπή εκκίνησης λαμβάνεται από τον τύπο:

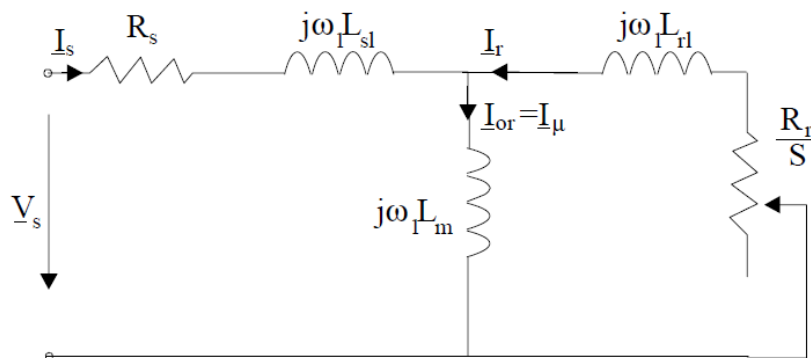
$$T_{LR} = \frac{3R_r^{s=1}I_{Lr}^2}{\omega} p_1 = \frac{3 \cdot 0.422 \cdot 131.468^2}{2\pi 50} 2 = 139.474 \text{ Nm} \quad (6.109)$$

Ο συντελεστής $\cos\varphi$ δίνεται :

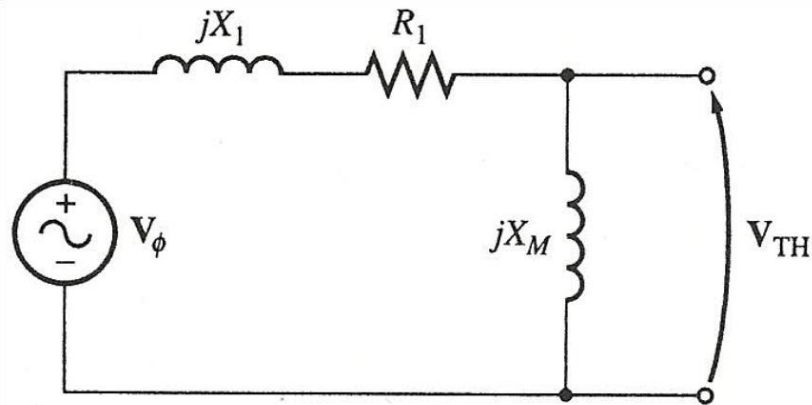
$$\cos\varphi = \frac{P_n}{\sqrt{3}V_{ph}I_{ov}n_n} = \frac{15000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 28,08 \cdot 0,9248} = 0,8334 \quad (6.110)$$

6.11 Υπολογισμός ισοδύναμου thevenin

Το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα θα μπορούσε να αναλυθεί με διάφορους τρόπους. Ένας από αυτούς είναι ο υπολογισμός του ισοδύναμου thevenin. Σύμφωνα με το θεώρημα Thevenin, κάθε γραμμικό κύκλωμα που μπορεί να χωριστεί σε δυο σημεία από το υπόλοιπο κύκλωμα, είναι δυνατό να αντικατασταθεί από μια πηγή τάσης σε σειρά με μία αντίσταση.



Αρχικά χωρίζεται το κύκλωμα όπως φαίνεται στην παρακάτω σχήμα. Στα ανοιχτά άκρα του σχήματος υπολογίζεται η τάση Thevenin.



Η τάση Thevenin δίνεται από τον τύπο :

$$V_{th} = V_{ph} \frac{X_m}{\sqrt{R_s^2 + (X_{sl} + X_m)^2}} \quad (6.111)$$

Για τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης Thevenin ,βραχυκυκλώνεται η φασική τάση. Λόγο ότι η $X_m \gg X_{sl}$ και $X_m + X_{sl} \gg R_s$ η αντίσταση και η αντίσραση δίνονται προσεγγιστικά

$$R_{th} = R_s \left(\frac{X_m}{X_{sl} + X_m} \right)^2 \quad (6.112)$$

$$X_{th} \approx X_{sl} \quad (6.113)$$

6.12 Χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας

Η χαρακτηριστική ροπής –ταχύτητας δίνει μερικές σημαντικές πληροφορίες για τον επαγωγικό κινητήρα.

Με τον υπολογισμό του ισοδύναμου Thevenin, θα βοηθήσει για εξαγωγή του τύπου της επαγόμενης ροπής.

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} \quad (6.114)$$

Η ισχύς διακένου δίνεται από την σχέση:

$$P_{AG} = 3I_2^2 \frac{R_r}{s} = \frac{3V_{th}^2 \frac{R_r}{s}}{\left(R_{th} + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_{th} + X_{rl})^2} \quad (6.115)$$

Οπότε η επαγόμενη ροπή είναι:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{AG}}{\omega_{sync}} = \frac{3V_{th}^2 \frac{R_r}{s}}{\omega_{sync} \left(R_{th} + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_{th} + X_{rl})^2} \quad (6.116)$$

Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα εξομοίωσης Scilab θα εξαχθεί η χαρακτηριστική με την βοήθεια των αντιστάσεων και αντιδράσεων και μέσου του ισοδύναμου Thevenin.

Οι αντιστάσεις και οι αντιδράσεις έχουν υπολογιστεί από την μελέτη εξομοιωμένη στο πρόγραμμα Scilab.

//Το ισοδύναμο Thevenin και η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας

`R_A=0.0001`

`wsync=2*%pi*nsync/60; //Συγχρονη ταχύτητα`

`sk=0.0001:R_A:1; //Ολίσθηση (Πίνακας απο 0,0001 με βήμα 0,0001 'έως 1)`

`nm=(1-sk).*nsync; //ταχύτητα για κάθε ολίσθηση`

`sk=sk'`

`Vth=(Vph.*Xmskew./((sqrt(Rs.*Rs +(Xsl+Xmskew).*(Xsl+Xmskew))))); //Τάση thevenin`

`Xth=Xsl; //Αντίδραση Thevenin`

`Rth=Rs*(Xmskew/(Xsl+Xmskew))*(Xmskew/(Xsl+Xmskew)); //Αντίσταση Thevenin`

`s_max=R2sn./((sqrt(Rth.*Rth+(Xth+X2sn).*(Xth+X2sn))));`

//Υπολογισμός Ρυθμού αύξησης

$S_s=(0.9999999-s_max)/R_A;$

$dXSL=Xsl-Xslsat;$

$dxsl=dXSL/S_s;$

$dR2=R2-R2sn;$

$dr2=dR2/S_s;$

$dX2=X2skewsn-X2skew;$

$dx2=dX2/S_s;$

//Τέλος ρυθμού αύξησης

//Υπολογισμός της τάσης, αντιστάσεις και αντίδρασης Thevenin, για τον υπολογισμό την επαγόμενης ροπής κατά την εκκίνηση.

Rs: αντίσταση στάτη

R2: αντίδραση δρομέα κατά την εκκίνηση

Xslsat: αντίδραση στάτη κατά την εκκίνηση με επίδραση κορεσμού

X2skew: αντίδραση δρομέα με την επίδραση της λοξοδρόμηση κατά την εκκίνηση

Xmskew: αντίδραση μαγνήτισης επηρεασμένη από την λοξοδρόμηση

Vph: Ονομαστική τάση

$i=10000$

$while\ sk(i)>0.9999999$

$Vth=(Vph.*Xmskew./(\sqrt{Rs.*Rs+(Xslsat+Xmskew).*(Xslsat+Xmskew)}));$ *//Τάση thevenin*

$Xth=Xslsat;$ *//Αντίδραση Thevenin*

```
Rth=Rs*(Xmskew/(Xslsat+Xmskew))*(Xmskew/(Xslsat+Xmskew)); //Αντίσταση  
Thevenin
```

```
tind(i)=(3*Vth.*Vth.*(R2./sk(i))./((wsync).*((Rth+((R2./sk(i))).*(Rth+((R2./sk(i))))+(Xth+  
C1.*X2skew).*(Xth+X2skew))));
```

```
i=i-1;
```

```
end
```

*//Υπολογισμός την επαγόμενη ροπής με ρυθμό αύξησης των αντιστάσεων και αντιδράσεων
μέχρι την ονομαστική ολίσθηση.*

```
while sk(i)>sK
```

```
Xslsat=Xslsat+dxsl;
```

```
R2=R2-dr2;
```

```
X2skew=X2skew+dx2;
```

```
Vth=(Vph.*Xmskew./(sqrt(Rs.*Rs +(Xslsat+Xmskew).*(Xslsat+Xmskew)))); //Τάση  
thevenin
```

```
Xth=Xslsat; //Αντίδραση Thevenin
```

```
Rth=Rs*(Xmskew/(Xslsat+Xmskew))*(Xmskew/(Xslsat+Xmskew)); //Αντίσταση  
Thevenin
```

```
tind(i)=(3*Vth.*Vth.*(R2./sk(i))./((wsync).*((Rth+((R2./sk(i))).*(Rth+((R2./sk(i))))+(Xth+  
X2skew).*(Xth+X2skew))));
```

```
i=i-1;
```

```
end
```


//Υπολογισμός της επαγόμενης ροπής για τιμές μετά την ονομαστική ολίσθηση.

Xsl: αντίδραση στάτη

R2sn: αντίσταση δρομέα για ονομαστικές τιμές

X2skewsn: αντίδραση δρομέα για ονομαστικές τιμές επηρεασμένη από την λοξοδρόμηση

while sk(i)>0.0001

$V_{th} = (V_{ph} * X_{mskew} / (\sqrt{R_s * R_s + (X_{sl} + X_{mskew}) * (X_{sl} + X_{mskew})}));$ *//Τάση thevenin*

$X_{th} = X_{sl};$ *//Αντίδραση Thevenin*

$R_{th} = R_s * (X_{mskew} / (X_{sl} + X_{mskew})) * (X_{mskew} / (X_{sl} + X_{mskew}));$ *//Αντίσταση Thevenin*

$t_{ind}(i) = (3 * V_{th} * V_{th} * (R_{2sn} / sk(i))) / ((w_{sync}) * ((R_{th} + (C1 * R_{2sn} / sk(i))) * (R_{th} + (C1 * R_{2sn} / sk(i))) + (X_{th} + C1 * X_{2skewsn}) * (X_{th} + C1 * X_{2skewsn})));$

$t_{max} = (3 * V_{th} * V_{th}) / (2 * w_{sync} * (R_{th} + \sqrt{(R_{th} * R_{th}) + (X_{th} + X_{2skewsn}) * (X_{th} + X_{2skewsn})}))$

$i = i - 1;$

end

//Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας

plot(nm,tind)

xtitle("Χαρακτηριστική ροπή-ταχύτητας")

xlabel("Speed(rpm/min)")

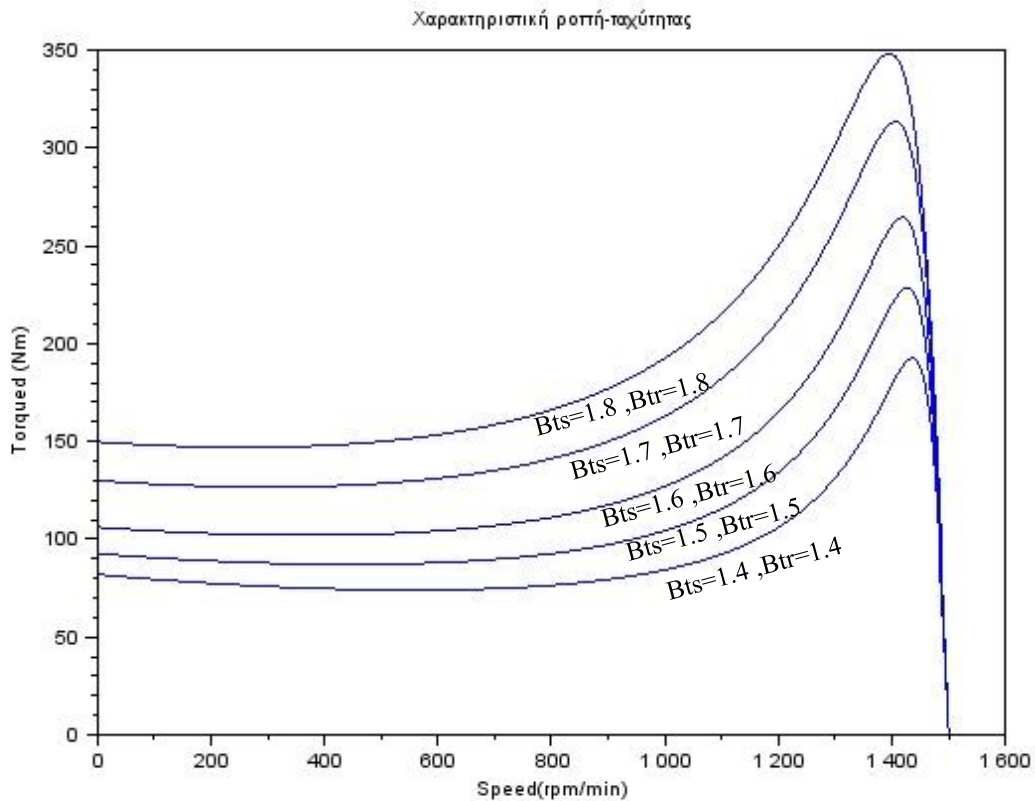
```
ylabel("Torqued (Nm)")
```

```
//Τέλος προγράμματος
```

Κεφάλαιο 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

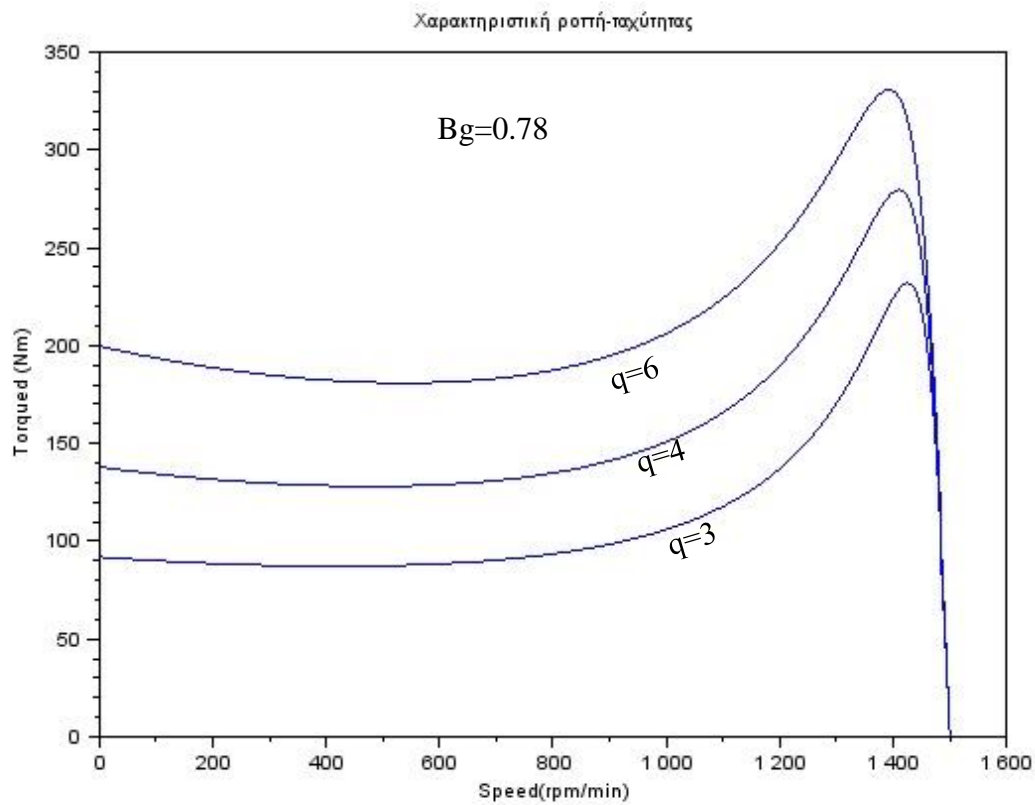
Η παραπάνω μελέτη έγινε με βάση την μελέτη που είχε γίνει στην πτυχιακή (ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΠΟΛΩΝ ΙΣΧΥΟΣ 15KW), με σκοπό την βελτίωση της ροπής εκκίνησης του κινητήρα.



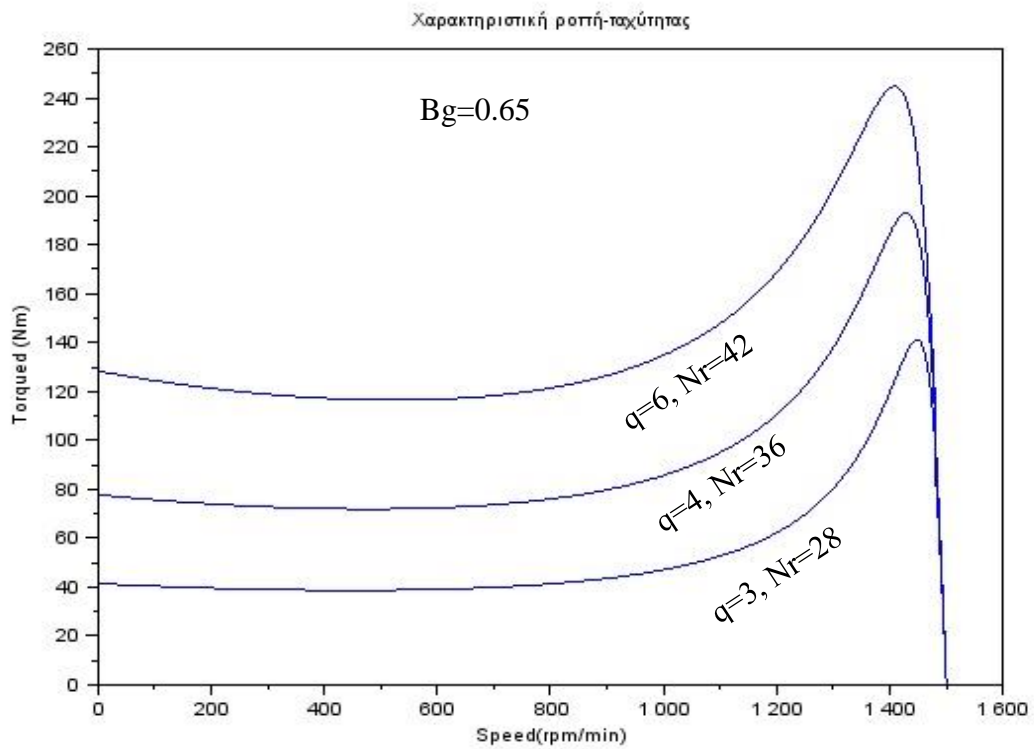
Εικόνα 38 Χαρακτηριστική ροής - ταχύτητας με αύξηση της πυκνότητας ροής στα δόντια, $N_r=48, B_g=0,78$

Ένας από τους τρόπους βελτίωσης της ροπής εκκίνησης του κινητήρα είναι να αυξηθεί η πυκνότητα ροής στα δόντια του στάτη και του δρομέα

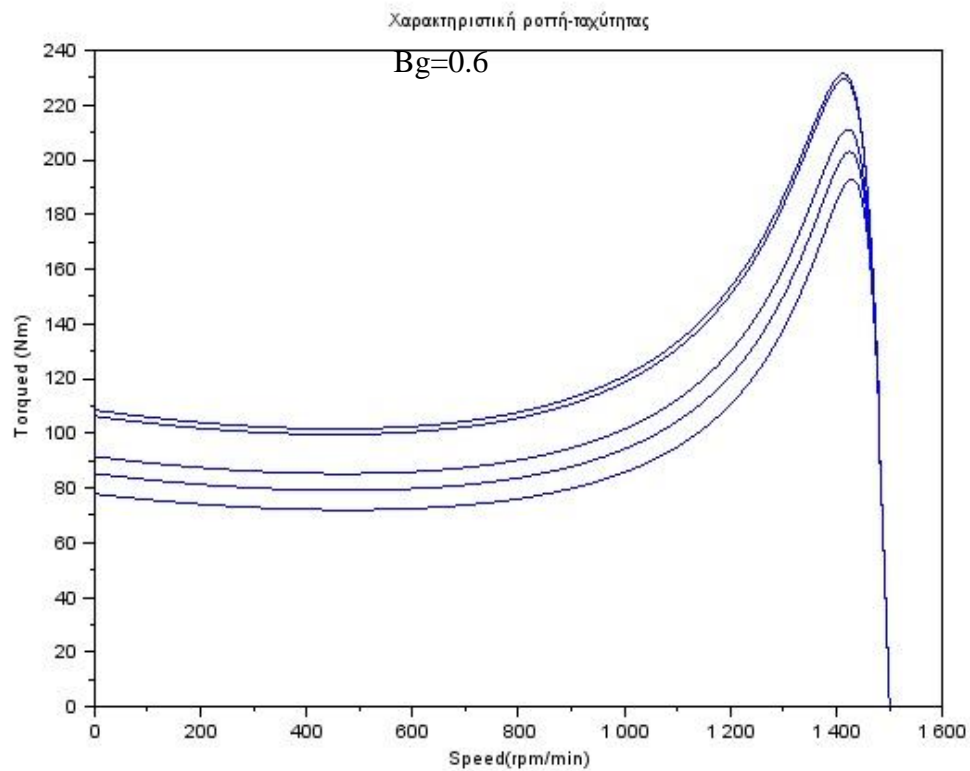
Ένας άλλος τρόπος για να βελτιωθεί η ροπή εκκίνησης και ανατροπής είναι να αυξηθεί ο αριθμός των αυλακιών ανά πόλο ανά φάση (q : αυλάκια ανά φάση ανά πόλο). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των αυλακιών του στάτη (με πυκνότητες ροής δοντιών στάτη και δρομέα ίσες με 1,55). Η αύξηση των αυλακιών του στάτη θα προκαλέσει με την σειρά της μείωση στην αντίδραση του στάτη, ενώ οι άλλες αντιστάσεις και η αντιδράσεις του δρομέα και του στάτη παραμένουν σταθερές.



Εικόνα 39 Χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας αυξάνοντας το q για $N_r=48$, $B_g=0.78$, $B_t=1.55$



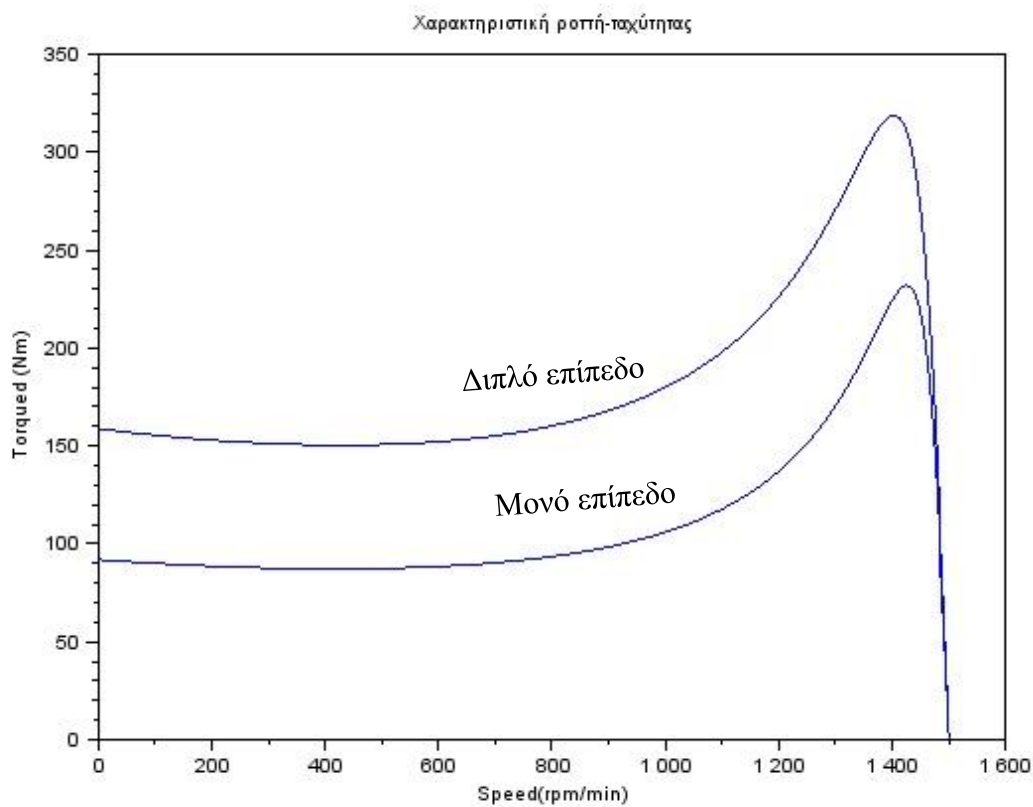
Εικόνα 40 Χαρακτηριστική ροπής ταχύτητας μεταβάλλοντας το q και με τον ελάχιστο αριθμό αυλακιών δρομέα, $B_t, r=1.55$, $B_g=0.65$



Εικόνα 41 Χαρακτηριστική ροπής ταχύτητας μεταβάλλοντας το N_r με $q=4$. Η αύξηση γίνεται σύμφωνα με το Πίνακα 6.7

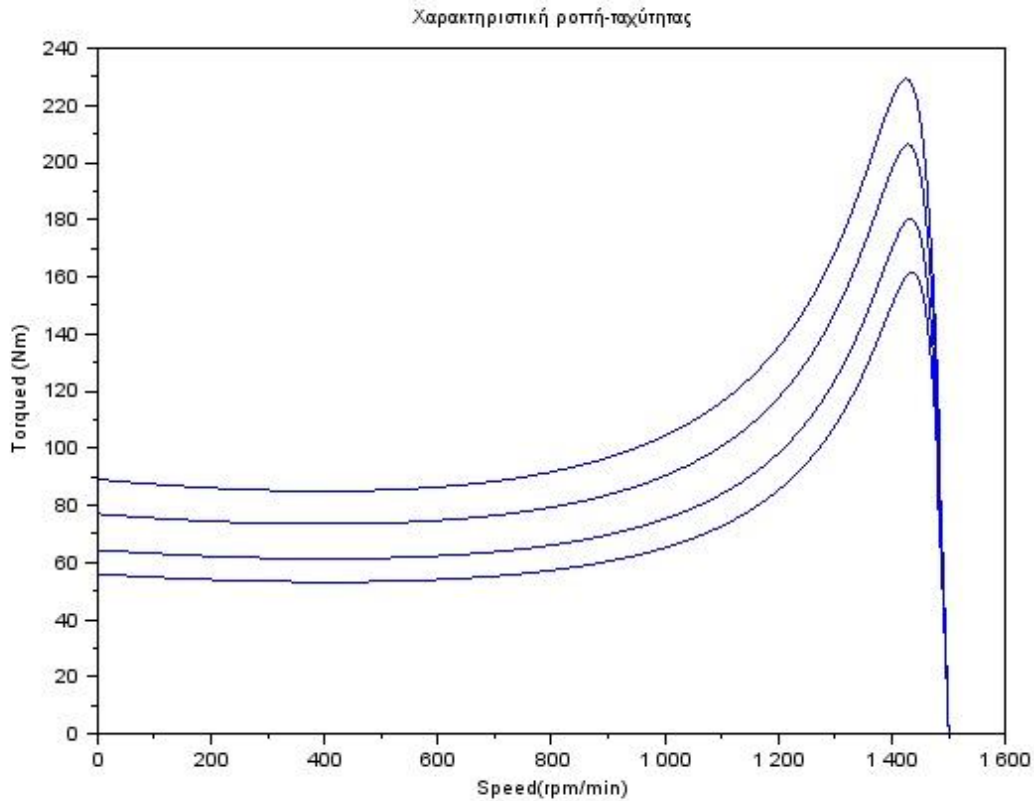
Επίσης με την αύξηση του q , δίνεται η δυνατότητα να αυξηθεί περισσότερο ο αριθμός των αυλακιών του δρομέα (Πίνακας 6.6). Με την αύξηση των αυλακιών δρομέα προκαλείται μείωση του πλάτους στο αυλάκι και δοντιών δρομέα (d_{SL} : πλάτος αυλακίων, b_{tr} : πλάτος δοντιών), με την σειρά τους προκαλούν αύξηση της αντίστασης του δρομέα.

Μια άλλη πρακτική λύση είναι να χρησιμοποιηθεί διπλό επίπεδο τυλιγμάτων σε κάθε αυλάκι. Με διπλό επίπεδο τυλιγμάτων αυξάνεται ο αριθμός των αμπεροστορφών στα πηνία και με την σειρά του προκαλεί μείωση στην αντίδραση του στάτη.



Εικόνα 42 Χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας με διπλό επίπεδο

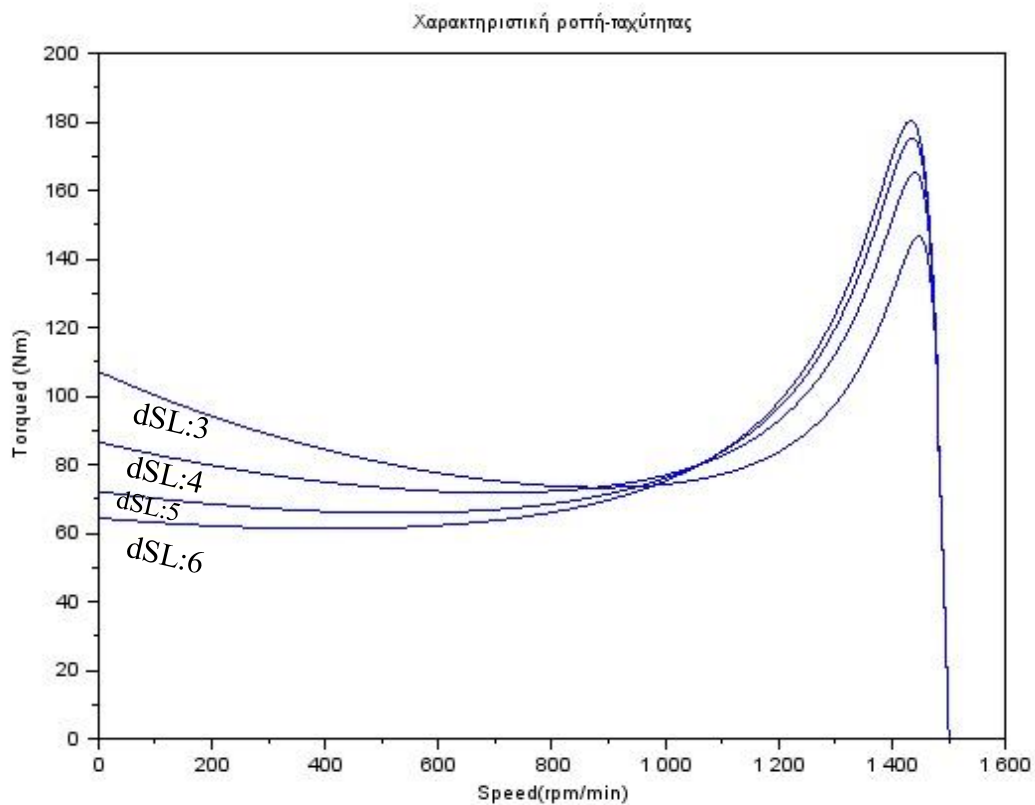
Ένας άλλος τρόπος για την αύξηση της ροπής εκκίνησης και ανατροπής, που χρησιμοποιήθηκε στην παραπάνω μελέτη είναι να αυξηθεί η πυκνότητα ροής διακένου.



Εικόνα 43 Χαρακτηριστική ροπής ταχύτητας μεταβάλλοντας το Bg από 0,6 έως 0,75 με βήμα 0,5 και με Nr=48

Με την αύξηση του διακένου μειώνονται οι αμπεροστροφές στα πηνία.

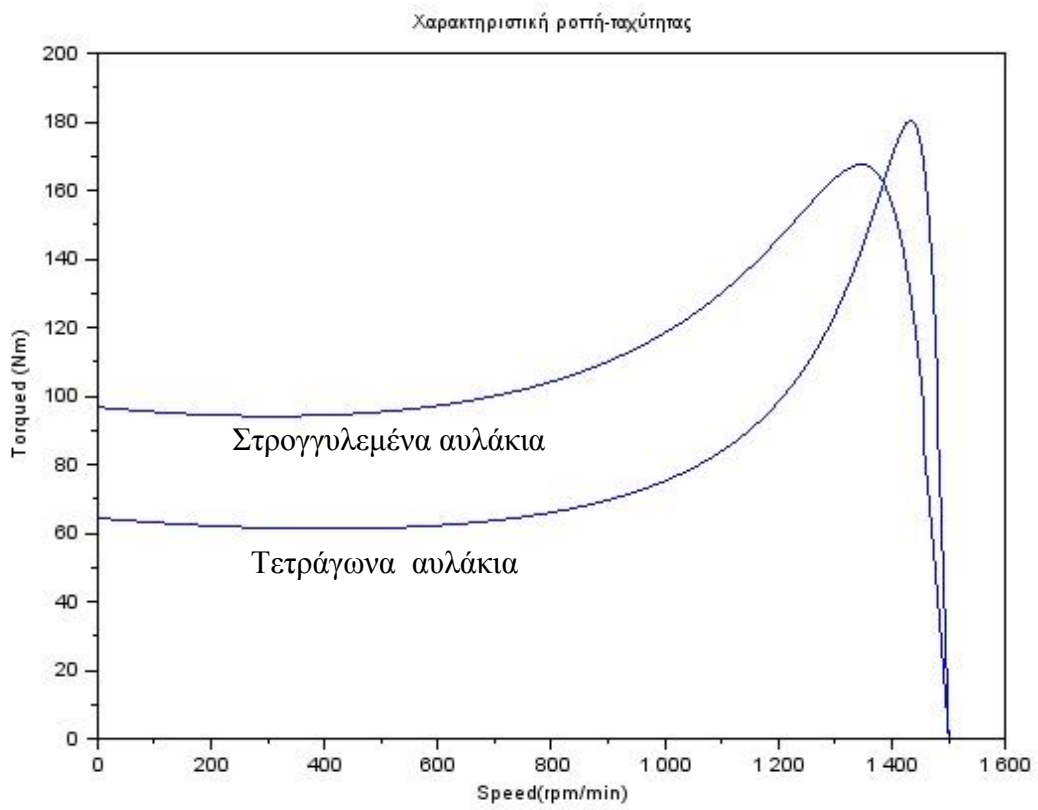
Με την μείωση του πλάτους στα αυλάκια του δρομέα θα αυξηθεί το βάθος των αυλακιών έτσι θα δημιουργηθούν στενά βαθιά αυλάκια. Αυτή η μείωση του πλάτους θα αυξήσει πολύ την αντίδραση του δρομέα για ονομαστική ολίσθηση, για αυτό υπάρχει μείωση στην ροπή ανατροπής και μια πιο μικρή αύξηση την αντίδρασης δρομέα για ολίσθηση ίση με 1, όπου αυτό αυξάνει την ροπή εκκίνησης. Όμως η μείωση του πλάτους ,θα αυξήσει το πλάτος που υπάρχει ανάμεσα σε δύο γειτονικά αυλάκια με αποτέλεσμα να μειωθεί η πυκνότητα ροής στα δόντια με μείωση της μαγνητοενεργετικής δύναμη.



Εικόνα 44 Χαρακτηριστική ροπής ταχύτητας μεταβάλλοντας το πλάτος αυλακιών

Η ροπή εκκίνησης θα μπορούσε να αυξηθεί και με μικρά τετράγωνα αυλάκια, αλλά και εδώ θα υπήρχε πάλι το πρόβλημα με την μειωμένη πυκνότητα ροής στα δόντια. Επίσης θα υπήρχε και μεγάλη αύξηση της ονομαστικής ολίσθησης.

Με στρογγυλεμένα τραπεζοειδή αυλάκια στον δρομέα θα αυξάνονταν η αντίσταση και η αντίδραση του δρομέα με αποτέλεσμα την αύξηση της ροπής εκκίνησης και μικρή μείωση στην ροπή ανατροπής.



Εικόνα 45 Χαρακτηριστική ροπής ταχύτητας με στρογγυλεμένα αυλάκια

ΠΗΓΕΣ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ

Βιβλιογραφία

- [1] ION BOLDEA, SYED A. NASAR «THE INDUCTION MACHINES DESIGN HANDBOOK», SECOND EDITION, CRC PRESS LLC, USA 2010.
- [2] Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen, Valeria Hrabovcova «DESIGN OF ROTATING ELECTRICAL MACHINES», John Wiley & Sons, 2008
- [3] STEPHEN J. CHAPMAN «ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ AC-DC», 3η ΕΚΔΟΣΗ, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2003.
- [4] PAUL L. COCHRAN «POLYPHASE INDUCTION MOTOR ANALYSIS, DESIGN, AND APPLICATION»,CRC PRESS, 1989

Διαδικτυακοί τόποι

- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Induction_motor

Μελέτες

Αργύρης ,Γ. , Μπόρλας, Μ., Σταθελάκης, Π.,(2013). *ΜΕΛΕΤΗ ΤΡΙΦΑΣΙΚΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΠΟΛΩΝ ΙΣΧΥΟΣ 15KW (Διπλωματική εργασία)*. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας