

Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

**Σχεδίαση κινητήρα επαγωγής για ηλεκτροκίνηση
υψηλών ταχυτήτων**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΛΑΜΠΑΚΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ
ΠΑΣΚΟΥ ΕΝΕΑ**

Επιβλέπων : Πέτρος Καραϊσάς
Καθηγητής Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

Αιγάλεω, 07 Φεβρουαρίου 2014

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια λεπτομερή σχεδίαση και ανάλυση συμπεριφοράς κινητήρα επαγωγής ισχύος 4kW για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης. Οι προδιαγραφές που τέθηκαν αφορούν τη ροπή τις στροφές και τη διάμετρο διακένου του κινητήρα. Αρχικά η προκαταρκτική σχεδίαση γίνεται με κριτήριο την ειδική ηλεκτρική φόρτιση και την ειδική μαγνητική φόρτιση, ακολουθώντας δηλαδή την κλασσική μέθοδο. Έπειτα γίνεται λεπτομερής διαστατική ανάλυση προκειμένου να προσδιοριστούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα ορίζοντας συγκεκριμένες τιμές για τη μαγνητική επαγωγή ανά περιοχή της μηχανής (δόντια, σώμα, διάκενο). Αφού προσδιοριστεί μια ικανοποιητική γεωμετρία ο κινητήρας αναλύεται με χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων δύο διαστάσεων (FEMM). Με τη βοήθεια του λογισμικού διεξάγεται ανάλυση ευαισθησίας της ροπής με παραμέτρους διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Με τη βελτιωμένη γεωμετρία, υπολογίζονται οι απώλειες χαλκού και πυρήνα. Προκειμένου να προβλεφθεί η επίδοση του κινητήρα σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας υπολογίζεται κατάλληλο ισοδύναμο κύκλωμα μεταβλητών παραμέτρων. Οι παράμετροι προσδιορίζονται από δοκιμές που προσομοιώνονται με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων. Τέλος, κατασκευάζονται οι καμπύλες ρεύματος - ολίσθησης και ροπής - ολίσθησης.

Λέξεις Κλειδιά

κινητήρες επαγωγής, σχεδίαση, δρομέας κλωβού, πεπερασμένα στοιχεία, ροπή, απώλειες σιδήρου, βελτιστοποίηση γεωμετρίας, ισοδύναμο κύκλωμα.

Abstract

This diploma thesis is a detailed example of design and analysis of a 4kW induction motor for electric traction applications. The provided specifications involve torque, speed and air gap diameter. The preliminary design approach is based on the classic output coefficient concept i.e. choosing specific electric and magnetic loadings and size the geometry accordingly. Then, a detailed dimensional analysis is being conducted in order to define a reasonable motor geometry. This analysis is performed by defining typical values of flux-density on each region (teeth, bore, air gap). Having achieved a reasonable design, 2D finite element analysis software is being used to further analyze the motor. A sensitivity analysis of the produced torque is conducted with parameters some of the geometrical characteristics. On the improved geometry that emerges, Joule and core losses are being calculated. In order to predict the motor performance at different operating conditions, a variable parameters equivalent circuit is determined. The parameters are obtained by tests simulated by the 2D field analysis software. Finally, current – slip and torque – speed curves are computed.

Keywords

Induction machines, design, cage rotor, finite elements, torque, iron losses, geometry optimization, equivalent circuit.

Πρόλογος

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση και ανάλυση ενός κινητήρα επαγωγής ισχύος 4kW για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης σε υψηλές ταχύτητες (6000rpm). Στην εργασία περιγράφεται λεπτομερώς κάθε σημείο της σχεδίασης του κινητήρα επαγωγής, από τις βασικές διαστάσεις μέχρι τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας. Επιπλέον αναπτύσσεται η μεθοδολογία για την εξαγωγή ενός ισοδύναμου κυκλώματος μεταβλητών παραμέτρων που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της επίδοσης της μηχανής.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στη χρήση κινητήρων επαγωγής καθώς επίσης παρουσιάζονται η διαμόρφωση και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους. Εξάγεται και αναλύεται το ισοδύναμο κύκλωμα των κινητήρων επαγωγής και επεξηγείται η χαρακτηριστική ροπής στροφών. Τέλος παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των κινητήρων κατά NEMA με βάση τη χαρακτηριστική ροπής τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται η προκαταρκτική σχεδίαση του κινητήρα. Αρχικά παρουσιάζονται οι προδιαγραφές και με βάση αυτές επιλέγονται οι βασικές διαστάσεις και χαρακτηριστικά του κινητήρα ακολουθώντας γενικές αρχές σχεδίασης. Έπειτα, γίνεται πιο λεπτομερής διαστατική ανάλυση του στάτη και του δρομέα που καταλήγει σε μια αποδεκτή γεωμετρία.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η οριστική σχεδίαση του κινητήρα και υπολογίζονται μέσω αριθμητικών μεθόδων διάφορα χρήσιμα μεγέθη. Αρχικά γίνεται μια εισαγωγή στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται για την ανάλυση της μηχανής. Έπειτα, προτείνεται μια μεθοδολογία για την ανάλυση ευαισθησίας της ροπής από τις διάφορες διαστάσεις στο δρομέα και το στάτη. Το αποτέλεσμα είναι η επιλογή των διαστάσεων για τις οποίες μεγιστοποιείται η ροπή χωρίς όμως να υπερφορτίζεται η μηχανή. Αυτές είναι και οι τελικές διαστάσεις του κινητήρα. Με βάση αυτές υπολογίζονται οι απώλειες του κινητήρα και το αρμονικό περιεχόμενο της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο.

Στο τέταρτο κεφάλαιο υπολογίζεται η επίδοση της μηχανής με την έννοια ότι κατασκευάζεται η χαρακτηριστική ροπής – στροφών. Παρουσιάζεται ένα ισοδύναμο μοντέλο του κινητήρα με κάποιες από τις παραμέτρους του μεταβλητές. Από τις παραμέτρους, κάποιες υπολογίζονται μέσω ενός συνόλου προσομοιώσεων με πεπερασμένα στοιχεία και άλλες μέσω αναλυτικών τύπων. Από το ισοδύναμο κύκλωμα μεταβλητών παραμέτρων εξάγεται η σχέση ροπής – ολίσθησης και κατασκευάζεται η χαρακτηριστική ροπής. Το ισοδύναμο κύκλωμα μεταβλητών παραμέτρων επιτρέπει την ακριβέστερη απεικόνιση των φαινομένων που είναι απαραίτητη για την παρούσα εφαρμογή λόγω των υψηλών συχνοτήτων.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα της εργασίας, αναφέρεται η συνεισφορά της στην προαγωγή της επιστήμης και προτείνονται εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Διαμόρφωση και λειτουργικά χαρακτηριστικά ηλεκτρικών κινητήρων επαγωγής	11
1.1 Ηλεκτρική Ενέργεια και κινητήρες επαγωγής	12
1.2 Ιστορικά στοιχεία	13
1.3 Μηχανές Επαγωγής	17
1.3.1 Στάτης	17
1.3.2 Δρομέας	18
1.4 Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα	20
1.5 Ανάλυση ισοδυνάμου και χαρακτηριστική ροπής	26
1.5.1 Ανάλυση ισοδυνάμου κυκλώματος	26
1.5.2 Χαρακτηριστική ροπής - στροφών	28
1.6 Κατάταξη Κινητήρων Επαγωγής	32

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Προκαταρκτική σχεδίαση κινητήρα επαγωγής	37
2.1 Προδιαγραφές ηλεκτρικού κινητήρα	39
2.2 Προκαταρκτική σχεδίαση	40
2.2.1 Υπολογισμός ενεργού μήκους L	41
2.2.2 Τάση τροφοδοσίας και ρεύμα φάσης	42
2.2.3 Πλήθος αυλάκων, πόλοι και ελιγμάτα ανά φάση	43
2.3 Διαστατική ανάλυση	45
2.3.1 Στάτης	46
2.3.2 Δρομέας	48
2.3.3 Τελική γεωμετρία	51
2.4 Υλικά κατασκευής	52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
Οριστική σχεδίαση κινητήρα	55
3.1 Εισαγωγή στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων	57
3.1.1 Εξισώσεις	59
3.1.2 Οριακές συνθήκες	60
3.2 Εισαγωγή της μηχανής στο FEMM	63
3.2.1 Σχεδίαση	63
3.2.2 Μαγνητοστατική ανάλυση	66
3.2.3 Αρμονική ανάλυση	67
3.3 Ανάλυση ευαισθησίας γεωμετρικών παραμέτρων με κριτήριο τη ροπή	71
3.3.1 Μεταβολή γεωμετρικών παραμέτρων	72
3.3.2 Αποτελέσματα	85
3.4 Υπολογισμός απωλειών και άλλα χαρακτηριστικά	88
3.4.1 Απώλειες πυρήνα	88
3.4.2 Ωμικές απώλειες	90
3.4.3 Συνολικές απώλειες και απόδοση	91
3.4.4 Ροπή σε σχέση με τη θέση του δρομέα	92
3.4.5 Πυκνότητα μαγνητικής ροής κατά μήκος του διακένου	92
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	
Χαρακτηριστικά επίδοσης κινητήρα επαγωγής	95
4.1 Υπολογισμός παραμέτρων ισοδύναμου κυκλώματος	97
4.1.1 Δοκιμή κενού φορτίου	98
4.1.2 Δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα	100
4.1.3 Υπολογισμός παραμέτρων 3D φαινομένων	103
4.1.4 Το ισοδύναμο κύκλωμα	105
4.2 Υπολογισμός χαρακτηριστικών επίδοσης κινητήρα	107
4.2.1 Καμπύλη ρεύματος ολίσθησης	107
4.2.2 Καμπύλη ροπής ολίσθησης	109

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα	113
5.1 Σύνοψη εργασίας	115
5.2 Κυριότερα συμπεράσματα	115
5.3 Σημεία επιστημονικής συνεισφοράς	116
5.4 Εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση	117
Βιβλιογραφία	120

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Διαμόρφωση και λειτουργικά χαρακτηριστικά ηλεκτρικών κινητήρων επαγωγής

Στο εισαγωγικό αυτό κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής και κυρίως των κινητήρων. Αναφέρονται κάποια ιστορικά στοιχεία και ο τρόπος με τον οποίο οι κινητήρες επαγωγής επικρατούν στην ηλεκτροκίνηση. Εξάγεται και αναλύεται το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα επαγωγής και παρουσιάζεται η διαδικασία για την εξαγωγή της χαρακτηριστικής ροπής στρωφών. Τέλος δίδεται η κατηγοριοποίηση των κινητήρων κατά NEMA καθώς καταγράφονται και τα χαρακτηριστικά της κάθε κατηγορίας.

1.1 Ηλεκτρική Ενέργεια και κινητήρες επαγωγής

Η ευημερία μιας κοινωνίας σχετίζεται άμεσα με την ικανότητά της να παράγει αγαθά και υπηρεσίες. Η παραγωγή αγαθών και υπηρεσιών σχετίζεται έντονα με τη χρήση της ενέργειας με έξυπνο τρόπο.

Η ενέργεια διατίθεται ως επί το πλείστον σε λίγες μορφές: θερμική, μηχανική και ηλεκτρική. Η ηλεκτρική ενέργεια, μετρούμενη σε kWh, αντιπροσωπεύει, με ανοδική τάση μάλιστα, περισσότερο του 30% της συνολικής χρησιμοποιούμενης ενέργειας. Ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται άμεσα για την παραγωγή θερμότητας ή για φωτισμό. Το μεγαλύτερο μέρος της, όμως, μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια με τη βοήθεια ηλεκτρικών κινητήρων.

Μεταξύ των ηλεκτρικών κινητήρων, οι κινητήρες επαγωγής είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται περισσότερο, τόσο σε οικιακές συσκευές, όσο και στη βιομηχανία.

Αυτό συμβαίνει διότι παραδοσιακά οι βιομηχανικοί κινητήρες επαγωγής τροφοδοτούνται απευθείας από το τριφασικό εναλλασσόμενο δίκτυο μέσω απλών διακοπών ισχύος και επαρκούς προστασίας. Επιπλέον, κινητήρες επαγωγής μικρής ισχύος, που συναντώνται σε οικιακές συσκευές, τροφοδοτούνται απευθείας από το μονοφασικό δίκτυο. Ακόμη, είναι κατασκευαστικά στιβαροί και απλοί εξασφαλίζοντας περιορισμένο κόστος κατασκευής. Τα βολικά αυτά χαρακτηριστικά αυτά των κινητήρων επαγωγής συνέβαλαν στην καθιέρωσή τους. Σήμερα, στις ανεπτυγμένες χώρες αντιστοιχούν περισσότερα από 3kW ηλεκτρικών κινητήρων ανά άτομο, και η πλειονότητά τους είναι κινητήρες επαγωγής.

Παρά το γεγονός ότι ακόμη οι περισσότεροι κινητήρες επαγωγής τροφοδοτούνται απευθείας από το δίκτυο, περίπου το 10% πλέον χρησιμοποιεί μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος για τον έλεγχο της ταχύτητας. Κινητήρες επαγωγής με μετατροπείς μεταβλητής ταχύτητας χρησιμοποιούνται κυρίως στις μεταφορές, σε αντλίες και συμπιεστές, σε ανεμιστήρες, στη ρομποτική, σε υβριδικά ή ηλεκτρικά οχήματα, σε πλυντήρια, κτλ. Προβλέπεται, ότι, στην επόμενη δεκαετία, το 50% των κινητήρων επαγωγής θα οδηγείται από ηλεκτρονικά ισχύος. Το ποσοστό θα φτάνει το 60-70% στις νέες ανεπτυγμένες αγορές.

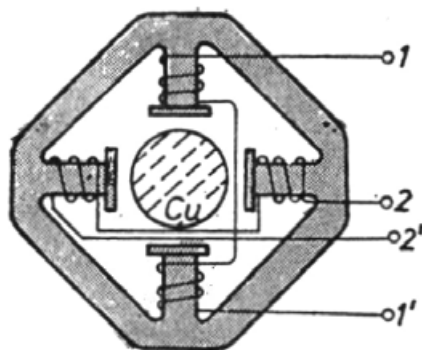
Έξυπνη χρήση της ενέργειας σημαίνει υψηλότερη παραγωγικότητα με χαμηλότερες απώλειες και μετριασμένο κόστος. Μειωμένες απώλειες οδηγούν σε μικρότερη περιβαλλοντική, θερμική και χημική επιβάρυνση τόσο στο χώρο που ο κινητήρας δουλεύει, όσο και στη μονάδα παραγωγής της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μεταβλητή ταχύτητα μέσω μεταβαλλόμενης συχνότητας είναι ύψιστης σημασίας για την επίτευξη τέτοιων στόχων. Ωστόσο, η χρήση μετατροπέων μεταβλητής ταχύτητας οδηγούν σε αρμονικές ρεύματος που μολύνουν το ηλεκτρικό δίκτυο και προκαλούν ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στο περιβάλλον. Έτσι, η ποιότητα ισχύος και η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMI) είναι νέοι περιορισμοί στην ανάπτυξη μετατροπέων για την οδήγηση κινητήρων επαγωγής.

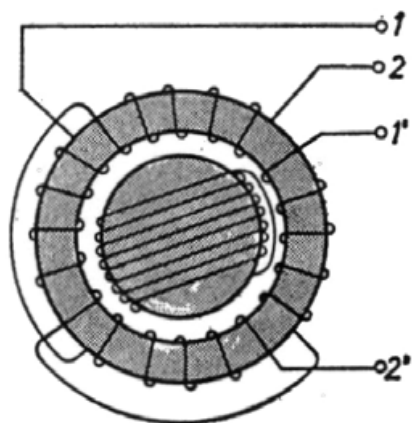
Ο ψηφιακός έλεγχος είναι πλέον δεδομένος στους μετατροπείς, και το μέλλον φαίνεται να είναι έξυπνοι, αυτόνομοι μετατροπείς για την οδήγηση κινητήρων που θα ελέγχονται και θα επιδιορθώνονται μέσω Διαδικτύου. Ακόμη, νέες ευκαιρίες για εφαρμογές αφθονούν: από ψηφιακές συσκευές και υβριδικά ή ηλεκτρικά οχήματα μέχρι το «πιο ηλεκτρικό αεροσκάφος». [4]

1.2 Ιστορικά στοιχεία

Ο Faraday ανακάλυψε το νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής περίπου το 1831 και ο Maxwell διατύπωσε τις εξισώσεις του ηλεκτρισμού (εξισώσεις Maxwell) το 1860. Οι συνθήκες λοιπόν ήταν ώριμες για την εφεύρεση της μηχανής επαγωγής, που οφείλεται σε δύο ανθρώπους που δούλεψαν παράλληλα. Αυτοί είναι ο Galileo Ferraris (1885) και ο Nicola Tesla (1886). Οι μηχανές επαγωγής τους φαίνονται στο **Σχήμα 1.1** και **Σχήμα 1.2**.



Σχήμα 1.1 Κινητήρας επαγωγής του Ferraris (1885)



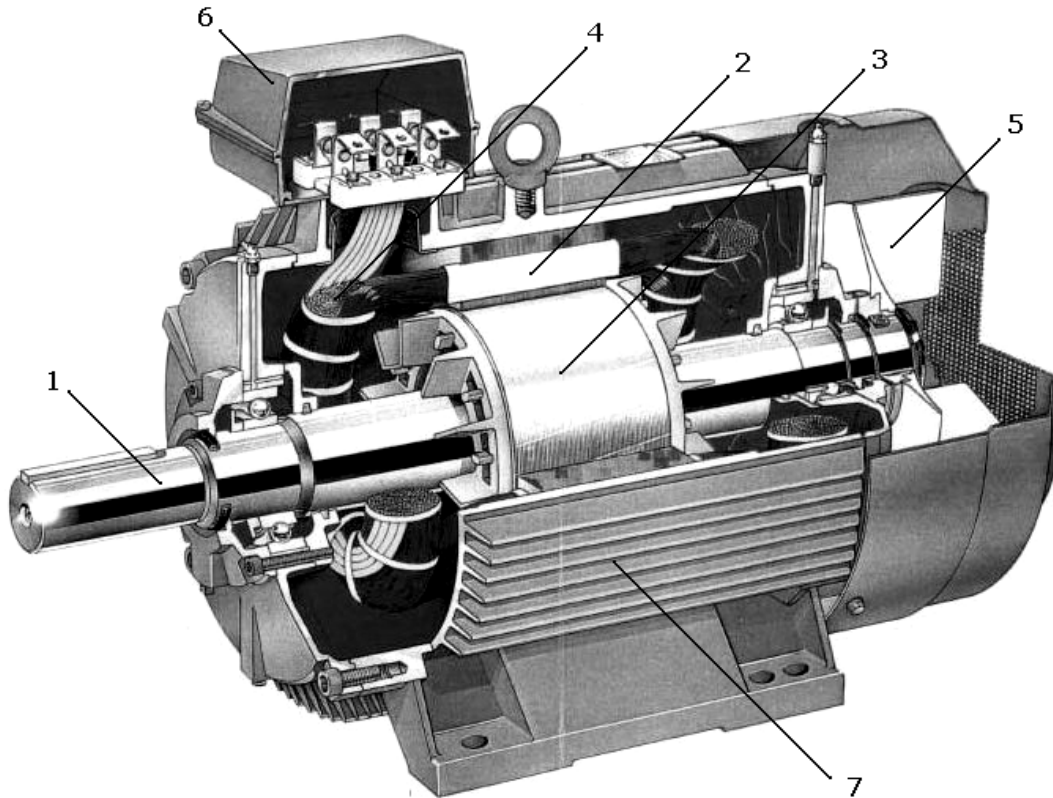
Σχήμα 1.2 Κινητήρας επαγωγής του Tesla (1887)

Και οι δύο μηχανές τροφοδοτούνταν από διφασική εναλλασσόμενη πηγή τάσης και γι' αυτό υπάρχουν τα διφασικά συγκεντρωμένα τυλίγματα (1-1' και 2-2') στο σιδηρομαγνητικό πυρήνα του στάτη.

Στην κατασκευή του Ferraris ο δρομέας ήταν κατασκευασμένος από έναν χάλκινο κύλινδρο, ενώ στου Tesla ο δρομέας ήταν ένας σιδηρομαγνητικός κύλινδρος με βραχυκυκλωμένο τύλιγμα. Αν και οι σύγχρονοι κινητήρες επαγωγής έχουν πιο περίτεχνη τοπολογία (**Σχήμα 1.3**) και η απόδοσή τους είναι πολύ καλύτερη, η βασική αρχή έμεινε κατά βάση η ίδια.

Δηλαδή, πολυφασικό εναλλασσόμενο τύλιγμα στο στάτη δημιουργεί κινούμενο (στρεφόμενο) πεδίο που επάγει τάσεις, οι οποίες με τη σειρά τους παράγουν ρεύματα στο βραχυκυκλωμένο (ή κλειστό) τύλιγμα του δρομέα. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του πεδίου του στάτη και των επαγόμενων στο δρομέα ρευμάτων παράγει ροπή και κάνει τον κινητήρα επαγωγής να λειτουργεί. Αν η ροπή σε μηδενική ταχύτητα δρομέα είναι μη μηδενική, ο κινητήρας επαγωγής μπορεί να ξεκινήσει αυτόνομα. Το τριφασικό εναλλασσόμενο δίκτυο, ικανό για τη μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις ώστε να τροφοδοτεί κινητήρες επαγωγής και άλλους καταναλωτές, προτάθηκε από τον Dolivo-Dobronosky γύρω στα 1880.

Το 1889, ο Dolivo-Dobronosky εφηύρε τον κινητήρα επαγωγής με τυλιγμένο δρομέα και ακόλουθα τον δρομέα κλωβού με μια τοπολογία πολύ παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται σήμερα. Επίσης εφηύρε το δρομέα διπλού κλωβού.



Σχήμα 1.3 Μοντέρνος 3Φ κινητήρας επαγωγής βραχυκυκλωμένου κλωβού: 1.άξονας 2.στάτης 3.δρομέας 4.τύλιγμα στάτη 5.φτερωτή ανεμισμού 6.κιβώτιο σύνδεσης τυλιγμάτων/ακροδεκτών 7.πλαίσιο (κατασκευή ABB, 90kW, 1484ΣΑΛ, 630kg)

Γύρω στα 1900 ο κινητήρας επαγωγής ήταν έτοιμος για ευρεία βιομηχανική χρήση. Δεν αποτελεί έκπληξη λοιπόν ότι πριν το 1910 οι αμαξοστοιχίες με που κινούνταν με κινητήρες επαγωγής έφταναν τα 200km/h.

Ωστόσο, τουλάχιστον για τις μεταφορές, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος κατέλαβαν το μεγαλύτερο μερίδιο μέχρι το 1985, οπότε και αναπτύχθηκαν inverter τεχνολογίας IGBT PWM (παλμοκωδική διαμόρφωση με χρήση διακοπών IGBT). Αυτό επέτρεψε την κατασκευή μετατροπέων που οδήγησαν στη δυναμική επιστροφή των κινητήρων επαγωγής σε εφαρμογές μεταβλητής ταχύτητας σε όλη τη βιομηχανία.

Κυρίως λόγω των ηλεκτρονικών ισχύος και του ψηφιακού ελέγχου, ο κινητήρας επαγωγής, παρά την πολύχρονη παρουσία του στη βιομηχανία, μπορεί να θεωρηθεί αντικείμενο υψηλής και σύγχρονης τεχνολογίας με ευρεία χρήση στην ηλεκτροκίνηση. Στον **Πίνακα 1.1** παρουσιάζονται κάποια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαφόρων τύπων κινητήρων.

Τύπος κινητήρα	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
επαγωγής	χαμηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας, μεγάλη διάρκεια ζωής, υψηλή απόδοση	υψηλό ρεύμα εκκίνησης (που περιορίζεται όμως με ηλεκτρονικά ισχύος), απορροφά άεργο ισχύ
σύγχρονος	δεν απαιτείται άεργος ισχύς για τη φόρτιση του μαγνητικού κυκλώματος	μεγάλο κόστος κατασκευής
μονίμων μαγνητών	δεν απαιτείται κύκλωμα διέγερσης	μαγνήτες υψηλών επιδόσεων έχουν μεγάλο κόστος και είναι ευαίσθητοι
συνεχούς ρεύματος	εύκολος έλεγχος ταχύτητας	υψηλά κόστη κατασκευής και συντήρησης

Πίνακας 1.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαφόρων τύπων κινητήρων

Το υψηλό ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα επαγωγής περιορίζεται με ηλεκτρονικά ισχύος (soft starter) και πλέον δεν αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα. Ακόμη το συγκριτικό πλεονέκτημα των μηχανών συνεχούς ρεύματος, δηλαδή ο εύκολος έλεγχος της ταχύτητας, πλέον δεν αποτελεί μονοπώλιο, καθώς σήμερα με κατάλληλες διατάξεις οι κινητήρες επαγωγής ελέγχονται πολύ εύκολα.

Γεγονότα και εξελίξεις που σημάδεψαν την ιστορία των κινητήρων επαγωγής

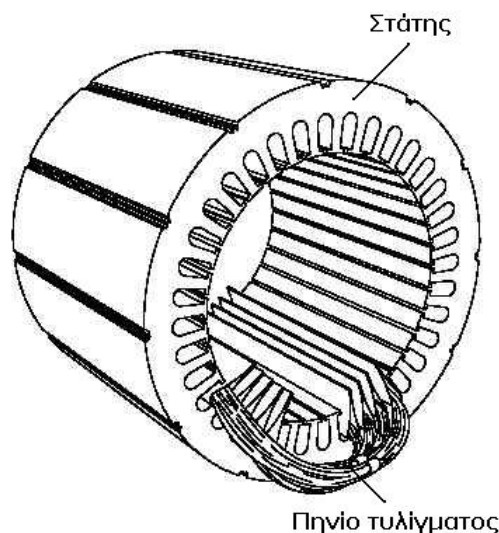
- Όλο και καλύτερα αναλυτικά μοντέλα μόνιμης κατάστασης
- Καλύτερα μονωτικά υλικά και συστήματα ψύξης
- Φθινοί μετατροπείς IGBT PWM χαμηλών απωλειών και υψηλής πυκνότητας ισχύος
- Ντετερμινιστικές και στοχαστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης του σχεδιασμού.
- Νέες μέθοδοι για κατασκευή και δοκιμή των μηχανών επαγωγής
- Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων και σε συνδυασμό με κυκλωματικά μοντέλα για εκτενή ανάλυση μηχανών με κρίσιμη μαγνητική και ηλεκτρική φόρτιση [4]

1.3 Διαμόρφωση ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής

Οι στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές έχουν δύο μέρη, ένα σταθερό που λέγεται στάτης και ένα στρεφόμενο που λέγεται δρομέας. Για να είναι μικρή η μαγνητική αντίσταση των δρόμων της μαγνητικής ροής, οι πυρήνες του στάτη και του δρομέα κατασκευάζονται από σιδηρομαγνητικό υλικό σε μορφή μονωμένων μεταξύ τους ελασμάτων προς ελάττωση των απωλειών δινορρευμάτων. [3]

1.3.1 Στάτης

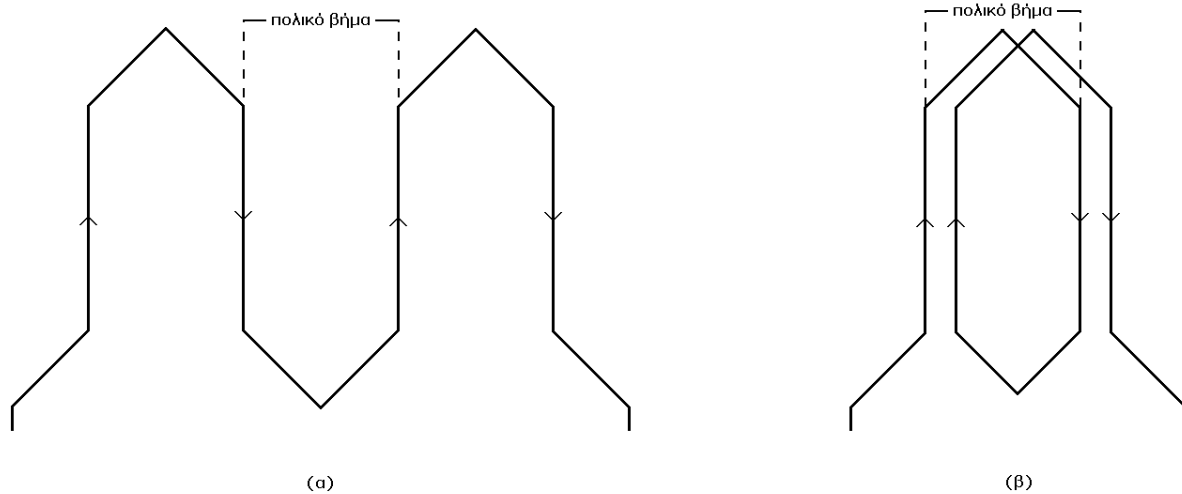
Ο στάτης διαμορφώνεται ως ένας κούφος κύλινδρος με ομοιόμορφα διανεμημένες αύλακες στο εσωτερικό του, όπου περιελίσσεται το τύλιγμα (Σχήμα 1.4)



Σχήμα 1.4 Στάτης μηχανής επαγωγής

Τα τυλίγματα τοποθετούνται κατά κανόνα στις ομοιόμορφα διανεμημένες αύλακες στο σιδηρομαγνητικό υλικό του στάτη. Για να σχηματιστεί ένα πλήρες τύλιγμα, τοποθετούνται όμοια πηνία σε απέναντι αύλακες και στη συνέχεια συνδέονται μεταξύ τους σε ομάδες. Οι ομάδες πηνίων, έπειτα, συνδέονται σε αστέρα ή τρίγωνο (για 3Φ μηχανές). Μερικά τυλίγματα μπορεί να είναι διπλής στρώσης. Σε τέτοια τυλίγματα κάθε αύλακα περιέχει δύο πλευρές πηνίου, μία στην κορυφή και μία στον πυθμένα της. Κάθε πηνίο έχει μία πλευρά σε πάνω μέρος και την άλλη σε κάτω μέρος αύλακας. Ανάλογα με το τύλιγμα και την τροφοδότηση η μηχανή μπορεί να έχει οποιοδήποτε άρτιο αριθμό μαγνητικών πόλων. [2]

Τα τυλίγματα που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι δύο: το βροχοτύλιγμα και το κυματοειδές τύλιγμα (**Σχήμα 1.5**). Το βροχοτύλιγμα χρησιμοποιείται σε μηχανές με λίγους πόλους και υψηλές ταχύτητες. Αντίθετα το κυματοειδές τύλιγμα χρησιμοποιείται σε πολυπολικές μηχανές χαμηλών ταχυτήτων (π.χ. υδροηλεκτρικές εφαρμογές)



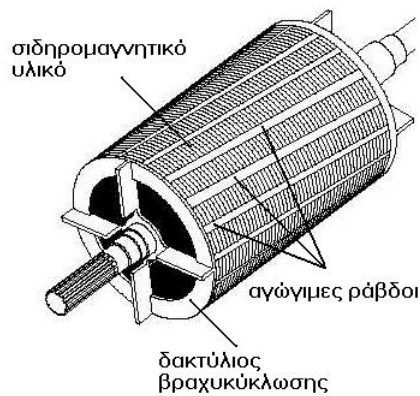
Σχήμα 1.5 Τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών: (α) κυματοειδές, (β) βροχοειδές

Τέλος τα τυλίγματα ενδέχεται να κατανέμονται σε μία ή δύο στρώσεις προκειμένου να ομαλοποιείται η πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο. Το κόστος όμως είναι η μείωση της θεμελιώδους που έχει επίπτωση στην επίδοση της μηχανής. [8]

1.3.2 Δρομέας

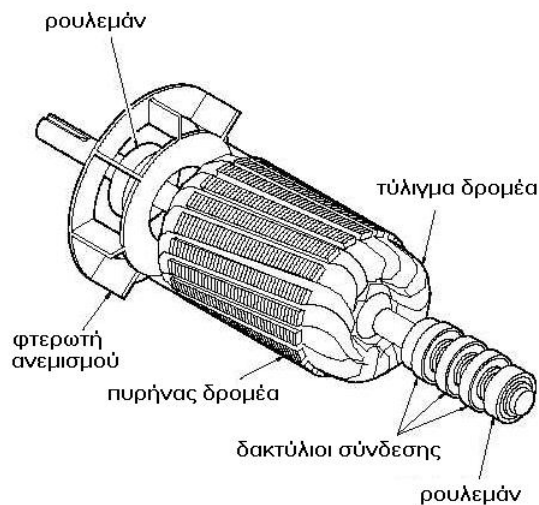
Στο δρομέα της μηχανής επαγωγής, το τύλιγμα είναι ηλεκτρικά κλειστό και πολύ συχνά δεν έχει εξωτερικούς ακροδέκτες. Υπάρχουν δύο τύποι δρομέων που χρησιμοποιούνται:

Τύλιγμα κλωβού: το τύλιγμα αυτό αποτελείται από αγωγίμες ράβδους αλουμινίου ή χαλκού, τοποθετημένες σε αύλακες στο σιδερένιο πυρήνα του δρομέα, που βραχυκυκλώνονται στα άκρα τους με δακτυλίους (**Σχήμα 1.6**)



Σχήμα 1.6 Δρομέας με τύλιγμα κλωβού

Τυλιγμένος (δακτυλιοφόρος) δρομέας: φέρει πολυφασικό τύλιγμα όμοιο με αυτό του στάτη και με τον ίδιο αριθμό πόλων. Οι ακροδέκτες του δρομέα συνδέονται μέσω δακτυλίων και ψηκτρών με εξωτερικές μεταβαλλόμενες αντιστάσεις που χρησιμεύουν για την αύξηση της αντίστασης του δρομέα κατά την εκκίνηση του κινητήρα επαγωγής (**Σχήμα 1.7**) [2]



Σχήμα 1.7 Τυλιγμένος δρομέας

1.4 Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα

Η τροφοδότηση του στάτη με εναλλασσόμενη τάση δημιουργεί κύμα ΜΕΔ που στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα n_s [ΣΑΛ]:

$$n_s = \frac{120f}{P} \quad (1.1)$$

Όπου f η ηλεκτρική συχνότητα τροφοδοσίας και P το πλήθος των πόλων της μηχανής.

Αντίστοιχα σε rad/sec η σύγχρονη ταχύτητα είναι:

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{P/2} \quad (1.2)$$

Έστω ότι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι n . Τότε ορίζεται η ολίσθηση s από τη σχέση:

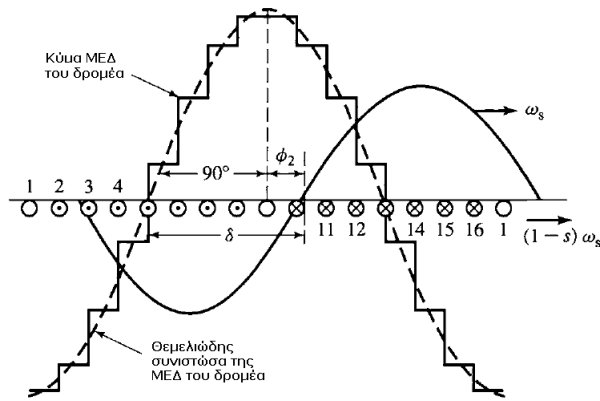
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1.3)$$

Η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, ή μηχανική ταχύτητα, μπορεί τότε να εκφραστεί ως συνάρτηση της ολίσθησης και της σύγχρονης ταχύτητας ως εξής:

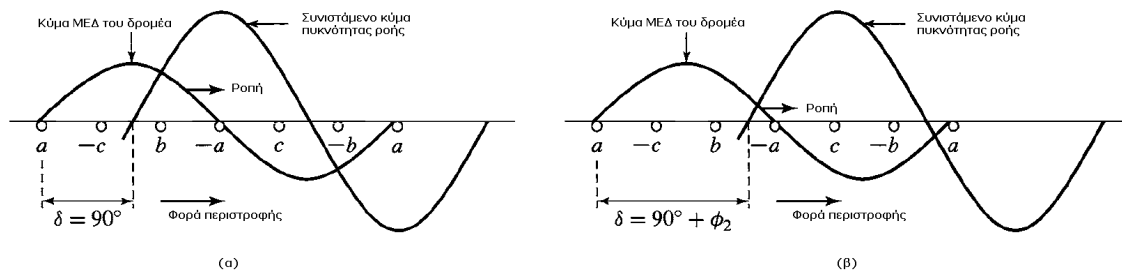
$$n = (1-s)n_s \quad (1.4)$$

Το κύμα πυκνότητας ροής του στάτη κινείται ως προς το δρομέα με την ταχύτητα ολίσθησεως sn_s . Επάγει συνεπώς στο τυλίγμα του δρομέα εναλλασσόμενες τάσεις συχνότητας sf , όπου f είναι η συχνότητα των ρευμάτων του στάτη. Επειδή ο δρομέας είναι βραχυκυκλωμένος, οι επαγόμενες στο τυλίγμά του τάσεις θα προκαλέσουν εναλλασσόμενα τριφασικά ρεύματα και συνακόλουθα ένα μαγνητικό πεδίο που θα περιστρέφεται με ταχύτητα sn_s ως προς το δρομέα. Ως προς το στάτη συνεπώς, το μαγνητικό πεδίο του δρομέα περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα n_s . Το κύμα της μαγνητεργετικής δύναμης (ΜΕΔ) του δρομέα σχηματίζει επομένως μια σταθερή γωνία με το συνιστάμενο κύμα ροής, η οποία υπερβαίνει τις 90 ηλεκτρικές μοίρες κατά την γωνία συντελεστού ισχύος ϕ_2 του τυλίγματος του δρομέα.

Τα κύματα μαγνητικής ροής και ΜΕΔ στο διάκενο φαίνονται στο **Σχήμα 1.8** και στο **Σχήμα 1.9** για την περίπτωση τυλίγματος κλωβού και τυλιγμένου δρομέα αντίστοιχα.



Σχήμα 1.8 Ανάπτυξη κύματος MEΔ σε δρομέα με τύλιγμα κλωβού



Σχήμα 1.9 Συνιστάμενο κύμα MEΔ και κύμα MEΔ δρομέα: α) $\cos\phi_2=1$, β) $\cos\phi_2\neq 1$

Ένα ισοδύναμο κύκλωμα μόνιμης κατάστασης μπορεί να κατασκευαστεί θεωρώντας μηχανές με συμμετρικά τυλίγματα που διεγείρονται από συμμετρικές πηγές τάσης. Επίσης η μηχανή θεωρείται ότι είναι συνδεσμολογημένη σε αστέρα ώστε τα ρεύματα να είναι ρεύματα γραμμής και οι τάσεις φασικές. Με τον τρόπο αυτό παράγεται ένα ισοδύναμο κύκλωμα της μίας φάσης. Τα ρεύματα και οι τάσεις των άλλων φάσεων μπορούν να βρεθούν με κατάλληλη μετακίνηση της φάσης ($\pm 120^\circ$ σε περίπτωση 3Φ μηχανής).

Πρώτα θεωρείται ο στάτης. Το κύμα ροής του διακένου που στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα παράγει συμμετρικές πολυφασικές αντι-ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις στις φάσεις του στάτη. Η τάση ακροδεκτών του στάτη διαφέρει από την αντι-HEΔ κατά την πτώση τάσης στην σύνθετη αντίσταση σκεδάσεως του στάτη $Z_1=R_1+jX_1$. Η διανυσματική σχέση ανά φάση είναι:

$$\hat{V}_1 = \hat{E}_2 + \hat{I}_1(R_1 + jX_1) \quad (1.5)$$

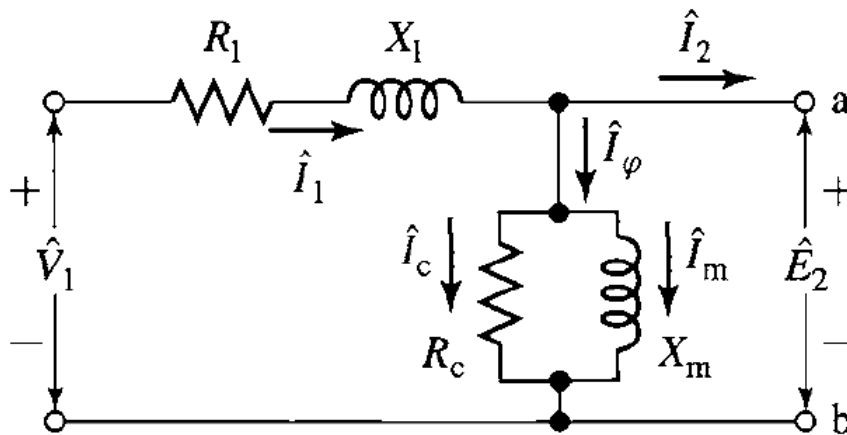
όπου

\hat{V}_1 η τάση ακροδεκτών του στάτη

\hat{E}_2 η αντι-HEΔ που αναπτύσσεται από τη συνιστάμενη ροή διακένου

- \hat{I}_1 το ρεύμα του στάτη
- R_1 η πραγματική αντίσταση του στάτη
- X_1 η αντίδραση σκεδάσεως του στάτη

Οι θετικές φορές των ρευμάτων και των τάσεων σημειώνονται στο ισοδύναμο κύκλωμα του **Σχήματος 1.10**.



Σχήμα 1.10 Ισοδύναμο κύκλωμα στάτη επαγωγικού κινητήρα

Η συνισταμένη ροή διακένου δημιουργείται από τις συνδυασμένες ΗΕΔ των ρευμάτων του στάτη και δρομέα. Ακριβώς όπως στο ανάλογο του μετασχηματιστή, το ρεύμα μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες, μία συνιστώσα φορτίου και μία διεγέρσεως. Η συνιστώσα φορτίου \hat{I}_2 παράγει ΜΕΔ η οποία αντιτίθεται ακριβώς στην ΗΕΔ του ρεύματος του δρομέα. Η συνιστώσα διεγέρσεως \hat{I}_ϕ είναι το πρόσθετο ρεύμα του στάτη, το οποίο απαιτείται για τη δημιουργία της συνισταμένης ροής διακένου και είναι συνάρτηση της ΗΕΔ \hat{E}_1 . Το ρεύμα διεγέρσεως μπορεί να αναλυθεί σε μια συνιστώσα απωλειών πυρήνα \hat{I}_π σε φάση με την \hat{E}_1 και μια συνιστώσα μαγνήτισης \hat{I}_m έπειτα της \hat{E}_1 κατά 90° . Στο ισοδύναμο κύκλωμα το ρεύμα διεγέρσεως μπορεί να περιληφθεί μέσω ενός παράλληλου κλάδου, που σχηματίζεται από την αγωγιμότητα g_π των απωλειών πυρήνα και από μια μαγνητιζουσα αγωγιμότητα b_m παράλληλα με την τάση \hat{E}_1 (**Σχήμα 1.10**). Τόσο το g_π όσο και το b_m συνήθως καθορίζονται στην ονομαστική συχνότητα του στάτη και για μια τιμή του E_1 πλησίον της αναμενόμενης τιμής λειτουργίας. Γίνεται η παραδοχή ότι και τα δύο παραμένουν σταθερά για τις μικρές αποκλίσεις από την τιμή αυτή η οποία σχετίζεται με την κανονική λειτουργία του κινητήρα.

Το ισοδύναμο κύκλωμα που περιγράφει τα φαινόμενα στο στάτη, ως τώρα, είναι πανομοιότυπο με αυτό του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή. Για την ολοκλήρωση του ισοδύναμου πρέπει να ενσωματωθεί και η επίδραση του δρομέα. Τα βασικά φαινόμενα είναι όμοια είτε ο δρομέας είναι βραχυκυκλωμένου κλωβού, είτε δακτυλιοφόρος. Από την πλευρά του ισοδύναμου κυκλώματος του στάτη του **Σχήματος 1.10**, ο δρομέας μπορεί να παρασταθεί σαν μια ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση Z_2

$$Z_2 = \frac{\hat{E}_2}{\hat{I}_2} \quad (1.6)$$

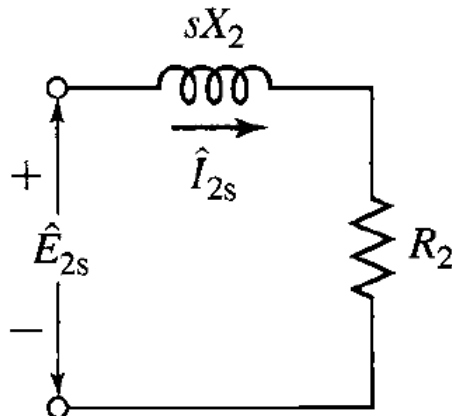
που αντιστοιχεί στη σύνθετη αντίσταση σκέδασης ενός σταθερού δευτερεύοντος. Για την ολοκλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος, πρέπει να προσδιοριστεί η Z_2 ανάγοντας τις ποσότητες στάτη και δρομέα (ρεύματα και τάσεις) σε ποσότητες του δρομέα ανηγμένες στο στάτη.

Στην ανάλυση των μετασχηματιστών, από την πλευρά του πρωτεύοντος, το δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή μπορεί να αντικατασταθεί από ένα ισοδύναμο δευτερεύον τύλιγμα που έχει τον ίδιο αριθμό ελιγμάτων με το πρωτεύον. Σε ένα μετασχηματιστή με λόγο ελιγμάτων και δευτερεύουσες παραμέτρους γνωστές, αυτό μπορεί να γίνει με αναγωγή των σύνθετων αντιστάσεων από το δευτερεύον στο πρωτεύον, πολλαπλασιάζοντας με το τετράγωνο του λόγου ελιγμάτων πρωτεύοντος προς δευτερεύον. Το συνεπαγόμενο ισοδύναμο κύκλωμα προκύπτει πλήρως ανηγμένο στην πλευρά του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή. Ομοίως, στην περίπτωση μιας πολυφασικής ασύγχρονης μηχανής, αν ο δρομέας αντικατασταθεί με έναν ισοδύναμο δρομέα με πολυφασικό τύλιγμα με τον ίδιο αριθμό φάσεων και ελιγμάτων με το στάτη αλλά παράγοντας την ίδια ΜΕΔ και ροή διακένου όπως ο πραγματικός δρομέας, η λειτουργία της μηχανής, όπως φαίνεται από τους ακροδέκτες του στάτη, θα είναι πανομοιότυπη. Αυτή η τεχνική θα εφαρμοστεί και εδώ καθώς αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμη, ειδικά για μηχανές επαγωγής δρομέα τύπου κλωβού για τις οποίες η «ταυτότητα» των τυλιγμάτων ανά φάση του δρομέα δεν είναι με καμία έννοια προφανής. Ο δρομέας μιας μηχανής επαγωγής είναι βραχυκυκλωμένος, έτσι η σύνθετη αντίδραση που εμφανίζεται λόγω της επαγόμενης από το στάτη τάσεως είναι απλά η σύνθετη αντίσταση βραχυκύκλωσης του τυλιγματος δρομέα. Συνεπώς, η σχέση μεταξύ της σύνθετης αντίστασης σκέδασης του ισοδύναμου δρομέα στη συχνότητα ολισθήσεως (Z_{2s}) και της αντίστοιχης του πραγματικού δρομέα (Z_{rotor}) θα είναι:

$$Z_{2s} = \frac{\hat{E}_{2s}}{\hat{I}_{2s}} = R_2 + jsX_2 \quad (1.7)$$

Σημειώνεται ότι η αντίδραση X_2 είναι η αντίδραση σκέδασης του δρομέα στη συχνότητα του στάτη (f_e). Καθώς η πραγματική συχνότητα των ρευμάτων του δρομέα είναι $f_r = s \cdot f_e$, η αντίδραση σκέδασης X_2 μπορεί να αναχθεί στη συχνότητα αυτή απλά πολλαπλασιαζόμενη

την με την ολίσθηση s . Το ισοδύναμο κύκλωμα, όπως φαίνεται από το πλαίσιο αναφοράς της συχνότητας ολισθήσεως των ρευμάτων του δρομέα, δίνεται στο **Σχήμα 1.11**



Σχήμα 1.11 Ισοδύναμο κύκλωμα δρομέα επαγωγικού κινητήρα στη συχνότητα ολίσθησης

Στη συνέχεια παρατηρείται ότι το κύμα ΜΕΔ διακένου παράγεται από τη συνδυασμένη δράση του ρεύματος στάτη \hat{I}_1 και του αντίστοιχου ρεύματος φορτίου \hat{I}_2 . Το ίδιο μπορεί να εκφραστεί παρομοίως σε όρους ρεύματος στάτη και αντίστοιχου ρεύματος δρομέα \hat{I}_{2s} . Αυτά τα δύο ρεύματα είναι ίσα σε πλάτος αφού το \hat{I}_{2s} ορίζεται ως το ρεύμα ενός ισοδυνάμου δρομέα με τον ίδιο αριθμό ελιγμάτων ανά φάση με το στάτη. Καθώς το συνισταμένο κύμα ΜΕΔ διακένου καθορίζεται από το ανυσματικό άθροισμα του ρεύματος στάτη και δρομέα, είτε του πραγματικού ή του ισοδυνάμου δρομέα, τα \hat{I}_2 και \hat{I}_{2s} πρέπει επίσης να είναι ίσα σε φάση (στις αντίστοιχες ηλεκτρικές τους συχνότητες) γι' αυτό θεωρείται:

$$\hat{I}_2 = \hat{I}_{2s} \quad (1.8)$$

Τέλος, το κύμα ροής του διακένου επάγει και την ΗΕΔ \hat{E}_{2s} στη συχνότητα ολισθήσεως του δρομέα και την αντιΗΕΔ \hat{E}_2 του στάτη. Αν δεν υπήρχε η επίδραση της ταχύτητας (λειτουργία με ακινητοποιημένο δρομέα) αυτές οι δύο τάσεις θα ήταν ίσες σε μέτρο καθώς ο ισοδύναμος δρομέας έχει τύλιγμα με τον ίδιο αριθμό ελιγμάτων ανά φάση όπως και ο στάτης. Ωστόσο, επειδή η σχετική ταχύτητα του κύματος ροής διακένου σε σχέση με το δρομέα είναι s φορές η ταχύτητα σε σχέση με το στάτη, η σχέση μεταξύ των πλατών των επαγόμενων ΗΕΔ – αντιΗΕΔ είναι:

$$E_{2s} = sE_2 \quad (1.9)$$

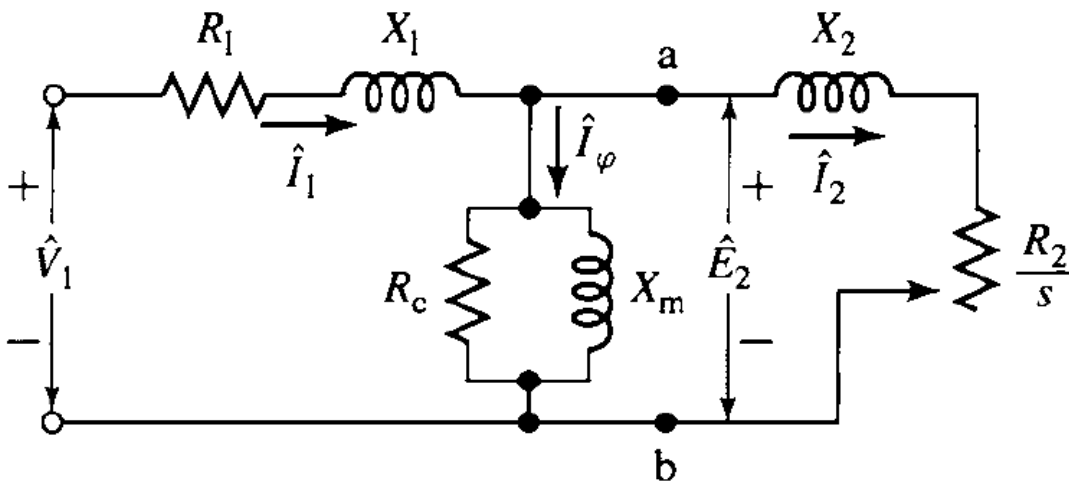
Καθώς η φάση κάθε μιας από αυτές τις τάσεις και του προκύπτοντος κύματος ροής διακένου είναι 90° , αυτές οι δύο τάσεις πρέπει επίσης να έχουν ίσους φασιθέτες στις αντίστοιχες ηλεκτρικές τους συχνότητες. Έτσι:

$$\hat{E}_{2s} = s\hat{E}_2 \quad (1.10)$$

Εύκολα προκύπτει ότι:

$$Z_2 = \frac{\hat{E}_2}{\hat{I}_2} = \frac{R_2}{s} + jX_2 \quad (1.11)$$

Έτσι ολοκληρώνεται η κατασκευή του ανά φάση ισοδύναμου κυκλώματος της μηχανής επαγωγής. Η Z_2 είναι η σύνθετη αντίσταση του ισοδύναμου ακίνητου δρομέα όπως αυτή φαίνεται από τους ακροδέκτες του φορτίου στο ισοδύναμο κύκλωμα του στάτη. Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στο ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα του **Σχήματος 1.12**.



Σχήμα 1.12 Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα

Η συνδυασμένη δράση του φορτίου στον άξονα της μηχανής και της αντιστάσεως του δρομέα φαίνεται στην ανηγμένη αντίσταση R_2/s , που είναι συνάρτηση της ολίσθησης άρα και του μηχανικού φορτίου. Το ρεύμα στην ανηγμένη σύνθετη αντίσταση του δρομέα ισούται με το κομμάτι του ρεύματος του στάτη που αντιστοιχεί στο ρεύμα φορτίου. Η τάση κατά μήκος της ισούται με την τάση \hat{E}_2 του κυκλώματος στάτη. Σημειώνεται ότι όταν τα ρεύματα και οι τάσεις του δρομέα ανάγονται στο στάτη, οι συχνότητες τους επίσης αλλάζουν στη συχνότητα του στάτη. Όλα τα ηλεκτρικά φαινόμενα στο δρομέα, όταν παρατηρούνται από παρατηρητή σταθερά τοποθετημένο στο στάτη της μηχανής γίνονται φαινόμενα με συχνότητα αυτή του στάτη, γιατί απλούστατα τα τυλίγματα του στάτη βλέπουν τα κύματα ΜΕΔ και ροής να ταξιδεύουν με τη σύγχρονη ταχύτητα. [1],[6]

1.5 Ανάλυση ισοδυνάμου και χαρακτηριστική ροπής στροφών

1.5.1 Ανάλυση Ισοδυνάμου Κυκλώματος

Από το κύκλωμα του **Σχήματος 1.12** μπορούν να υπολογισθούν το ρεύμα, η ενεργός και η άεργος ισχύς που απορροφούνται από τον κινητήρα σε δεδομένη ολίσθηση s . Επιπλέον, μπορούν να καθορισθούν οι συνθήκες μηχανικής εξόδου.

Από απλή εποπτεία του ισοδυνάμου κυκλώματος διαπιστώνεται ότι η ισχύς που προσδίδεται στο διάκενο από τα τυλίγματα του στάτη είναι

$$P_{g1} = m_1 E_1 I_2 \cos \varphi_2 \quad (1.12)$$

Όπου m_1 ο αριθμός των φάσεων του στάτη. Η αντίστοιχη ροπή θα είναι τότε

$$T = \frac{1}{\omega_s} m_1 E_1 I_2 \cos \varphi_2 = \frac{P_s}{4\pi f} m_1 E_1 I_2 \cos \varphi_2 \quad N \cdot m \quad (1.13)$$

Όπου ω_s είναι η σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα σε μηχανικά ακτίνια ανά δευτερόλεπτο και P_s ο αριθμός των πόλων του στάτη. Η ροπή αυτή ονομάζεται εσωτερική μαγνητική ροπή του κινητήρα. Συνεπώς:

$$T = \frac{1}{\omega_s} P_{g1} \quad (1.4)$$

Εξ' άλλου το ισοδύναμο κύκλωμα δείχνει ότι P_{g1} ισούται με την ισχύ που απορροφάται από την ανακλώμενη αντίσταση δρομέα r_2/s για όλες τις φάσεις. Έτσι:

$$P_{g1} = m_1 I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (1.15)$$

$$T = \frac{1}{\omega_s} m_1 I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (1.16)$$

Η μηχανική ισχύς ισούται με τη ροπή επί τη γωνιακή ταχύτητα. Η εσωτερική μηχανική ισχύς P η αναπτυσσόμενη από τον κινητήρα είναι τότε:

$$P = (1-s) \omega_s T = (1-s) P_{g1} \quad (1.17)$$

αφού η μηχανική γωνιακή ταχύτητα του δρομέα σε ολίσθηση s είναι $(1-s)\omega_s$, rad/sec. Δηλαδή το κλάσμα $(1-s)$ της ισχύος που απορροφάται από το στάτη μετασχηματίζεται σε μηχανική ισχύ. Το υπόλοιπο, δηλαδή το κλάσμα s της ισχύος του στάτη, μεταφέρεται με δράση μετασχηματιστή στα ηλεκτρικά κυκλώματα του δρομέα. Η ηλεκτρική ισχύς P_{g2} που αναπτύσσεται στο δρομέα στην συχνότητα ολίσθησεως είναι γι' αυτό:

$$P_{g2} = sP_{g1} \quad (1.18)$$

Η μηχανή επαγωγής είναι έτσι ένας γενικευμένος ηλεκτρομηχανικός μετασχηματιστής που απορροφά ηλεκτρική ισχύ στα πρωτεύοντα τυλίγματα, μετατρέπει το κλάσμα $(1-s)$ της ισχύος αυτής σε μηχανική ισχύ και μετασχηματίζει το κλάσμα s σε ηλεκτρική ισχύ στα δευτερεύοντα τυλίγματα του με μια αντίστοιχη μεταβολή στη συχνότητα του. Στον κινητήρα επαγωγής με βραχυκυκλωμένα τυλίγματα δρομέα, η ισχύς P_{g2} καταναλίσκεται ως απώλεια χαλκού στο δρομέα για όλες τις φάσεις.

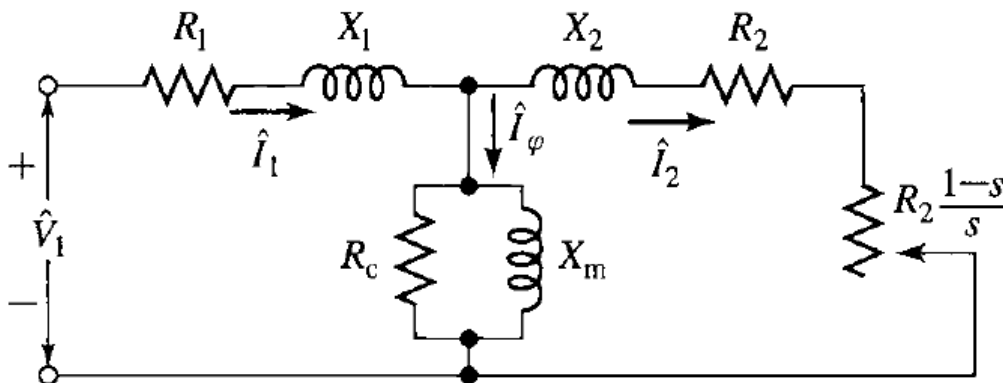
$$\text{απώλειες χαλκού δρομέα} = sP_{g1} = s\omega_s T \quad (1.19)$$

Επομένως, μια μηχανή επαγωγής που λειτουργεί υπό υψηλή ολίσθηση είναι εγγενώς ένα μη αποδοτικό μέσο παραγωγής ροπής.

Με αντικατάσταση των παραπάνω εξισώσεων δίδεται για την εσωτερική μηχανική ισχύ:

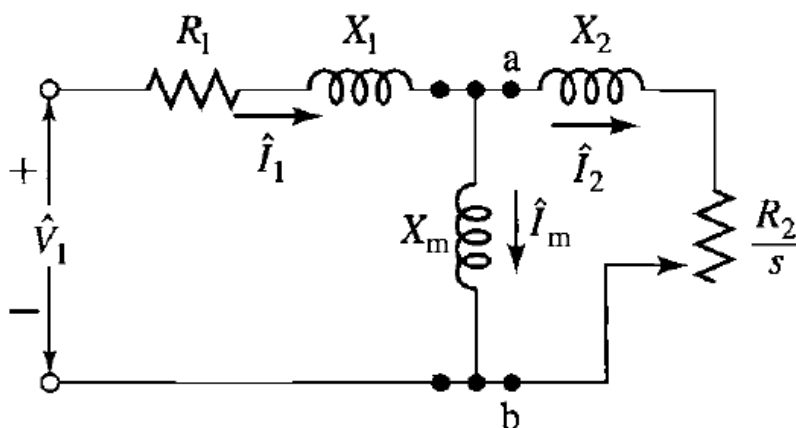
$$P = m_1 I_2^2 R_2 \frac{1-s}{s} \quad (1.20)$$

Όταν πρέπει να θεωρηθούν απόψεις ισχύος, το ισοδύναμο κύκλωμα σχεδιάζεται συχνά όπως στο **Σχήμα 1.13**. Η εσωτερική μηχανική ισχύς ανά φάση στάτη ισούται με την ισχύ που απορροφάται από την αντίσταση $R_2=(1-s)/s$.



Σχήμα 1.13 Εναλλακτική απεικόνιση ισοδύναμου κυκλώματος επαγωγικού κινητήρα

Η ροπή T και η ισχύς P δεν είναι τιμές εξόδου που διατίθενται στον άξονα, διότι η τριβή, ο ανεμισμός και οι διαφεύγουσες απώλειες φορτίου απομένουν να ληφθούν υπόψη. Είναι φανερό ότι οι τριβές και ο ανεμισμός πρέπει να αφαιρεθούν από την εσωτερική ροπή T και την εσωτερική ισχύ P και γίνεται η παραδοχή ότι οι επιδράσεις του φορτίου μπορούν να αφαιρεθούν κατά αυτό τον τρόπο. Το τελικό υπόλοιπο είναι διαθέσιμο σε μηχανική μορφή στον άξονα ως χρήσιμο έργο.



Σχήμα 1.14 Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα

Μια απλούστευση του ισοδυνάμου κυκλώματος της μηχανής προκύπτει αν η παράλληλη αντίσταση g παραληφθεί και η αντίστοιχη επίδραση απώλειας πυρήνα αφαιρεθεί από την T ή P συγχρόνως με την αφαίρεση της τριβής, ανεμισμού και διαφευγουσών απωλειών φορτίου. Το ισοδύναμο κύκλωμα τότε γίνεται όπως στο **Σχήμα 1.14** και το σχετικό σφάλμα είναι αμελητέο. Μια τέτοια μέθοδος έχει ένα πλεονέκτημα κατά την δοκιμή του κινητήρα, διότι η απώλεια πυρήνα κενού φορτίου δεν χρειάζεται να χωρισθεί τότε από την τριβή και τον ανεμισμό. [1], [6]

Τέλος, το ρεύμα του στάτη, \hat{I}_1 , υπολογίζεται εύκολα από το ισοδύναμο κύκλωμα:

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{V}_1}{R_1 + jX_1 + \left(jX_m \parallel \left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right) \right)} \quad (1.21)$$

1.5.2 Χαρακτηριστική ροπής – στροφών

Για τον καθορισμό της ροπής και της ισχύος της μηχανής επαγωγής με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα χρησιμοποιείται το θεώρημα του Thevenin για την απλοποίηση του ισοδυνάμου κυκλώματος. Με την ανάλυση αυτή η τάση του στάτη \hat{V}_1 στο κύκλωμα του **Σχήματος 1.14**

αντικαθίσταται με την ισοδύναμη τάση \hat{V}_{th} η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$\hat{V}_{th} = \hat{V}_1 \frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \quad (1.22)$$

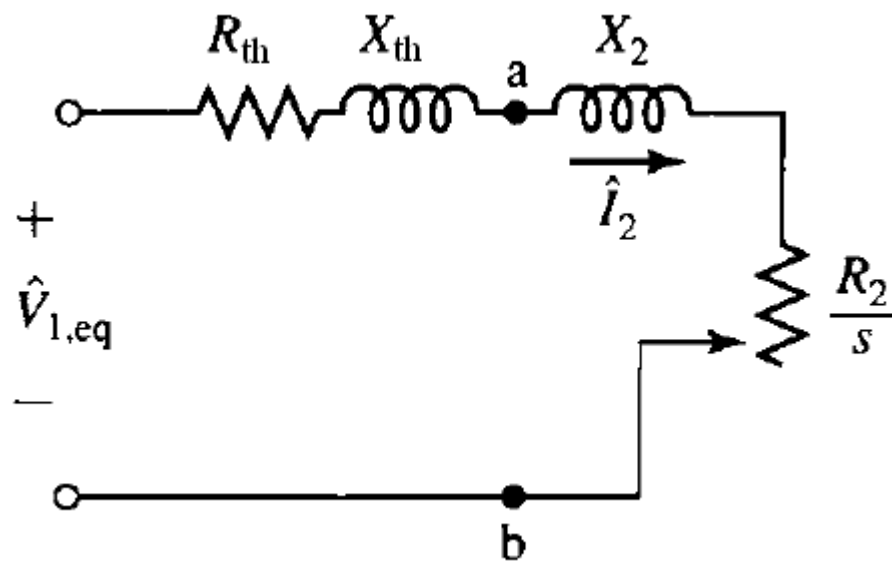
Οι σύνθετες αντιστάσεις αντικαθίστανται με τις ισοδύναμες αντιστάσεις

$$Z_{th} = (R_1 + jX_1) // jX_m \quad (1.23)$$

$$Z_{th} = \frac{(R_1 + jX_1) jX_m}{(R_1 + jX_1 + jX_m)} \quad (1.24)$$

$$Z_{th} = R_{th} + jX_{th} \quad (1.25)$$

Έτσι προκύπτει το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του **Σχήματος 1.15**:



Σχήμα 1.15 Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα, απλοποιημένο με το θεώρημα του Thevenin

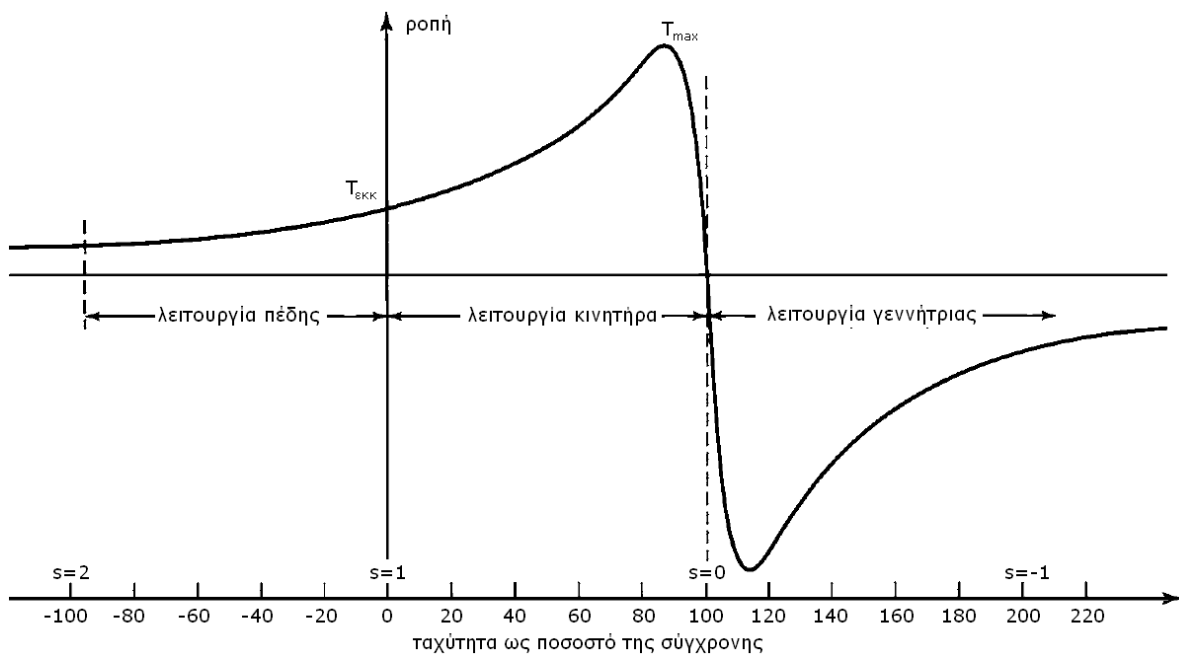
Από το κύκλωμα του **Σχήματος 1.15** μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί το ρεύμα \hat{I}_2 το οποίο όταν αντικατασταθεί στην εξίσωση ροπής δίνει την έκφραση της ροπής μέσω του ισοδυνάμου κυκλώματος.

$$\hat{I}_2 = \frac{\hat{V}_{th}}{Z_{th} + Z_2} = \frac{\hat{V}_{th}}{\left(R_{th} + \frac{R_2}{s}\right) + j(X_{th} + X_2)}$$

$$\text{και } I_2^2 = \frac{V_{th}^2}{\left(R_{th} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{th} + X_2)^2}$$

$$\Rightarrow T_{em} = \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_{th}^2 \frac{R_2}{s}}{\left(R_{th} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{th} + X_2)^2} \quad (1.26)$$

Από την παραπάνω εξίσωση μπορεί να χαραχθεί η καμπύλη ροπής - ολισθήσεως που φαίνεται στο **Σχήμα 1.16**.



Σχήμα 1.16 Καμπύλη ροπής στροφών / ολισθήσεως μηχανής επαγωγής

Στο **Σχήμα 1.16** διακρίνονται οι τρεις περιοχές λειτουργίας της επαγωγικής μηχανής. Ανάλογα με την ολίσθηση η μηχανή συμπεριφέρεται ως κινητήρας ($1 > s > 0$), ως γεννήτρια ($s < 0$) ή βρίσκεται σε κατάσταση πέδης ($s > 1$).

Η μηχανή εισέρχεται στην περιοχή πέδης όταν κατά την διάρκεια λειτουργίας της ως κινητήρας γίνει αντιστροφή φάσεων στα τυλίγματα τροφοδοσίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την άμεση αναστροφή του μαγνητικού πεδίου και την ανάπτυξη μιας αρνητικής ροπής

(ηλεκτρομαγνητική) η οποία αντιτίθεται στην ήδη υπάρχουσα ροπή (μηχανική) του δρομέα πράγμα που οδηγεί στην πέδηση της μηχανής. Αν μόλις εξισωθούν οι δύο ροπές αποσυνδεθεί η τροφοδοσία τότε γίνεται αποτελεσματική πέδηση του κινητήρα.

Η μηχανή συμπεριφέρεται ως κινητήρας όταν $1 > s > 0$. Όταν η ολίσθηση είναι 0 δηλαδή ο κινητήρας είναι στη σύγχρονη ταχύτητα τότε δεν αναπτύσσεται ηλεκτρομαγνητική ροπή. Καθώς η ολίσθηση αυξάνει ενώ η ταχύτητα μειώνεται η ηλεκτρομαγνητική ροπή αυξάνεται μέχρι τη μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής. Σε αυτή την περιοχή λειτουργίας η πτώση τάσεως στο στάτη είναι χαμηλή και η ροή διακένου παραμένει περίπου σταθερή. Πέραν της ροπής ανατροπής η ηλεκτρομαγνητική ροπή μειώνεται με την αύξηση της ολίσθησεως και για $s=1$ βρίσκεται η ροπή εκκινήσεως. Αντικατάσταση του s στην εξίσωση της ροπής δίνει τη ροπή εκκίνησης.

$$T_{εκκ} = \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_{th}^2 R_2}{(R_{th} + r_2)^2 + (X_{th} + x_2)^2} \quad (1.27)$$

Η μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής προκύπτει αν από την εξίσωση της ροπής παρατηρηθεί ότι η ροπή γίνεται μέγιστη όταν η προσδιδόμενη στην αντίσταση R_2/s ισχύς γίνει μέγιστη. Η ισχύς αυτή γίνεται μέγιστη όταν η σύνθετη αντίσταση R_2/s ισούται με το μέτρο της σύνθετης αντίστασης μεταξύ αυτής και της σταθερής τάσης V_1 δηλαδή:

$$\frac{R_2}{s_{\max T}} = \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2} \quad (1.28)$$

Η ολίσθηση τότε στη μέγιστη ροπή είναι:

$$s_{\max T} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \quad (1.29)$$

Οπότε η μέγιστη ροπή γίνεται:

$$T_{\max} = \frac{3}{2} \frac{1}{\omega_s} \frac{V_{th}^2}{R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2)^2}} \quad (1.30)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι η ολίσθηση είναι ευθέως ανάλογη προς την αντίσταση του δρομέα R_2 . Όταν η αντίσταση του δρομέα αυξηθεί με την προσθήκη μιας

παράλληλης εξωτερικής αντίστασης (όταν η μηχανή είναι τυλιγμένου δρομέα) η μέγιστη εσωτερική ροπή είναι ανεπηρέαστη αλλά η ταχύτητα στην οποία λαμβάνεται μπορεί να ελεγχθεί.

Η τρίτη περιοχή λειτουργίας είναι η περιοχή λειτουργίας της μηχανής ως γεννήτριας. Η συμπεριφορά αυτή λαμβάνει χώρα όταν η ολίσθηση γίνει αρνητική δηλαδή ο δρομέας περιστρέφεται σε συχνότητα μεγαλύτερη της συχνότητας του δικτύου τροφοδοσίας του στάτη. Έτσι υπάρχει ροή ισχύος από το μηχανικό μέρος στο δίκτυο του στάτη. [1], [6], [10]

1.6 Κατάταξη Κινητήρων Επαγωγής

Λόγω της ποικιλίας των εφαρμογών και των διαφορετικών λειτουργικών χαρακτηριστικών των κινητήρων επαγωγής η NEMA (National Electrical Manufacturer Association) των ΗΠΑ προχώρησε στην κατάταξη των κινητήρων επαγωγής σε κατηγορίες ανάλογα με την χαρακτηριστική ροπής – στροφών του κάθε κινητήρα. Οι κατηγορίες αυτές ονομάζονται κλάσεις κινητήρων και παρουσιάζονται πιο κάτω.

Κατασκευαστική Κλάση A:

Οι κινητήρες κλάσης A είναι κινητήρες με τυποποιημένη σχεδίαση που παρουσιάζουν κανονική ροπή εκκίνησης, κανονικό ρεύμα εκκίνησης και χαμηλή ολίσθηση. Η ολίσθηση στη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο θα πρέπει να είναι μικρότερη από 5% και μικρότερη από αυτή ενός κινητήρα κλάσης B αντιστοιχών προδιαγραφών. Η ροπή ανατροπής είναι ίση με 200% - 300% της ροπής κατά την πλήρη φόρτιση. Η ροπή εκκίνησης είναι τουλάχιστον ίση με την ονομαστική ροπή στους μεγάλους κινητήρες και ίση ή μεγαλύτερη από το 200% της ονομαστικής ροπής στους μικρούς κινητήρες. Το σημαντικότερο πρόβλημα αυτής της κλάσης σχεδίασης είναι το ιδιαίτερα υψηλό κρουστικό ρεύμα κατά την εκκίνηση. Τα τυπικά ρεύματα εκκίνησης για τέτοιους κινητήρες είναι 500% - 800% του ονομαστικού ρεύματος. Στους κινητήρες τέτοιου είδους με μέγεθος πάνω από 7.5 hp θα πρέπει να χρησιμοποιείται κάποια μέθοδος μείωσης της τάσης κατά την εκκίνηση, με σκοπό να προστατεύεται το σύστημα ισχύος, στο οποίο συνδέονται, από μεγάλες πτώσεις τάσης. Στο παρελθόν οι κινητήρες κλάσης A αποτελούσαν καθιερωμένη σχεδίαση για εφαρμογές κάτω από τους 7.5 hp και πάνω από τους 200 hp. Όμως, στις μέρες μας έχουν αντικατασταθεί από τους κινητήρες κλάσης B. Τυπικές εφαρμογές αυτών των κινητήρων είναι η οδήγηση ανεμιστήρων, φυσερών, αντλιών, τόνων και άλλων εργαλειομηχανών.

Κατασκευαστική Κλάση B:

Οι κινητήρες κλάσεως B είναι κινητήρες με κανονική ροπή εκκινήσεως, χαμηλό ρεύμα εκκινήσεως και χαμηλή ολίσθηση. Έχουν την ίδια περίπου ροπή εκκινήσεως με τις μηχανές κλάσης A και 75% του ρεύματος εκκινήσεως αυτών. Έτσι εκκίνηση με άμεση τροφοδότηση από το δίκτυο μπορεί να εφαρμοστεί για μηχανές μεγαλύτερης ισχύος σε σχέση με την κλάση A. Το ρεύμα εκκινήσεως μειώνεται με κατάλληλο σχεδιασμό που αυξάνει την αντίδραση σκέδασης, ενώ η ροπή εκκινήσεως διατηρείται με χρήση δρομέα διπλού κλωβού ή βαθέων αυλάκων. Η ολίσθηση και η απόδοση πλήρους φορτίου είναι καλές, παρόμοιες με αυτές της κλάσης A. Ωστόσο, η μεγαλύτερη αντίδραση μειώνει ελαφρά το συντελεστή ισχύος και μοιραία μειώνει τη μέγιστη ροπή (συνήθως μόνο λίγο πάνω από το 200% της ροπής πλήρους φορτίου είναι εφικτή). Αυτός ο σχεδιασμός είναι ο πλέον κοινός για μηχανές 7,5 - 200 hp. Χρησιμοποιείται κυρίως για συστήματα σταθερής ταχύτητας όπου οι απαιτήσεις για ροπή εκκινήσεως είναι δευτερεύουσες όπως σε ανεμιστήρες, φυσητήρες, αντλίες και εργαλειομηχανές.

Κατασκευαστική κλάση C:

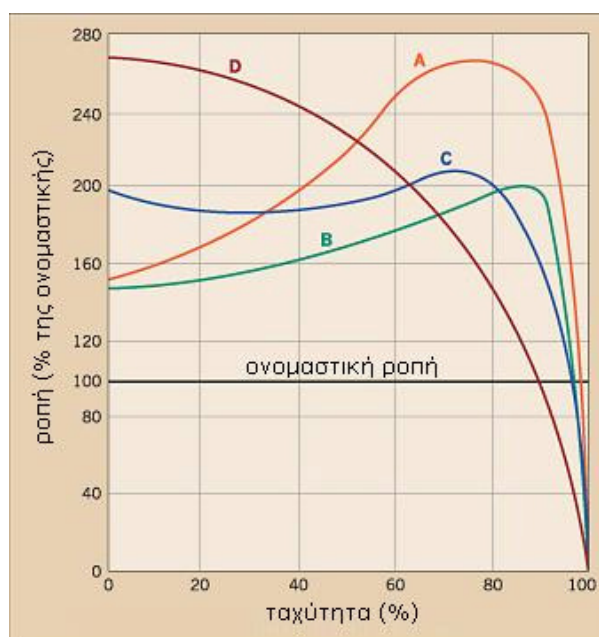
Οι κινητήρες κλάσεως C είναι κινητήρες με υψηλή ροπή εκκινήσεως, χαμηλό ρεύμα εκκινήσεως. Αυτός ο σχεδιασμός χρησιμοποιεί δρομέα διπλού κλωβού με αντίσταση μεγαλύτερη από αυτή των κινητήρων της κλάσης B. Το αποτέλεσμα είναι υψηλότερη ροπή εκκινήσεως με χαμηλότερα ρεύματα εκκινήσεως αλλά κατά το μάλλον ή ήττον χαμηλότερη απόδοση και υψηλότερη ολίσθηση σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας απ' ότι στις κλάσεις A και B. Τυπικές εφαρμογές είναι οι συμπιεστές και οι ταινιόδρομοι.

Κατασκευαστική κλάση D:

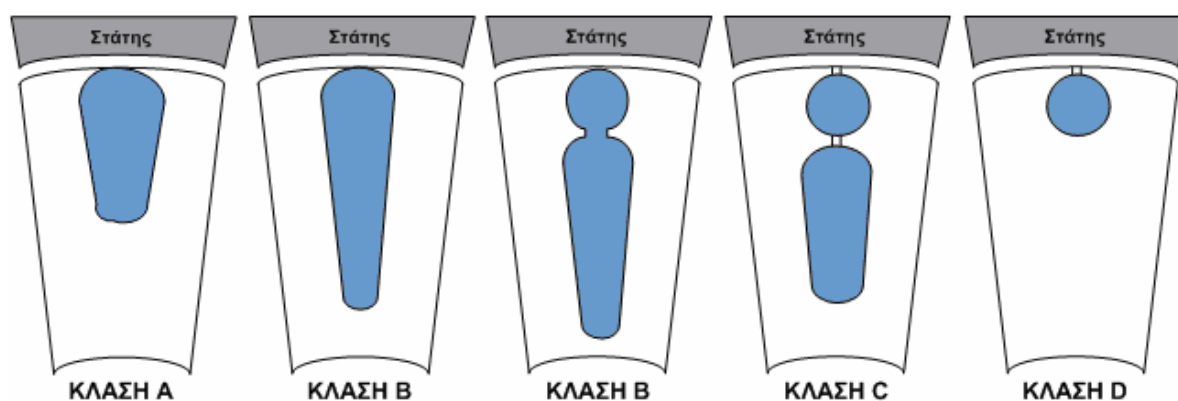
Οι κινητήρες της κλάσεως D διαθέτουν μεγάλη αντίσταση δρομέα, οπότε η ροπή ανατροπής εμφανίζεται σε κάποιο σημείο με μεγάλη ολίσθηση, ενώ η ροπή εκκίνησής τους είναι αρκετά υψηλή (πάνω από το 275% της ονομαστικής ροπής). Παρουσιάζουν μικρό ρεύμα εκκίνησης, αλλά επίσης υψηλή ολίσθηση στη λειτουργία υπό πλήρες φορτίο. Ουσιαστικά πρόκειται για απλούς κινητήρες κλάσης A, που διαθέτουν όμως μπάρες μικρότερης διατομής. Η μεγάλη αντίσταση στο δρομέα μετακινεί τη μέγιστη ροπή σε μια πολύ μικρή ταχύτητα. Είναι επίσης δυνατή η μετακίνηση της μέγιστης ροπής στη μηδενική ταχύτητα (ολίσθηση 100%). Η ολίσθηση αυτών των κινητήρων στην πλήρη φόρτιση είναι αρκετά υψηλή λόγω της μεγάλης αντίστασης δρομέα που διαθέτουν. Η τυπική τιμή της ολίσθησης είναι 7% - 11%, αλλά μπορεί να φθάσει στο 17% ή και πιο πάνω. Αυτού του είδους οι κινητήρες έχουν εφαρμογή στην επιτάχυνση φορτίων με μεγάλη αδράνεια, όπως οι ιδιαίτερα μεγάλοι σφόνδυλοι που χρησιμοποιούνται σε διατρητικές πρέσες ή ψαλίδια. Σε

τέτοιες εφαρμογές ο κινητήρας αρχικά επιταχύνει βαθμιαία το σφόνδυλο ως τη μέγιστη ταχύτητά του, όπου ο σφόνδυλος αναλαμβάνει την οδήγηση της διατρητικής μηχανής. Μετά τη λειτουργία της διάτρησης, ο κινητήρας επιταχύνει ξανά το σφόνδυλο για σχετικά μεγάλο διάστημα μέχρι την επόμενη ενέργειά του.

Στο **Σχήμα 1.17** παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ροπής - στροφών των πιο πάνω κλάσεων κινητήρων, στο **Σχήμα 1.18** φαίνονται οι διαφοροποιήσεις στον κλωβό του δρομέα για την επίτευξη των χαρακτηριστικών κάθε κλάσης καθώς στον **Πίνακα 1.2** φαίνονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά κάθε κλάσης. [16]



Σχήμα 1.17 Χαρακτηριστικές ροπής ταχύτητας κινητήρων κλάσης A,B,C και D κατά NEMA



Σχήμα 1.18 Τύποι αυλάκων δρομέα κλωβού ανά κατασκευαστική κλάση

Κλάση	Ροπή εκκίνησης	Ρεύμα εκκίνησης	Ολίσθηση	Χρήσεις
A	κανονική	κανονική	κανονική	ανεμιστήρες, αντλίες (φορτία μικρής αδράνειας που ξεκινάνε και σταματάνε συχνά)
B	κανονική	χαμηλή	κανονική	μεγάλοι ανεμιστήρες και αντλίες (φορτία με σημαντική αδράνεια)
C	υψηλή	χαμηλή	κανονική	συμπιεστές, ιμάντες μεταφοράς
D	υψηλή	χαμηλή	υψηλή	πρέσες, μηχανικές διατρήσεις (εφαρμογές υψηλής αδράνειας)

Πίνακας 1.2 Χαρακτηριστικά κινητήρων ανά κατασκευαστική κλάση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Προκαταρκτική σχεδίαση της μηχανής

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η παρουσίαση των προδιαγραφών/απαιτήσεων για την κατασκευή του ηλεκτρικού κινητήρα και η διεξαγωγή της προκαταρκτικής σχεδίασης. Η προκαταρκτική σχεδίαση ξεκινά από τις προδιαγραφές του κινητήρα και καταλήγει σε μια πρώτη γεωμετρική διαμόρφωση. Ακόμη επιλέγονται τα υλικά κατασκευής και η κατασκευαστική κλάση (NEMA) του κινητήρα. Μετά το πέρας της προκαταρκτικής σχεδίασης, υπάρχει μια ικανοποιητική γεωμετρία έτοιμη να υποβληθεί σε διαδικασία βελτιστοποίησης.

2.1 Προδιαγραφές ηλεκτρικού κινητήρα

Η σχεδίαση του ηλεκτρικού κινητήρα γίνεται έτσι ώστε να ικανοποιούνται κάποιες προδιαγραφές. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή αυτές έχουν να κάνουν με τη ροπή, την ταχύτητα, την τάση τροφοδοσίας και τη διάμετρο διακένου του κινητήρα. Οι προδιαγραφές αυτές φαίνονται συγκεντρωτικά στον **Πίνακα 2.1**.

Ονομαστική ροπή (T_n)	1.2Nm
Μέγιστη ροπή (T_{max})	6Nm
Μέγιστη ταχύτητα (n_{max})	6000rpm
Διάμετρος διακένου (D)	10cm
Διαθέσιμη DC πηγή	270V

Πίνακας 2.1 Προδιαγραφές κατασκευής

Ακόμη, υπάρχει η απαίτηση στη μέγιστη ταχύτητα να αποδίδεται και η μέγιστη ροπή. Άρα, τη στιγμή αυτή θα αποδίδει η μηχανή τη μέγιστη μηχανική ισχύ της P_{max} . Η τιμή της είναι:

$$P_{max} = T_{max} \cdot 2\pi \cdot n_{max} / 60 = 3770W \quad (2.1)$$

Με δεδομένο ότι η μέγιστη ροπή είναι αρκετά μεγαλύτερη από την ονομαστική αποφασίζεται η σχεδίαση του κινητήρα να γίνει στις συνθήκες μέγιστης φόρτισης, δηλαδή για ροπή $T_{max}=6Nm$. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι δεν θα υπερφορτώνεται κατά την απόδοση της μέγιστης ροπής και θα λειτουργεί πολύ οικονομικά στην ονομαστική. Τη στιγμή που ο κινητήρας αποδίδει τη μέγιστη ροπή (6Nm) στη μέγιστη ταχύτητα (6000rpm) αναμένεται να υφίσταται τη μέγιστη φόρτίσή του. Έτσι ο κινητήρας θα εμφανίζει σημαντικές απώλειες που οφείλονται στην υψηλή συχνότητα περιστροφής και στη συνακόλουθη υψηλή συχνότητα ρευμάτων. Συγκεκριμένα, οι απώλειες που σχετίζονται με την υψηλή συχνότητα περιστροφής είναι οι απώλειες τριβών και ανεμισμού και με την υψηλή συχνότητα ρευμάτων οι απώλειες πυρήνα (υστέρησης και δινορρευμάτων). Επομένως, αυτή η απόφαση κρίνεται απαραίτητη διότι πρέπει να καταβληθεί κάθε προσπάθεια για τον περιορισμό των απωλειών.

Πρόκειται να σχεδιαστεί δηλαδή ένας κινητήρας που στην καμπύλη ροπής στροφών θα παρουσιάζει τη μέγιστη ζητούμενη ροπή (6Nm) στη θέση κανονικής λειτουργίας (δηλαδή σε πολύ μικρή ολίσθηση). Επιπλέον η μέγιστη ροπή και η ροπή εκκίνησης που θα φαίνεται να αποδίδει θα είναι πολύ μεγαλύτερες αλλά πλασματικές μιας και ο κινητήρας δεν θα

λειτουργήσει ποτέ σε αυτή τη θέση, διότι η υπερφόρτιση της μηχανής δεν θα είναι αποδεκτή.

Για τη σχεδίαση του κινητήρα δεν υπάρχει κάποια απαίτηση για τη ροπή εκκίνησης. Οπότε θεωρούνται τυπικές απαιτήσεις και ο κινητήρας σχεδιάζεται ως κινητήρας κλάσης A ή B (NEMA). Επιπλέον, θα επιλεγούν σχετικά βαθιές αύλακες δρομέα για των περιορισμό των απωλειών.

Ακόμη, το γεγονός ότι ως προδιαγραφή δίνεται και η διάμετρος του διακένου, ενδεχομένως να οδηγήσει σε παρέκκλιση από τους παραδοσιακούς τρόπους σχεδίασης που απαιτούν συγκεκριμένη αναλογία διαμέτρου διακένου (D) / ενεργού μήκους μηχανής (L).

Τέλος, επειδή η ταχύτητα που ζητείται θα επιτευχθεί με χρήση τροφοδοσίας υψηλής συχνότητας, δημιουργούνται ειδικές απαιτήσεις από τα υλικά κατασκευής.

2.2 Προκαταρκτική σχεδίαση

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [5] η ισχύς μιας οποιασδήποτε ηλεκτρικής μηχανής εξαρτάται από τους ίδιους παράγοντες:

1. την ειδική μαγνητική φόρτιση \bar{B} , δηλαδή τη μέση πυκνότητα ροής διακένου:

$$\bar{B} = \frac{p\Phi}{\pi DL} \quad (2.2),$$

όπου p το πλήθος των πόλων της μηχανής και Φ μαγνητική ροή ανά πόλο

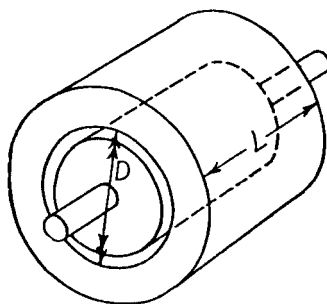
2. την ειδική ηλεκτρική φόρτιση ac , δηλαδή το πλήθος αμπερελιγμάτων ανά μέτρο της περιφέρειας του οπλισμού:

$$ac = \frac{ZJ}{\pi D} \quad (2.3),$$

όπου Z το πλήθος των ενεργών αγωγών στον οπλισμό και J το ρεύμα του κάθε αγωγού

3. την ποσότητα D^2L , που είναι ανάλογη με τον όγκο που περικλείεται από την επιφάνεια του διακένου, όπου D η διάμετρος διακένου και L το ενεργό μήκος της μηχανής (**Σχήμα 2.1**)

4. την ταχύτητα του δρομέα $n_{[rps]}$ (στροφές ανά δευτερόλεπτο).



Σχήμα 2.1 Βασικές διαστάσεις μηχανής

Συγκεκριμένα για μια μηχανή επαγωγής η ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$S = 11 \cdot k_w \cdot \bar{B} \cdot ac \cdot D^2 L \cdot n_{[rps]} \quad (2.4)$$

όπου k_w ο συντελεστής τυλίγματος της μηχανής.

2.2.1 Υπολογισμός ενεργού μήκους L

Για τον υπολογισμό των δύο βασικών διαστάσεων της μηχανής, D και L, ορίζεται ο συντελεστής εξόδου ως εξής:

$$G = \frac{S}{D^2 L \cdot n_{[rps]}} = 11 \cdot k_w \cdot \bar{B} \cdot ac \quad (2.5)$$

Η σχέση αυτή συνδέει την ισχύ ανά ταχύτητα και ανά μονάδα όγκου με τις ειδικές φορτίσεις της μηχανής \bar{B} και ac .

Ο συντελεστής G αποκαλείται και ειδική ροπή, διότι, όπως φαίνεται από τη σχέση ορισμού του, είναι πρακτικά ανάλογος της ροπής ανά μονάδα όγκου.

Η ειδική μαγνητική φόρτιση \bar{B} λαμβάνει τιμές $0.5 \div 0.6T$ και περιορίζεται λόγω του κορεσμού του μαγνητικού υλικού (σιδήρου) και των απωλειών πυρήνα. Στην παρούσα εφαρμογή, λόγω των υψηλών συχνοτήτων που αναμένονται στο στάτη, κρίνεται σκόπιμο να επιλεγεί μια μικρή τιμή για τη μαγνητική φόρτιση.

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση ac κυμαίνεται σε τιμές $15000 \div 45000^{Ae}/m$ και καθορίζεται από τις απώλειες χαλκού και τον περιορισμό για την πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος στους αγωγούς ($4 A/mm^2$) που σχετίζεται με την ψύξη της μηχανής. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, επειδή η σχεδίαση γίνεται σε μία κατάσταση λειτουργίας που δεν είναι η μόνιμη, μπορούμε να ανεχτούμε μεγαλύτερες πυκνότητες ρεύματος στους αγωγούς ($6 - 7 A/mm^2$). Για το

λόγο αυτό μπορεί να επιλεγθεί για την ειδική ηλεκτρική φόρτιση μία τιμή μεγάλη, ακόμα και εκτός των συνηθισμένων ορίων που ορίζονται παραπάνω.

Με βάση τα παραπάνω επιλέγεται $\bar{B} = 0.5T$ και $ac = 45000 \text{ At/m}$. Ο συντελεστής τυλίγματος k_w θεωρείται σε πρώτη φάση ίσος με 0.95 αφού θα χρησιμοποιηθεί καταναμημένο τύλιγμα.

Επομένως προκύπτει ο συντελεστής εξόδου G ως:

$$G = 11 \cdot k_w \cdot \bar{B} \cdot ac = 235125 \quad (2.6)$$

Θεωρώντας συντελεστή απόδοσης της ηλεκτρικής ισχύος του κινητήρα σε μηχανική ισχύ $\eta_{\text{eff}} = 0.9$ και συντελεστή ισχύος $\cos\phi = 0.9$ μπορεί να προσδιοριστεί η φαινόμενη ισχύς ως εξής:

$$S = \frac{P_{\text{max}} / \eta_{\text{eff}}}{\cos\phi} \quad (2.7)$$

Επομένως αφού η διάμετρος διακένου είναι γνωστή ($D = 10\text{cm}$), η ταχύτητα περιστροφής επίσης ($n = 6000\text{rpm}$ ή $n_{[\text{rps}]} = 100\text{rps}$) και ο συντελεστής εξόδου έχει υπολογιστεί, μπορεί να προσδιορισθεί το ενεργό μήκος της μηχανής L επιλύοντας των παρακάτω σχέση:

$$G = \frac{S}{D^2 L \cdot n_{[\text{rps}]}} \quad (2.8)$$

Προκύπτει $L \cong 2\text{cm}$.

Παρατηρείται ότι προκύπτει μια μηχανή γεωμετρικά όχι συνηθισμένη. Είναι έντονα δισκοειδής αφού η διάμετρος του δρομέα είναι 5-πλάσια από το ενεργό μήκος. Αυτό αναμένεται να έχει επιπτώσεις στη λειτουργία του κινητήρα, που θα εμφανίζονται με την μορφή ωμικών απωλειών και μεγάλων σκεδάσεων στις τερματικές συνδέσεις των τυλιγμάτων του στάτη. [7], [9]

2.2.2 Τάση τροφοδοσίας και ρεύμα φάσης

Θεωρώντας τυπικό τριφασικό αντιστροφέα PWM με συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους m_a , μπορεί να παραχθεί πολική τάση τιμής

$$V_{LL_1(\text{πολική}, \text{RMS})} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a V_d \quad (2.9),$$

με $V_d=270V$.

Άρα για $m_a=1$ προκύπτει τάση τροφοδοσίας (RMS): $V_{LL}=165V$.

Επομένως η τάση στα πηνία της κάθε φάσης θα είναι αντίστοιχα για κάθε συνδεσμολογία μηχανής:

α) τρίγωνο $E=V_{LL}=165V$

β) αστέρα $E=V_{LL}/\sqrt{3}=95V$

Η μηχανή επιλέγεται να συνδεσμολογηθεί σε αστέρα.

Άρα η τάση στα άκρα κάθε φάσης είναι $E=95V$.

Η φαινόμενη ισχύς της μηχανής δίνεται από τη σχέση:

$$S = 3EI_N \quad (2.10)$$

Επίσης θεωρώντας συντελεστή ισχύος $\cos \phi = 0.9$ και συνολική απόδοση $n_{eff} = 0.9$ είναι :

$$S = \frac{P_{max} / n_{eff}}{\cos \phi} \quad (2.11)$$

Άρα το ρεύμα που διαρρέει τους αγωγούς της κάθε φάσης δίνεται από τη σχέση:

$$I_N = \frac{P_{max} / n_{eff}}{3 \cdot E \cdot \cos \phi} \quad (2.12)$$

Επομένως είναι: $I_N=16.34A$

2.2.3 Πλήθος αυλάκων, πόλοι και ελιγματα ανά φάση

Το συνολικό πλήθος αυλάκων του στάτη Q δίνεται από τη σχέση: $Q=mpq$, όπου:

m : το πλήθος των φάσεων ($m=3$),

p : το πλήθος των πόλων, και

q : το πλήθος των αυλάκων ανά πόλο και φάση.

Η μηχανή κατασκευάζεται για να λειτουργεί σε υψηλές ταχύτητες ($N_{max}=6000rpm$). Επομένως για την οδήγησή της απαιτείται αυξημένη συχνότητα τροφοδοσίας. Είναι σημαντικό λοιπόν να έχει λίγους πόλους ώστε οι συχνότητες των ρευμάτων τροφοδοσίας να παραμένουν κατά το δυνατό χαμηλές. Άρα η μηχανή θα είναι είτε 2-πολική (100Hz στο στάτη) είτε 4-πολική (200Hz το στάτη).

Για διάφορες τιμές του πλήθους των αυλάκων ανά πόλο και φάση, και 2 ή 4 πόλους προκύπτει ο **Πίνακας 2.2** με το συνολικό πλήθος αυλάκων του στάτη Q σε κάθε περίπτωση.

Πλήθος αυλάκων $Q=3p\alpha$		
	Αριθμός πόλων p	
α	$p=2$	$p=4$
1	6	12
2	12	24
3	18	36
4	24	48
5	30	60
6	36	72

Πίνακας 2.2 Πλήθος αυλάκων σε συνάρτηση με τους πόλους και τα αυλάκια ανά πόλο και φάση

Λαμβάνοντας υπόψη τις διαστάσεις της μηχανής ($D=10\text{cm}$), από κατασκευαστικής άποψης μια εφικτή και εύλογη τιμή για το συνολικό πλήθος αυλάκων του στάτη είναι $Q=36$. Αυτή η επιλογή επιτυγχάνεται με έναν από τους συνδυασμούς: 2-πολική μηχανή με 6 αυλάκια ανά πόλο και φάση ή 4-πολική μηχανή με 3 αυλάκια ανά πόλο και φάση. Μεταξύ των δύο επιλέγεται η 4-πολική μηχανή διότι τα 6 αυλάκια ανά πόλο και φάση της 2-πολικής θα προκαλέσουν σημαντική μείωση της θεμελιώδους της πυκνότητας ροής στο διάκενο.

Η επαγόμενη τάση E ως συνάρτηση της μαγνητικής ροής ανά πόλο δίνεται από τη σχέση:

$$E = 4,44k_w f N_s \Phi \quad (2.13)$$

όπου N_s τα ελίγματα ανά φάση σε σειρά και f η συχνότητα τροφοδοσίας.

Η ροή ανά πόλο δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi = \frac{\bar{B} \cdot A}{p} = \frac{\bar{B} \cdot (\pi \cdot D \cdot L)}{p} \quad (2.14)$$

Ενώ η συχνότητα τροφοδοσίας μπορεί να συσχετισθεί με το πλήθος των πόλων και την ταχύτητα περιστροφής ως εξής:

$$f = \frac{N^{[\Sigma\Lambda\Lambda]} \cdot p/2}{60} \quad (2.15)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις επιλύοντας ως προς N_s και αντικαθιστώντας τα Φ και f προκύπτει η σχέση που δίνει τα ελίγματα ανά φάση σε σειρά:

$$N_s = \frac{120 \cdot E}{4,44 \cdot k_w \cdot N^{[\Sigma AL]} \cdot \bar{B} \cdot \pi \cdot D \cdot L} \quad (2.16)$$

Το πλήθος των αγωγών ανά αύλακα είναι

$$n_s = \frac{N_s}{(p/2) \cdot q} \quad (2.17)$$

Για $p=4$ και $q=3$ προκύπτει $n_s = 23,9$. Πρέπει να είναι ακέραιος αριθμός, άρα $n_s = 24$ αγωγοί ανά αύλακα. Επομένως θα είναι $N_s=144$ ελίγματα ανά φάση συνδεδεμένα σε σειρά.

Το τύλιγμα του στάτη θα είναι βροχοειδές μίας στρώσης αφού η μηχανή έχει λίγους πόλους και στρέφεται σε υψηλές ταχύτητες. Επιπλέον θα κατανομηθεί σε μία στρώση και τρία αυλάκια ανά πόλο και φάση.

2.3 Διαστατική ανάλυση

Έχοντας προσδιορίσει το ενεργό μήκος της μηχανής, με δεδομένη τη διάμετρο διακένου D , και τα βασικά μεγέθη του κινητήρα, είναι σημαντικό να προσδιοριστούν και κάποια γεωμετρικά χαρακτηριστικά που θα χρησιμοποιηθούν για την πρώτη σχεδίασή του.

Άξονα για τον προσδιορισμό επιμέρους γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κινητήρα αποτελεί η απαίτηση για συγκεκριμένες τιμές μαγνητικής επαγωγής σε κάθε περιοχή του μαγνητικού κυκλώματος.

Ορίζονται οι παρακάτω ποσότητες και οι τυπικές τους τιμές:

$B_g = 0,4-0,75T$: η πυκνότητα ροής στο διάκενο
$B_{is} = 1,8-1,9T$: η πυκνότητα ροής στο δόντι του στάτη
$B_{cs} = 1,1-1,4T$: η πυκνότητα ροής στο σώμα του στάτη
$B_{tr} = 1,8-1,9T$: η πυκνότητα ροής στο δόντι του δρομέα

Για τη σχεδίαση επιλέγονται οι χαμηλότερες δυνατές, δηλαδή:

$$B_g = 0,5T \quad B_{is} = 1,8T \quad B_{cs} = 1,1T \quad B_{tr} = 1,8T$$

Αρχικά υπολογίζεται το διάκενο της μηχανής. Υπάρχουν στη βιβλιογραφία [4] τύποι που δίνουν το μήκος του διακένου ως συνάρτηση της ισχύος της μηχανής για λειτουργία στα 50Hz:

$$g = (0.1 + 0.02\sqrt[3]{P}) \text{ [mm] για } p = 2$$

$$g = (0.1 + 0.012\sqrt[3]{P}) \text{ [mm] για } p \geq 4$$

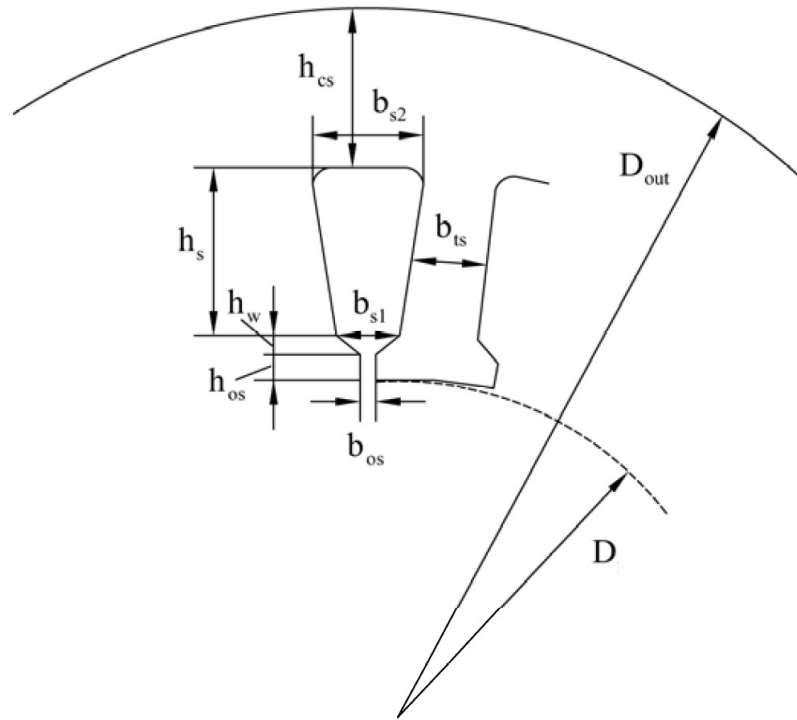
όπου p το πλήθος των πόλων της μηχανής.

Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι $p=4$ και $P=3770W$ άρα $g=0.3mm$. Για ασύγχρονες μηχανές μεγαλύτερων ταχυτήτων το διάκενο πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερο για την αποφυγή μεγάλων απωλειών σιδήρου [11]. Ένα πολύ μικρό διάκενο προκαλεί μεγάλες χωρικές αρμονικές πεδίου και επιπλέον απώλειες [4]. Ακόμη η μικρή απόσταση στάτη-δρομέα απόδοση αποτελεί κατασκευαστική πρόκληση. Για τους λόγους αυτούς επιλέγεται διάκενο μεγαλύτερο από αυτό που υποδεικνύουν οι τύποι.

Δηλαδή, διάκενο πλάτους $g=1mm$. [4]

2.3.1 Στάτης

Για τη σχεδίαση του στάτη χρησιμοποιούνται τραπεζοειδή ημίκλειστα αυλάκια, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.2**. Τα τραπεζοειδή αυλάκια εξασφαλίζουν το σταθερό πλάτος των δοντιών απαραίτητο για την ομαλή φόρτιση τους. Τα δόντια είναι δηλαδή παραλληλόγραμμα.



Σχήμα 2.2 Γεωμετρία αυλάκων σάτη

Στο **Σχήμα 2.2** φαίνεται η γεωμετρία των αυλάκων του σάτη. Από τις διάφορες διαστάσεις άλλες επιλέγονται από τυπικές τιμές και άλλες προσδιορίζονται από εμπειρικούς τύπους ή πιο αναλυτικές σχέσεις.

Το άνοιγμα της αύλακας είναι τυπικά $b_{os} = 2-3\text{mm}$ και πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο του οκταπλάσιου του διακένου. Επιλέγεται $b_{os} = 3\text{mm}$, δηλαδή το τριπλάσιο του διακένου.

Το ύψος του ανοίγματος του διακένου είναι $h_{os} = 0.5-1\text{mm}$. Επιλέγεται $h_{os} = 0.5\text{mm}$.

Το ύψος της σφηνοειδούς περιοχής είναι $h_w = 1-4\text{mm}$. Επιλέγεται $h_w = 1\text{mm}$

Το ύψος αύλακας σάτη h_s δίνεται από τη σχέση:

$$h_s = K \frac{\pi D}{Q} \left(1 - \frac{B_g}{B_{ts}} \right) \quad (2.18)$$

όπου, K ο λόγος του ύψους προς το πλάτος της αύλακας h_s/b_s , ο οποίος σύμφωνα με τη βιβλιογραφία περιορίζεται μεταξύ του 3 και του 6. Οι μικρότερες τιμές του αντιστοιχούν σε μικρότερες μηχανές. Οπότε $K=3$.

Ως αποτέλεσμα $h_s = 1,89\text{cm}$

Το ύψος του τμήματος επιστροφής της ροής στο στάτη h_{cs} δίνεται από τη σχέση:

$$h_{cs} = \frac{a_i}{2} \left(\frac{\pi D}{p} \right) \frac{B_g}{B_{cs}} \quad (2.19)$$

όπου $a_i=0.75$ συντελεστής σχήματος της ροής.

Προκύπτει: $h_{cs} = 1,34cm$

Η εξωτερική διάμετρος στάτη D_{out} εύκολα υπολογίζεται:

$$D_{out} = D_{is} + 2(h_s + h_{cs}) \quad (2.20)$$

άρα $D_{out} = 16,46cm$.

Το πολικό βήμα είναι $\tau = \frac{\pi D}{p}$. Το βήμα κάθε αύλακας είναι επομένως $\tau_s = \frac{\tau}{3q}$. Θεωρώντας

ότι όλη η ροή διακένου περνά από τα δόντια του στάτη είναι:

$$B_g \tau_s L \approx B_{ts} b_{ts} L K_{Fe} \quad (2.21)$$

όπου $K_{Fe} \approx 0.96$ ο συντελεστής πληρότητας της μαγνητικής λαμαρίνας.

Επομένως λύνοντας ως προς b_{ts} και αντικαθιστώντας, προκύπτει το πλάτος του δοντιού του στάτη:

$$b_{ts} = \frac{B_g}{B_{ts}} \frac{\tau_s}{K_{Fe}} = \frac{B_g}{B_{ts}} \frac{\tau}{3q K_{Fe}} = \frac{B_g}{B_{ts}} \frac{\pi D}{3qp K_{Fe}} \quad (2.22)$$

Επομένως: $b_{ts} = 2,5mm$

Τα παραπάνω μεγέθη είναι επαρκή για το αρχικό σχεδιασμό του στάτη. Μένει να προσδιοριστούν και τα χαρακτηριστικά του δρομέα ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία βελτίωσης της γεωμετρίας. [4]

2.3.2 Δρομέας

Κατά τη σχεδίαση ενός δρομέα κλωβού, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην επιλογή του κατάλληλου πλήθους αυλάκων στο δρομέα (Q_r) προκειμένου να περιορίζονται κατά το δυνατό παρασιτικές ροπές, πρόσθετες απώλειες ακτινικές δυνάμεις, θόρυβος και δονήσεις.

Στη βιβλιογραφία βρίσκεται ο παρακάτω πίνακας (**Πίνακας 2.3**) που δίνει τις επιτρεπτές τιμές του πλήθους αυλάκων στο δρομέα (Q_r) ανάλογα με τους πόλους p και το πλήθος αυλάκων του στάτη (Q_s).

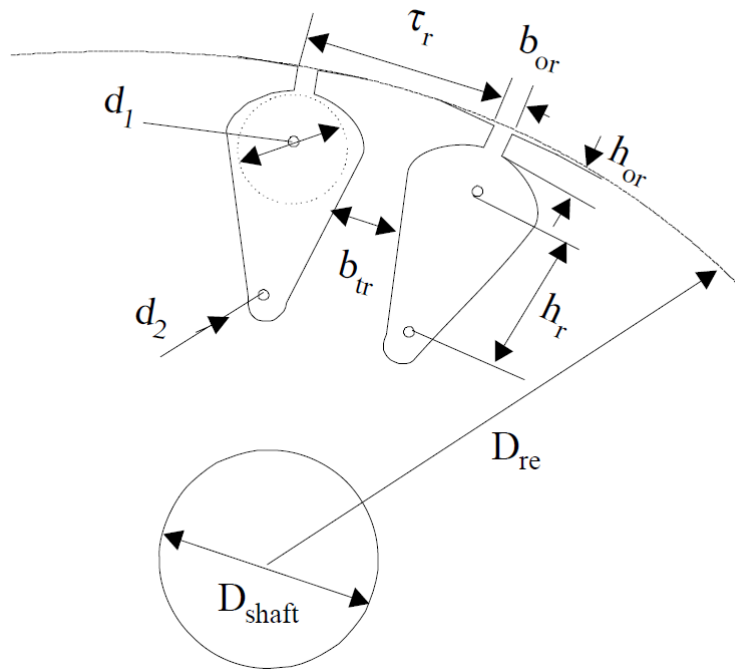
p	Q_s	Q_r
2	24	18, 20, 22, 28, 30, 33, 34
	36	25, 27, 28, 29, 30, 43
	48	30, 37, 39, 40, 41
→ 4	24	16, 18, 20, 30, 33, 34, 35, 36
	→ 36	→ 28, 30, 32, 34, 45, 48
	48	36, 40, 44, 57, 59
	72	42, 48, 54, 56, 60, 61, 62, 68, 76
6	36	20, 22, 28, 44, 47, 49
	54	34, 36, 38, 40, 44, 46
	72	44, 46, 50, 60, 61, 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 2.3 Πλήθος αυλάκων στάτη/δρομέα

Για την 4-πολική μηχανή με 36 αύλακες στο στάτη οι επιτρεπτές τιμές του Q_r είναι 28, 30, 32, 34, 45, 48. Επιλέγεται $Q_r=28$. Ο αριθμός αυτός είναι ο μικρότερος επιτρεπτός και διευκολύνει την φυσική κατασκευή του δρομέα.

Αφού πρόκειται για έναν τυπικό κινητήρα επαγωγής (κλάση A ή B), επιλέγονται κωνικά αυλάκια για το δρομέα. Επιπλέον, για τον περιορισμό των ωμικών απωλειών του δρομέα θα χρησιμοποιηθούν βαθιές αύλακες.

Στο **Σχήμα 2.3** φαίνεται η γεωμετρία των αυλάκων του δρομέα. Παρόλο που δεν είναι σαφές από το σχήμα, τα δόντια του δρομέα είναι παραλληλόγραμμα, ώστε να διατηρείται σταθερή η ροή σε όλο το μήκος τους.



Σχήμα 2.3 Γεωμετρία αυλάκων δρομέα

Μια εύλογη τιμή για το άνοιγμα της αύλακας είναι $b_{or} = 1.5\text{mm}$ και για το ύψος του ανοίγματος του διακένου είναι $h_{or} = 0.5\text{mm}$.

Το ρεύμα της κάθε ράβδου του δρομέα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_b = K_I \frac{2 \cdot 3 \cdot N_s \cdot kW}{Q_r} I_N \quad (2.23)$$

όπου K_I ο συντελεστής που δείχνει τη σχέση των μαγνητοεργειακών δυνάμεων στάτη και δρομέα. Ο συντελεστής αυτός θα ήταν ίσος με 1 αν οι ΜΕΔ ήταν ίσες. Όμως η ΜΕΔ του στάτη είναι ελαφρώς μεγαλύτερη. Επομένως θεωρούμε $K_I=0.9$.

Προκύπτει $I_b = 431,1\text{A}$.

Επιλέγουμε την πυκνότητα ρεύματος στις ράβδους $J_b = 4\text{A/mm}^2$

Η επιφάνεια της αύλακας του δρομέα θα είναι τότε: $A_b = \frac{I_b}{J_b} = 108 \cdot 10^{-6}\text{m}^2$

Το βήμα της αύλακας του δρομέα είναι:

$$\tau_r = \frac{\pi(D - 2g)}{Q_r} \quad (2.24)$$

Το πλάτος του δοντιού του δρομέα είναι:

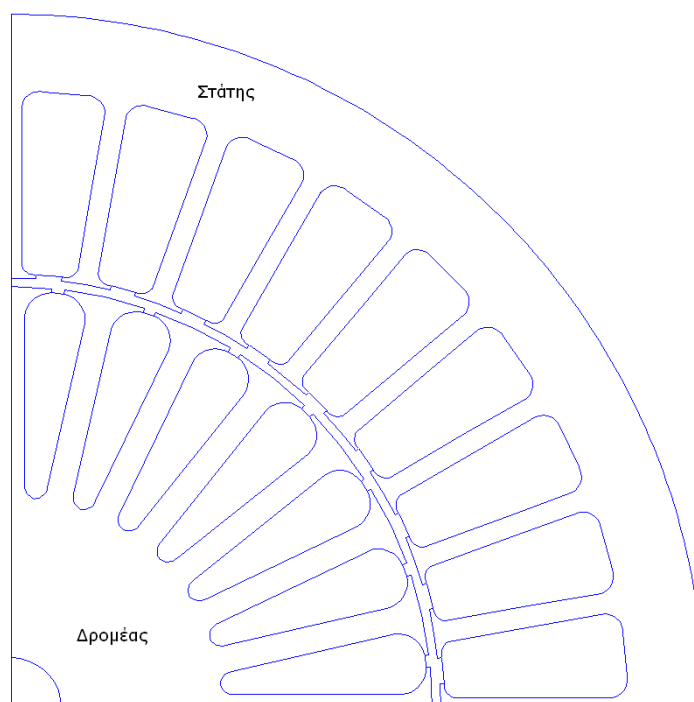
$$b_{tr} = \frac{B_g}{K_{Fe} B_{tr}} \cdot \tau_r \quad (2.25)$$

και προκύπτει $b_{tr} = 3,2mm$.

Με τα παραπάνω δεδομένα μπορεί να σχεδιαστεί και ο δρομέας. [4]

2.3.3 Τελική γεωμετρία

Συγκεντρώνοντας τα στοιχεία της προκαταρκτικής μελέτης και της διαστατικής ανάλυσης που προηγήθηκαν μπορεί να σχεδιαστεί η γεωμετρία του κινητήρα με ακρίβεια. Προκύπτει λοιπόν η γεωμετρία του **Σχήματος 2.4**



Σχήμα 2.4 Γεωμετρία ηλεκτρικής μηχανής ως αποτέλεσμα της λεπτομερούς προκαταρκτικής σχεδίασης.

Στο στάτη παρατηρείται πως τα δόντια είναι ιδιαίτερα λεπτά σε σχέση με το πλάτος των αυλάκων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το εμβαδό της αύλακας να είναι πολλαπλάσιο του εμβαδού του δοντιού. Συγκεκριμένα το εμβαδό της αύλακας είναι 3,5 φορές περίπου το εμβαδό του δοντιού. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τον εμπειρικό κανόνα σχεδιασμού που επιβάλλει το εμβαδό της αύλακας να είναι μόλις το διπλάσιο του εμβαδού του δοντιού. Για

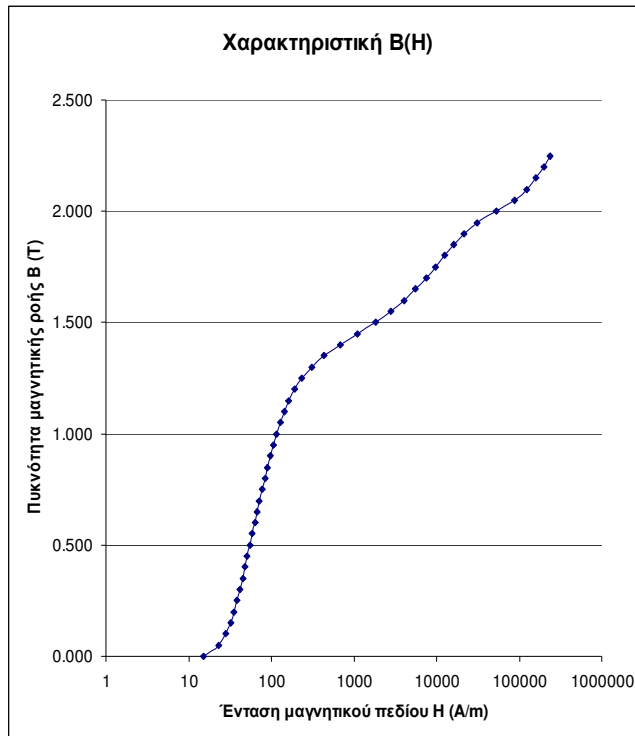
το λόγο αυτό αναμένεται να παρουσιάζεται αυξημένη ροή στο δόντι και πολύ χαμηλή πυκνότητα ρεύματος στο αυλάκι του στάτη. Αναφορικά με το σώμα του στάτη, φαίνεται να έχει υποεκτιμηθεί, και μάλλον δεν επαρκεί για την επιστροφή της ροής χωρίς η ένταση του πεδίου να υπερβεί το 1T, το οποίο αποτέλεσε σχεδιαστική απαίτηση.

Σχετικά με το δρομέα, η σχέση αγωγιμότητας / σιδηρομαγνητικού υλικού στον πυρήνα φαίνεται να είναι ικανοποιητική, με την έννοια ότι το εμβαδό των αυλάκων είναι περίπου το διπλάσιο από αυτό των δοντιών. Από την άλλη πλευρά όμως, οι αύλακες είναι αρκετά βαθιές πράγμα το οποίο αναμένεται να προκαλέσει σημαντικές σκεδάσεις.

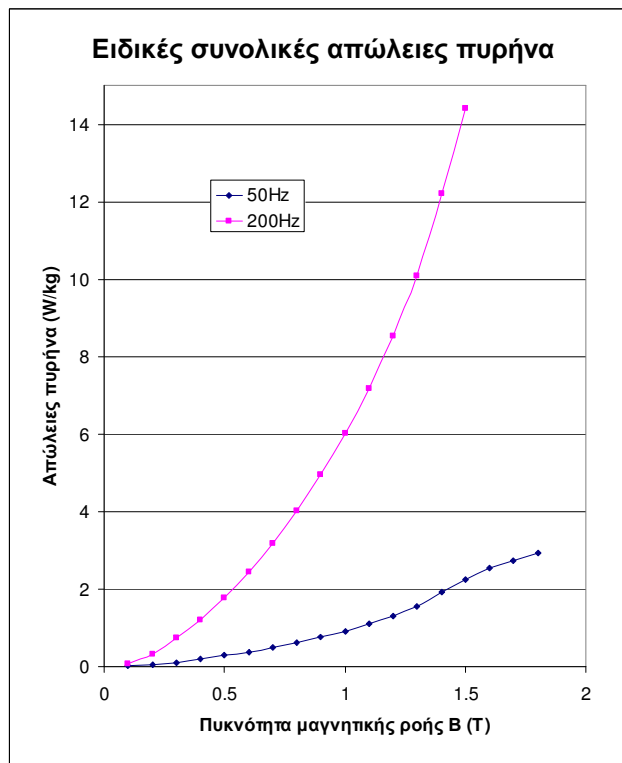
2.4 Υλικά κατασκευής

Στις αύλακες του δρομέα μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε χαλκός είτε αλουμίνιο. Ο χαλκός έναντι του αλουμινίου έχει μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα προσφέροντας υψηλότερη απόδοση (μικρότερες ωμικές απώλειες) και μικρότερο βάρος και όγκο κατασκευής [12]. Μιας και τα παλαιότερα προβλήματα κατασκευής του χαλκού έχουν πια ξεπεραστεί [12], επιλέγεται χαλκός. Η αγωγιμότητα του χαλκού στους 80°C είναι $\sigma = 4.8 \cdot 10^7 \text{ Sm}^{-1}$.

Για τον πυρήνα της μηχανής χρησιμοποιείται η μαγνητική λαμαρίνα M235-35A. Λόγω των υψηλών συχνοτήτων που αναπτύσσονται στο στάτη, κρίνεται απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί μαγνητική λαμαρίνα πάχους μικρότερου του συνηθισμένου (0.5mm). Χρησιμοποιείται δηλαδή μαγνητική λαμαρίνα μη κατευθυνόμενων κόκκων πάχους 0.35mm. Από τα στοιχεία του κατασκευαστή παράγονται οι χαρακτηριστικούς καμπύλες του υλικού:



Σχήμα 2.5 Μαγνητική πόλωση μαγνητικής λαμαρίνας M235-35A



Σχήμα 2.6 Ειδικές συνολικές απώλειες πυρήνα μαγνητικής λαμαρίνας M235-35A στα 50Hz και 200Hz

Κεφάλαιο 3

Οριστική σχεδίαση κινητήρα

Στο κεφάλαιο αυτό ο κινητήρας που έχει προκύψει ως αποτέλεσμα της προκαταρκτικής σχεδίασης εισάγεται στο πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας. Συγκεκριμένα γίνεται ανάλυση ευαισθησίας της ροπής με παραμέτρους διάφορες διαστάσεις του κινητήρα. Ως αποτέλεσμα προκύπτει μια γεωμετρία για την οποία η ροπή μεγιστοποιείται. Τότε, το αρμονικό περιεχόμενο της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο, οι απώλειες και η απόδοση του κινητήρα υπολογίζονται προκειμένου να βγουν συμπεράσματα για τη λειτουργία του.

3.1 Εισαγωγή στη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων

Η απαίτηση για όλο και περισσότερη ακρίβεια κατά τη διαδικασία ανάλυσης και σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών ευνόησε και προώθησε τη διάδοση αριθμητικών μοντέλων, κατάλληλων για τον υπολογισμό ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Αυτές οι αριθμητικές μέθοδοι βασίζονται ουσιαστικά στον προσδιορισμό της κατανομής των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων στις δομές υπό μελέτη, με βάση τη λύση των εξισώσεων του Maxwell. Μια αναλυτική λύση είναι σχεδόν αδύνατο να επιτευχθεί, αφενός λόγω της γεωμετρικής πολυπλοκότητας των μηχανών και αφετέρου λόγω της μη γραμμικής φύσης των υλικών κατασκευής. Επομένως, στην πλειονότητα των περιπτώσεων, μόνο αριθμητική λύση είναι εφικτή.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική τεχνική κατάλληλη για αυτό το σκοπό. Επιτρέπει τον προσδιορισμό μιας πεδιακής λύσης, ακόμα και στην περίπτωση χρονομεταβλητών πεδίων, σε υλικά που είναι μη ομογενή, ανισοτροπικά ή και μη γραμμικά. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, η συνολική περιοχή ανάλυσης διαιρείται σε στοιχειώδεις υποπεριοχές, τα πεπερασμένα στοιχεία, και οι πεδιακές εξισώσεις εφαρμόζονται σε καθένα από αυτά.

Αυτή η μέθοδος προτάθηκε τη δεκαετία του '40, αλλά για πρώτη φορά εφαρμόστηκε 10 χρόνια μετά, σε αεροναυτικές εφαρμογές. Με το πέρασμα των χρόνων, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων υιοθετήθηκε σε σχεδόν όλα τα φυσικά και μαθηματικά προβλήματα. Σήμερα (2014) είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την επίλυση προβλημάτων διανυσματικού πεδίου.

Η μελέτη της κατανομής του πεδίου, και συγκεκριμένα του ηλεκτρομαγνητικού, παρουσιάζει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα. Επιτρέπει τη διεξαγωγή σχολαστικής τοπικής ανάλυσης, επισημαίνοντας επικίνδυνες καταστάσεις όπως κλίσεις του πεδίου, εντάσεις του μαγνητικού πεδίου, κορεσμό κ.α.. Επιτρέπει δηλαδή, μια ικανοποιητική εκτίμηση της επίδοσης της υπό ανάλυση ηλεκτρομαγνητικής διάταξης (ειδικά όταν οι κλασσικές μέθοδοι ανάλυσης δίνουν ανεπαρκή αποτελέσματα). Τέλος, συμβάλλει στην ουσιαστική μείωση του πλήθους πρωτοτύπων που κατασκευάζονται κατά τη διαδικασία σχεδιασμού.

Ωστόσο, η μέθοδος έχει και κάποια μειονεκτήματα. Λόγω της αριθμητικής της φύσης, είναι κατ' ανάγκη προσεγγιστική. Επιπλέον, αν η μέθοδος δεν εφαρμοστεί σωστά μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβή αποτελέσματα. Ακόμη, επειδή η ποσότητες προς υπολογισμό κατανέμονται στο χώρο, ο απαιτούμενος χρόνος υπολογισμού είναι γενικά μεγάλος.

Με σκοπό να τη μείωση του χρόνου υπολογισμού και ταυτόχρονα τη βελτίωση της ανάλυσης, κάθε περιοδικότητα και συμμετρία της διάταξης (είτε γεωμετρική είτε ηλεκτρομαγνητική) χρησιμοποιείται. Η τελική ακρίβεια, επηρεάζεται από το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων και την ομοιομορφία του πλέγματος που δημιουργείται. Για την αύξηση της ακρίβειας, επιβάλλεται πιο «λεπτό» πλέγμα, χρησιμοποιώντας πεπερασμένα στοιχεία μικρότερου μεγέθους. Εν τούτοις, υπέρμετρη υποδιαιρέση της περιοχής ανάλυσης προκαλεί επιδείνωση του χρόνου υπολογισμού. [5]

Παρά το γεγονός ότι οι μέθοδοι που αναπτύσσονται σήμερα δίνουν πεδιακές λύσεις σε τρισδιάστατα (3D) προβλήματα, η πλειονότητα των προβλημάτων που αφορούν ηλεκτρικές μηχανές μπορεί να υλοποιηθεί με δισδιάστατη (2D) ανάλυση. Αυτό παρέχει διάφορα οφέλη και οδηγεί σε αξιόλογη μείωση του χρόνου υπολογισμού. Τα φαινόμενα που αναγκαστικά παραλείπονται στην 2D ανάλυση αλλά δεν έχουν αμελητέα δράση, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη με κατάλληλες διορθώσεις στην τελική λύση.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το πρόγραμμα FEMM. Αυτό δίνει τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων σε δύο διαστάσεις. Λύνει προβλήματα τόσο με επίπεδη όσο και με αξονική συμμετρία. Στην επόμενη παράγραφο αναλύονται οι εξισώσεις και οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιεί. [5], [13], [14]

3.1.1 Εξισώσεις

Μαγνητοστατικά προβλήματα

Μαγνητοστατικά είναι τα προβλήματα στα οποία τα πεδία δεν μεταβάλλονται με το χρόνο. Στην περίπτωση αυτή η μαγνητική ένταση (H) και η μαγνητική επαγωγή (B) πρέπει να υπακούνε τις σχέσεις:

$$\nabla \times H = 0 \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot B = J \quad (3.2)$$

και επίσης στη συντακτική σχέση:

$$B = \mu H \quad (3.3)$$

Αν ένα υλικό είναι μη γραμμικό, η μαγνητική διαπερατότητα, μ είναι στην πραγματικότητα συνάρτηση του B :

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \quad (3.4)$$

Το FEMM προσδιορίζει πεδία που ικανοποιούν τις (3.1)-(3.3), χρησιμοποιώντας την έννοια του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού. Η μαγνητική επαγωγή ως συνάρτηση του διανυσματικού δυναμικού A γράφεται:

$$B = \nabla \times A \quad (3.5)$$

Το B εξακολουθεί να ικανοποιεί την (3.2). Τότε η (1.1) γράφεται:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = J \quad (3.6)$$

Για γραμμικά ιστροπικά υλικά η εξίσωση (3.6) απλοποιείται σε:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J \quad (3.7)$$

Το FEMM διατηρεί τη σχέση (3.6) ώστε μαγνητοστατικά προβλήματα με μη γραμμικά υλικά να μπορούν να λυθούν.

Στη γενική περίπτωση των τριών διαστάσεων το διάνυσμα A έχει και τις τρεις συνιστώσες. Ωστόσο σε προβλήματα δύο διαστάσεων, σαν αυτά που αντιμετωπίζει το FEMM, οι δύο συνιστώσες πάνω στο επίπεδο που αναλύεται μηδενίζονται, αφήνοντας μόνο την κάθετη στο επίπεδο. Το πλεονέκτημα της χρήσης του διανυσματικού δυναμικού είναι ότι όλες οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται συνδυάζονται σε μία εξίσωση. Η εξίσωση αυτή (1.6) είναι μερική διαφορική εξίσωση ελλειπτικού τύπου, για την οποία πολλοί αποτελεσματικοί τρόποι επίλυσης έχουν αναπτυχθεί. [5], [13], [14]

Αρμονικά μαγνητικά προβλήματα

Αν το μαγνητικό πεδίο είναι χρονομεταβλητό, δινορρεύματα ενδέχεται να επάγονται στα υλικά με μη μηδενική αγωγιμότητα. Τότε μερικές ακόμα από τις εξισώσεις του Maxwell που σχετίζονται με τα ηλεκτρικά φαινόμενα πρέπει να ικανοποιούνται. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E και η πυκνότητα ρεύματος J πρέπει να υπακούνε τη συντακτική σχέση:

$$J = \sigma E \quad (3.8)$$

Το επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο πρέπει να υπακούει την:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.9)$$

Εισάγοντας στην (3.9) το διανυσματικό δυναμικό προκύπτει:

$$\nabla \times E = -\nabla \times \dot{A} \quad (3.10)$$

Για την περίπτωση δύο διαστάσεων η (3.10) μπορεί να ολοκληρωθεί και γίνεται:

$$E = -\dot{A} - \nabla V \quad (3.11)$$

και χρησιμοποιώντας τη συντακτική σχέση (3.8) γίνεται:

$$J = -\sigma \dot{A} - s \nabla V \quad (3.12)$$

Αντικαθιστώντας στην (3.6) προκύπτει η μερική διαφορική εξίσωση:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = -\sigma \dot{A} + J_{src} - \sigma \nabla V \quad (3.13)$$

όπου J_{src} οι πυκνότητες ρεύματος που επιβάλλονται. Ο όρος ∇V είναι

όπου το J_{src} αναπαριστά τις εφαρμοζόμενες πηγές ρεύματος. Ο όρος ∇V είναι ένα πρόσθετο βαθμωτό διάνυσμα τάσης το οποίο εκφράζει τις τερματικές συνθήκες των αγωγών. Οπότε αν $\nabla V = 0$ προκύπτει η εξίσωση διάχυσης του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού :

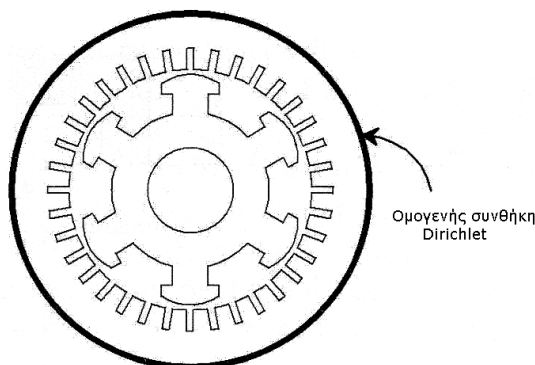
$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A - \sigma \dot{A} = -J_{src} \quad (3.14)$$

3.1.2 Οριακές συνθήκες

Προκειμένου το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό να προσδιοριστεί παντού σωστά χρειάζεται να οριστούν οι κατάλληλες οριακές συνθήκες στο πρόβλημα. Η επιλογή των οριακών συνθηκών δεν επηρεάζει μόνο την τελική λύση αλλά βοηθά και στη μείωση της επιφάνειας του προβλήματος χρησιμοποιώντας κάθε συμμετρία.

Οριακή συνθήκη Dirichlet

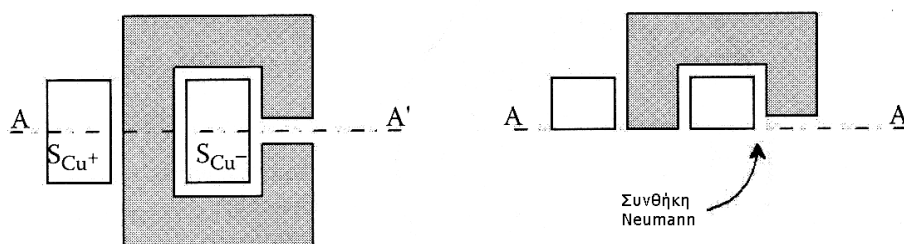
Η συνθήκη αυτή τίθεται στα όρια του προβλήματος όπου το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό A έχει σταθερή τιμή. Η ροή εφάπτεται του ορίου αυτού και δεν το διαπερνά. Συνήθως χρησιμοποιείται η ομογενοποιημένη συνθήκη Dirichlet στα εξωτερικά όρια του προβλήματος η οποία θέτει το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό $A_z=0$. Θέτοντας τη συνθήκη αυτή είναι ισοδύναμο με τη θεώρηση ενός εξωτερικού υλικού με μηδενική μαγνητική διαπερατότητα. Ένα μονωτικό υλικό.



Σχήμα 3.1 Ομογενής συνθήκη Dirichlet κατά μήκος της περιφέρειας σύγχρονης μηχανής

Οριακή συνθήκη Neumann

Η συνθήκη αυτή τίθεται στα όρια του προβλήματος όπου η παράγωγος του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού $\partial A/\partial n$ έχει σταθερή τιμή. Δηλαδή οι γραμμές της ροής έχουν σταθερή κλίση με το όριο. Η σύνηθες μορφή χρησιμοποίησης είναι τα σημεία του προβλήματος όπου $\partial A/\partial n=0$ δηλαδή όπου οι γραμμές της ροής είναι κάθετες στο όριο. Όταν εφαρμοστεί σ' ένα μαγνητικό πεδίο περιορίζει τη μαγνητική επαγωγή B να έχει μόνο συνιστώσες στη γραμμή του ορίου. Η εφαρμογή της είναι ισοδύναμη με την ύπαρξη εξωτερικού υλικού το οποίο έχει άπειρη μαγνητική διαπερατότητα.



Σχήμα 3.2 Μείωση της επιφάνειας ανάλυσης με χρήση οριακής συνθήκης Neumann

Οριακή συνθήκη Robin

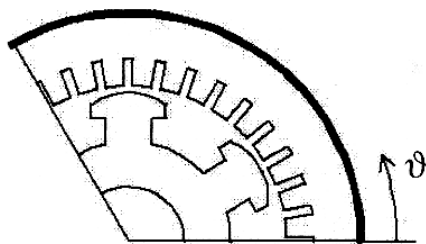
Αυτό το είδος οριακής συνθήκης είναι συνδυασμός των οριακών συνθηκών Dirichlet και Neumann, ορίζοντας μια σχέση ανάμεσα στην τιμή του A και στην κάθετη παράγωγο του ορίου. Εν γένει η οριακή συνθήκη Robin γράφεται :

$$\frac{\partial A}{\partial n} + c_1 A = c_2 \quad (3.15)$$

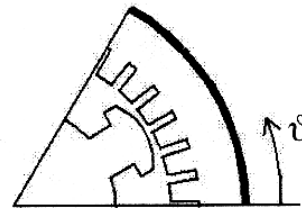
Αυτή η οριακή συνθήκη χρησιμοποιείται συχνά στα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων σε προβλήματα με ρεύματα εξ' επαγωγής (δινορρεύματα).

Περιοδική και Αντιπεριοδική Οριακή συνθήκη

Η περιοδική συνθήκη εφαρμόζεται σε δύο ή περισσότερες γραμμές του ορίου. Με την εφαρμογή της τίθεται το μαγνητικό δυναμικό των δύο γραμμών ίσο και χρησιμοποιείται στα σημεία του προβλήματος όπου το μαγνητικό πεδίο επαναλαμβάνεται. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται αρκετά ο χρόνος επίλυσης των προβλημάτων. Η αντιπεριοδική συνθήκη συμπεριφέρεται όπως ακριβώς η περιοδική με τη μόνη διαφορά ότι στα δύο σημεία που εφαρμόζεται θέτει μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό ίσο αλλά με αντίθετο πρόσημο. [5], [13], [14]



Άρτια περιοδικότητα



Περιπτή περιοδικότητα

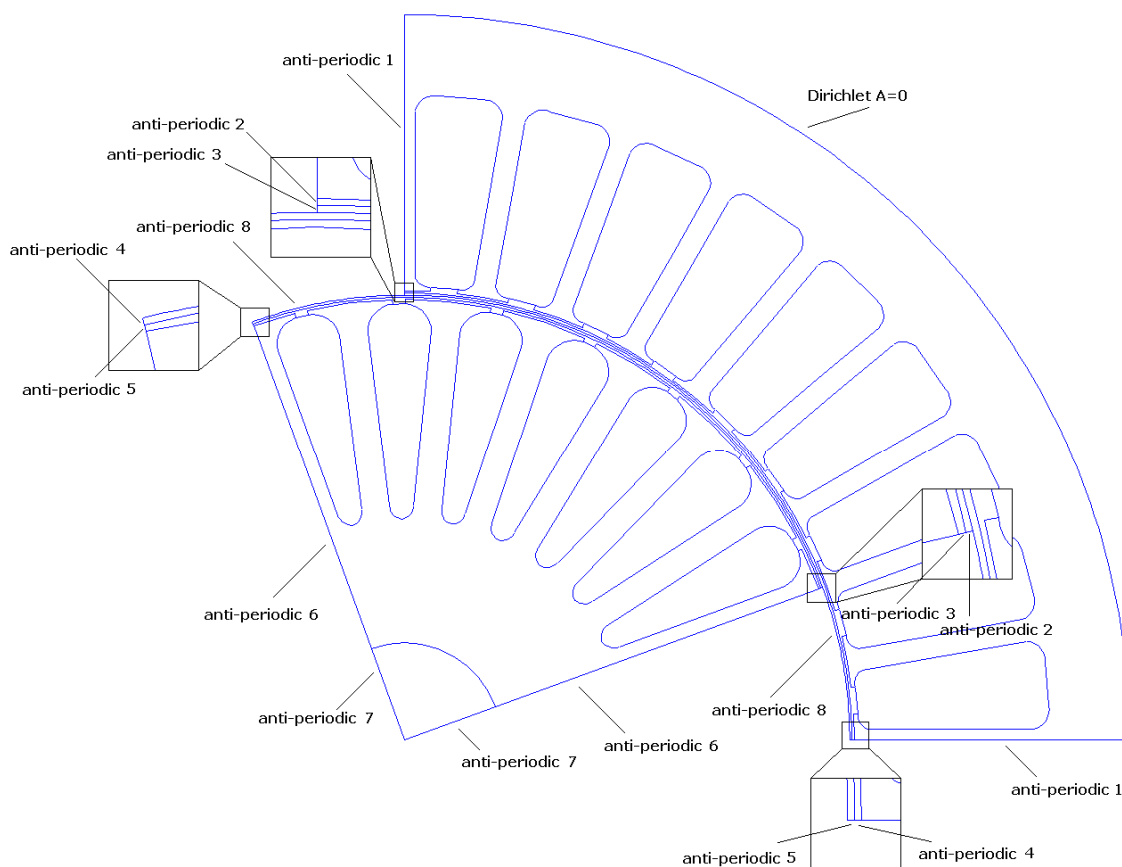
Σχήμα 3.3 Μείωση της επιφάνειας ανάλυσης με χρήση περιοδικής συνθήκης

3.2 Εισαγωγή της μηχανής στο FEMM

3.2.1 Σχεδίαση

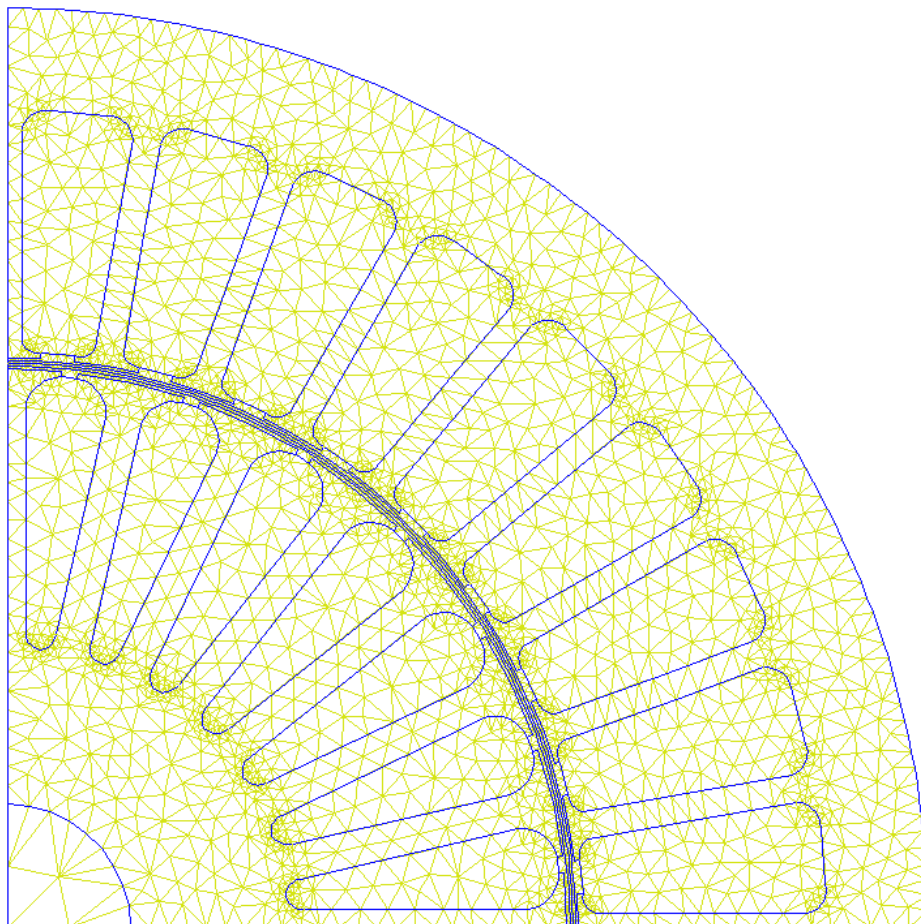
Η μηχανή είναι 4-πολική άρα για την ανάλυση αρκεί να σχεδιαστεί ο ένας πόλος και να οριστούν κατάλληλες αντι-περιοδικές οριακές συνθήκες.

Στο **Σχήμα 3.4** φαίνεται η μηχανή όπως σχεδιάζεται στο FEMM καθώς επίσης και οι οριακές συνθήκες που επιβάλλονται.



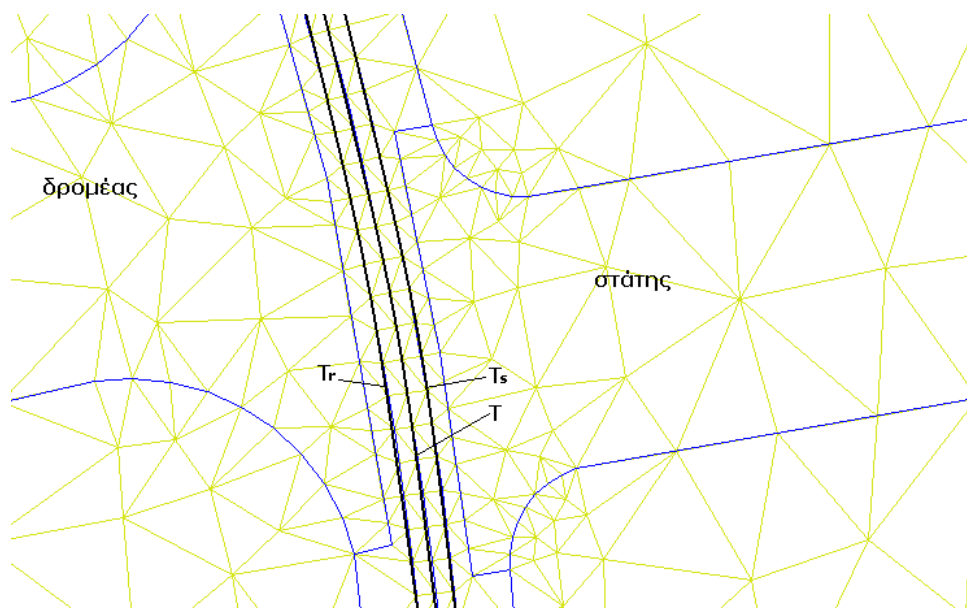
Σχήμα 3.4 Η γεωμετρία του κινητήρα όπως σχεδιάστηκε στο FEMM και οι οριακές συνθήκες

Επιλέγεται πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που φαίνεται στο **Σχήμα 3.5** το οποίο θεωρείται κατάλληλο για την ανάλυση. Είναι, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.6** πολύ πιο πυκνό στις περιοχές υψηλού ενδιαφέροντος (διάκενο, λεπτομέρειες γεωμετρίας).



Σχήμα 3.5 Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

Το διάκενο χωρίζεται σε τρία μέρη, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.6**, ώστε το πλέγμα που δημιουργείται να είναι πιο πυκνό.

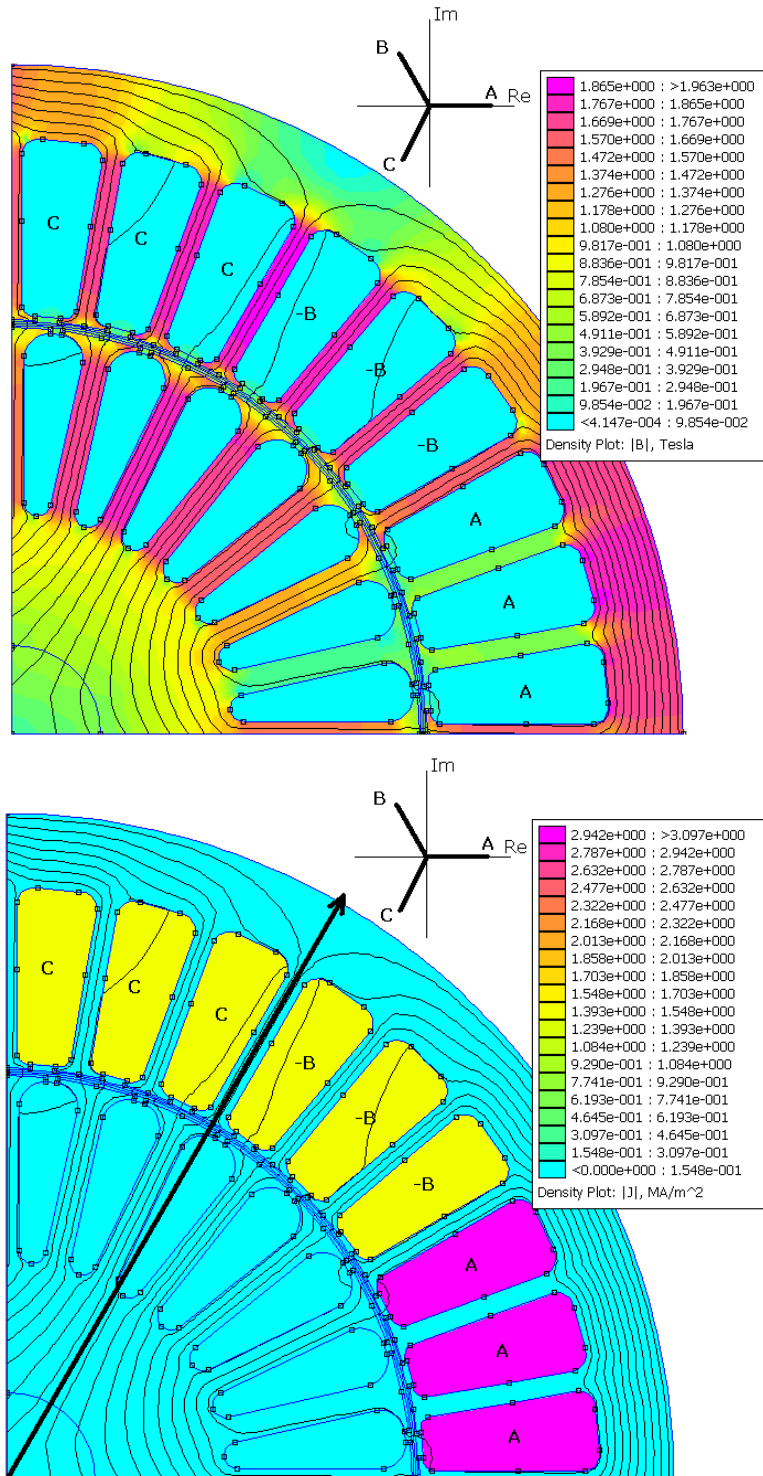


Σχήμα 3.6 Λεπτομέρεια πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων στην περιοχή διακένου και καμπύλες υπολογισμού ροπής

Επιπλέον η ροπή διακένου υπολογίζεται με τον τανυστή του Maxwell κατά μήκος τριών ευθειών στο διάκενο (T , T_r και T_s), ώστε να φαίνεται η διακύμανσή της. Τελικά υπολογίζεται η ροπή ως ο μέσος όρος των δύο ακραίων, δηλαδή των T_r και T_s .

3.2.2 Μαγνητοστατική ανάλυση

Αρχικά η μηχανή προσομοιώνεται σε **κενό φορτίο**. Αυτό επιτυγχάνεται ορίζοντας μηδενική συχνότητα. Στο **Σχήμα 3.7** φαίνεται η μαγνητική επαγωγή και η πυκνότητα ρευμάτων που προκύπτουν.



Σχήμα 3.7 Μέτρο μαγνητικής επαγωγής (πάνω) και πυκνότητα ρεύματος (κάτω) σε κενό φορτίο

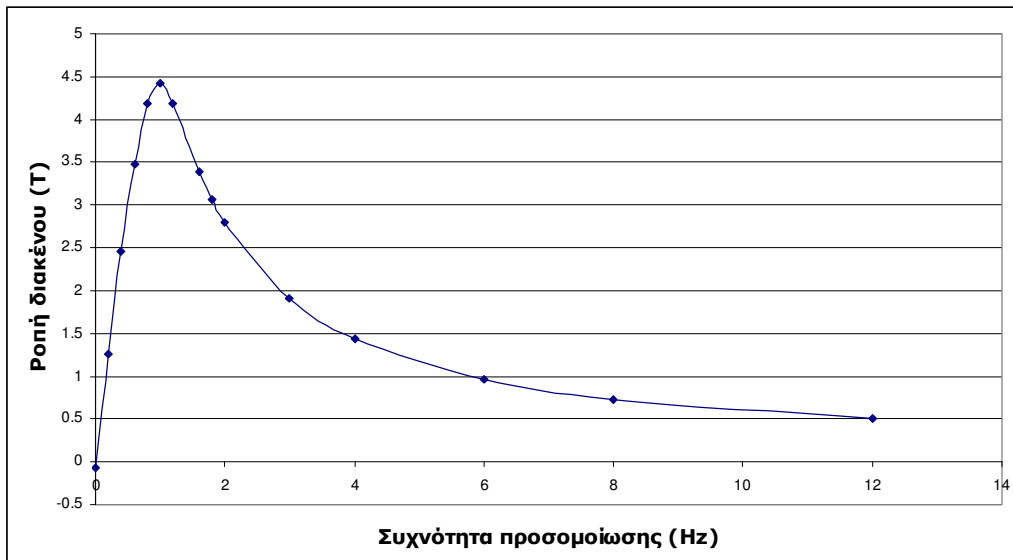
Οι ράβδοι του δρομέα δεν διαρρέονται από ρεύμα. Επομένως το παραγόμενο πεδίο οφείλεται μόνο στο τύλιγμα του στάτη. Στο **Σχήμα 3.7** σημειώνονται το στιγμιότυπο των ρευμάτων του στάτη και ο άξονας του πεδίου που δημιουργούν.

3.2.3 Αρμονική ανάλυση

Όπως έχει εξηγηθεί στην παράγραφο 3.1, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων στο FEMM λύνει μαγνητοστατικά και αρμονικά προβλήματα μόνο. Στην περίπτωση σύγχρονων μηχανών, η ανάλυση είναι εύκολη διότι στο δρομέα υπάρχει ένα σταθερό ως προς αυτόν πεδίο. Επομένως η μηχανή μπορεί να αναλυθεί θεωρώντας πλαίσιο αναφοράς το δρομέα και τροφοδοτώντας με ρεύματα το στάτη. Με τον τρόπο αυτό το πεδίο του δρομέα είναι ακίνητο και μεταβάλλοντας την κατανομή των ρευμάτων του στάτη αλλάζει η σχετική θέση των πεδίων και προσδιορίζεται η παραγόμενη ροπή. Λύνεται δηλαδή ένα μαγνητοστατικό πρόβλημα.

Στην περίπτωση της ασύγχρονης όμως μηχανής, το πεδίο του δρομέα είναι επαγόμενο (από το στάτη) και επίσης κινείται ως προς το δρομέα με τη συχνότητα ολίσθησης. Οπότε θεωρώντας αναφορά το δρομέα, τα πεδία δεν είναι πλέον ακίνητα, αλλά μεταβάλλονται με τη συχνότητα ολίσθησης. Αυτός είναι και ο λόγος άλλωστε που δημιουργούνται τα επαγόμενα ρεύματα στο δρομέα της μηχανής. Επομένως ορίζοντας τη συχνότητα του προβλήματος στο FEMM, ορίζεται η σχετική συχνότητα περιστροφής των πεδίων στάτη και δρομέα ως προς την ακίνητη διάταξη. Εξετάζεται δηλαδή η περίπτωση ακινητοποιημένου δρομέα.

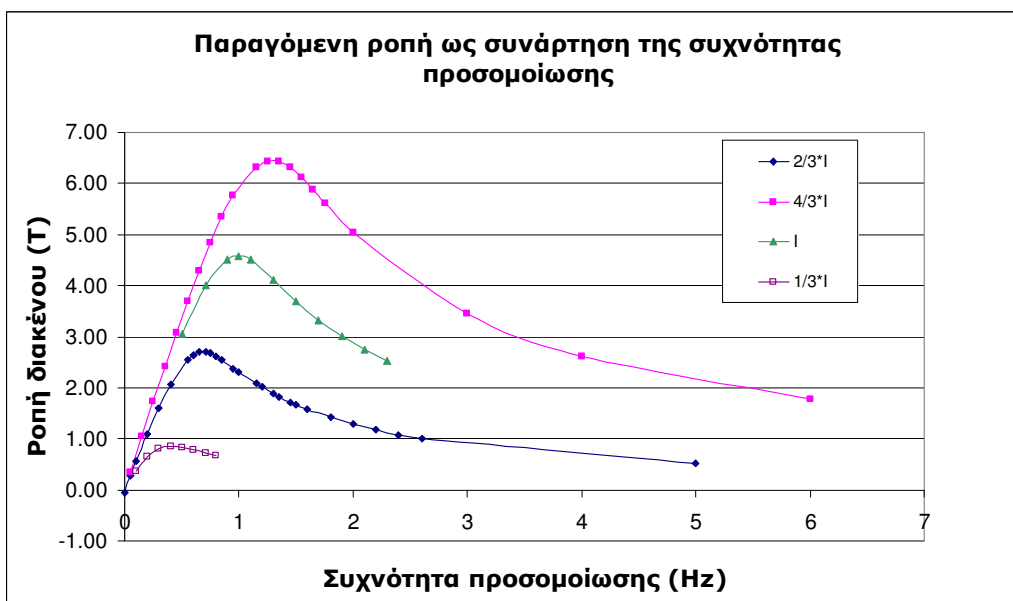
Για να επιλεγεί η συχνότητα αυτή αξίζει να γίνει μια διερεύνηση με κριτήριο την παραγόμενη ροπή. Μεταβάλλεται η συχνότητα του προβλήματος με μεταβλητό βήμα ώστε να παραχθεί η καμπύλη του **Σχήματος 3.8**.



Σχήμα 3.8 Παραγόμενη ροπή ως συνάρτηση της συχνότητας προσομοίωσης

Η καμπύλη αυτή στη μορφή μοιάζει με την καμπύλη ροπής – ταχύτητας. Προέκυψε μεταβάλλοντας τη συχνότητα προσομοίωσης κρατώντας όμως το ρεύμα σταθερό. Επομένως είναι λάθος να θεωρήσει κανείς πως αυτή η καμπύλη είναι η καμπύλη ροπής ταχύτητας του κινητήρα επαγωγής. Δείχνει απλά την ικανότητα γι παραγωγή ροπής με το συγκεκριμένο ρεύμα γραμμής.

Στο **Σχήμα 3.9** παρουσιάζονται σε κοινό διάγραμμα οι καμπύλες ροπής – συχνότητας προσομοίωσης για διάφορες τιμές του ρεύματος.



Σχήμα 3.9 Παραγόμενη ροπή ως συνάρτηση της συχνότητας προσομοίωσης για διάφορες τιμές ρεύματος

Παρατηρείται πως για διάφορες τιμές του ρεύματος η καμπύλη κλιμακώνεται. Επιπλέον μετατοπίζεται η συχνότητα στην οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη ροπή.

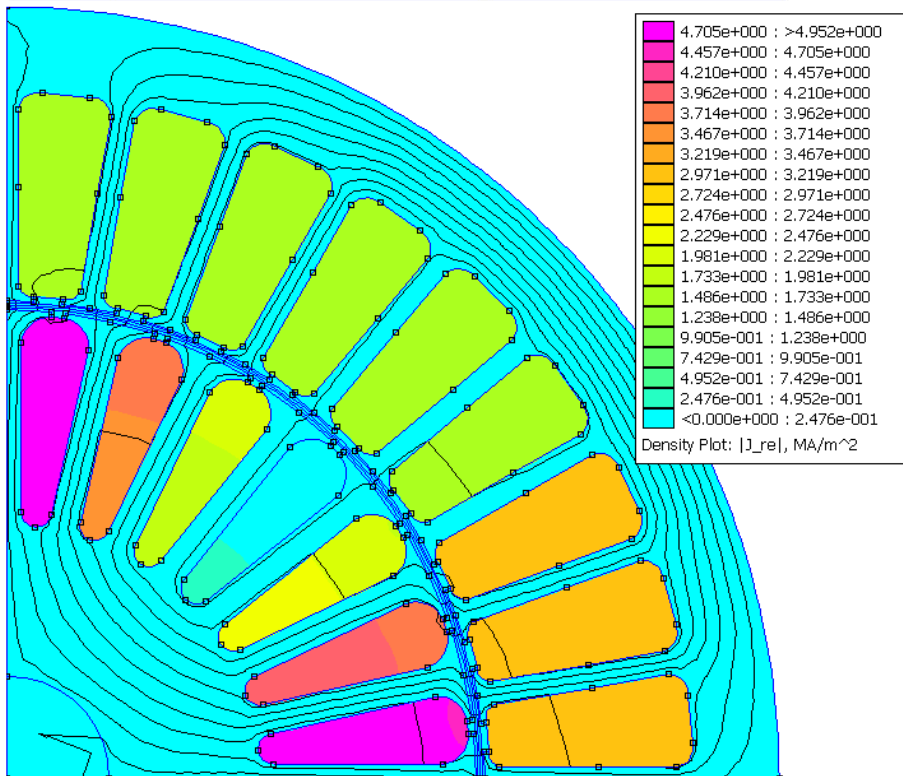
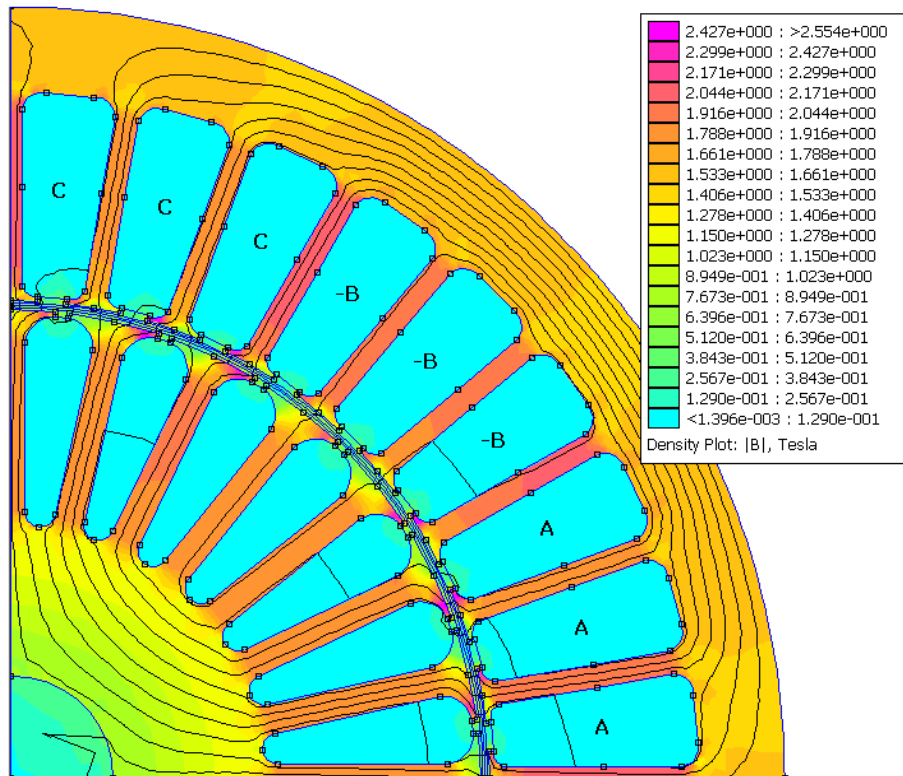
Στο **Σχήμα 3.8** φαίνεται πως για μια τιμή της συχνότητας του προβλήματος, η ροπή στο διάκενο μεγιστοποιείται. Θεωρείται πως κατά τη λειτουργία του κινητήρα αυτή θα είναι η σχετική συχνότητα ρευμάτων στάτη / δρομέα που θα αναπτυχθούν, προκειμένου να αποδοθεί η μέγιστη ροπή και να ικανοποιηθεί το φορτίο.

Η φόρτιση του κινητήρα σε συχνότητα που μεγιστοποιεί τη ροπή, πριν από οποιαδήποτε προσπάθεια βελτίωσης της γεωμετρίας φαίνεται στο **Σχήμα 3.10**.

Μελετώντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης του **Σχήματος 3.10** γίνονται οι εξής παρατηρήσεις:

- ο σίδηρος του κινητήρα υπερφορτίζεται. Η μαγνητική επαγωγή στα δόντια του στάτη και του δρομέα καθώς και στο σώμα του στάτη λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες των επιτρεπτών.
- ο χαλκός στο στάτη υποχρησιμοποιείται. Φαίνεται πως η πυκνότητα ρεύματος στο στάτη είναι περίπου $3.4\text{A}/\text{mm}^2$, πολύ μικρότερη από τα $6\text{A}/\text{mm}^2$ που θεωρήθηκαν ανεκτά κατά το σχεδιασμό.

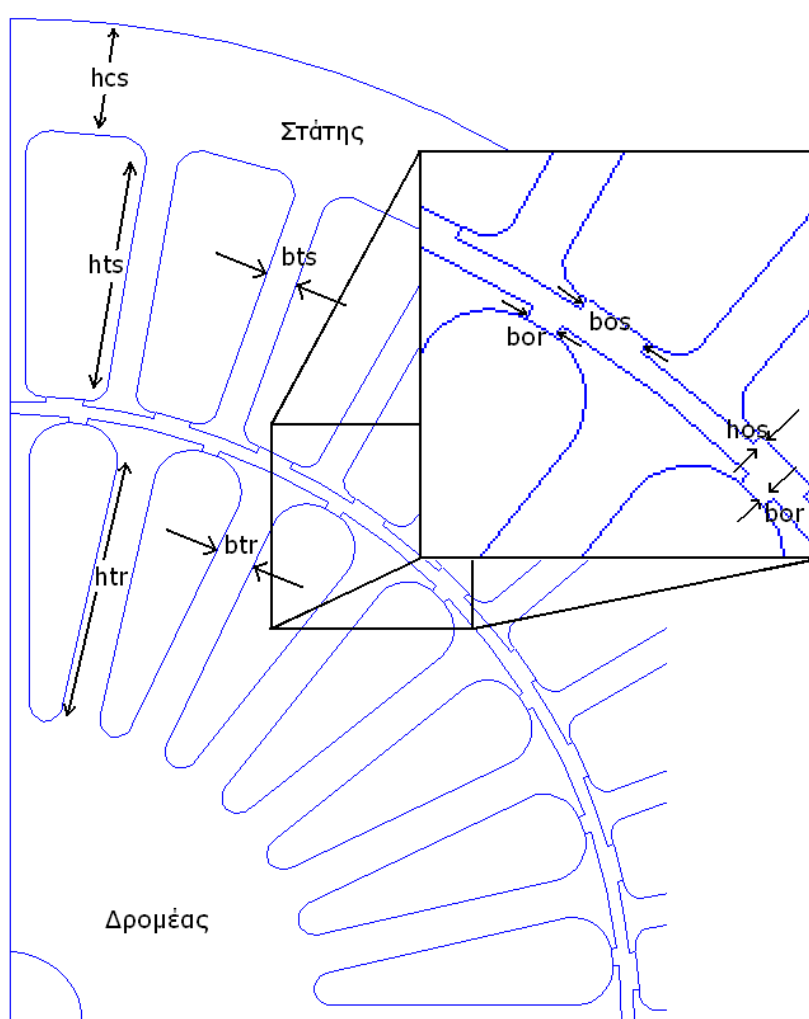
Επομένως, με προσεκτική μεταβολή των γεωμετρικών παραμέτρων, πρέπει να αλλάξει η ισορροπία σιδήρου / χαλκού στον κινητήρα ώστε να γίνεται καλή αξιοποίησή τους.



Σχήμα 3.10 Μέτρο μαγνητικής επαγωγής (πάνω) και πυκνότητα ρεύματος (κάτω) πριν τη βελτιστοποίηση. Συχνότητα προσομοίωσης $f=1\text{Hz}$.

3.3 Ανάλυση ευαισθησίας γεωμετρικών παραμέτρων με κριτήριο τη ροπή

Με αλλαγές στη γεωμετρία ενδέχεται να μεταβάλλεται η παραγόμενη ροπή. Για το λόγο αυτό διεξάγεται ανάλυση ευαισθησίας της ροπής σε σχέση με διάφορες γεωμετρικές παραμέτρους της μηχανής. Συγκεκριμένα μεταβάλλονται το πλάτος (bts , btr) και το μήκος (hts , htr) των δοντιών του στάτη και του καθώς επίσης και το μήκος του σώματος επιστροφής στάτη (hcs) και οι διαστάσεις του ανοίγματος των αυλάκων στάτη και δρομέα (bos , bor , hos , hor). Όλες οι διαστάσεις φαίνονται στο **Σχήμα 3.11**.



Σχήμα 3.11 Γεωμετρία κινητήρα και οι παράμετροι της ανάλυσης ευαισθησίας

Η τιμή κάθε μεταβλητής μεταβάλλεται σε ένα εύλογο εύρος ανάλογο του μεγέθους της. Προκειμένου να υπάρξει ένας ενιαίος τρόπος μέτρησης της επίδρασης της μεταβολής κάποιας μεταβλητής στη ροπή, χρησιμοποιείται η ελαστικότητα. Ελαστικότητα είναι ο λόγος της ποσοστιαίας μεταβολής μια μεταβλητής προς την ποσοστιαία μεταβολή μιας άλλης. Είναι

ένας τρόπος μέτρησης της ανταπόκρισης μιας ποσότητας στη μεταβολή παραμέτρων. Η ελαστικότητα είναι καθαρός αριθμός, δεν έχει δηλαδή μονάδες μέτρησης. Έτσι υπολογίζοντας την ελαστικότητα της ροπής ως προς κάθε μεταβλητή ξεχωριστά, γίνεται εύκολα αντιληπτή η επίδρασή της στη μεταβολή της ροπής. Σημειώνεται πως επειδή η εξάρτηση της ροπής από τις παραμέτρους δεν είναι γραμμική οι τιμές ελαστικότητας που καταγράφονται είναι οι μέγιστες που προκύπτουν κατά τη μεταβολή.

3.3.1 Μεταβολή γεωμετρικών παραμέτρων

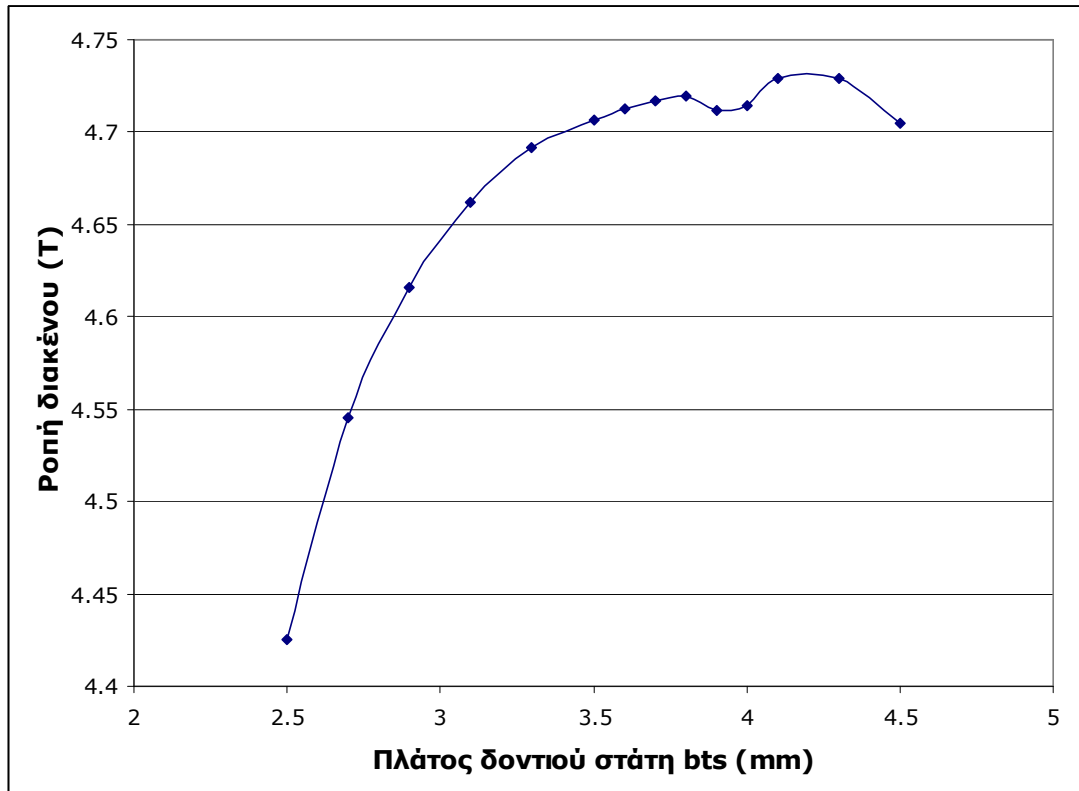
Για την ανάλυση ευαισθησίας κάθε γεωμετρική παράμετρος μεταβάλλεται και καταγράφεται η μεταβολή της ροπής που προκαλεί. Επιλέγεται τότε η νέα τιμή της παραμέτρου για την οποία αφενός αυξάνεται η παραγόμενη ροπή και αφετέρου δεν υπερφορτίζεται ο κινητήρας.

Ακολουθεί η ανάλυση ανά παράμετρο:

a) bts : πλάτος δοντιού σάτη

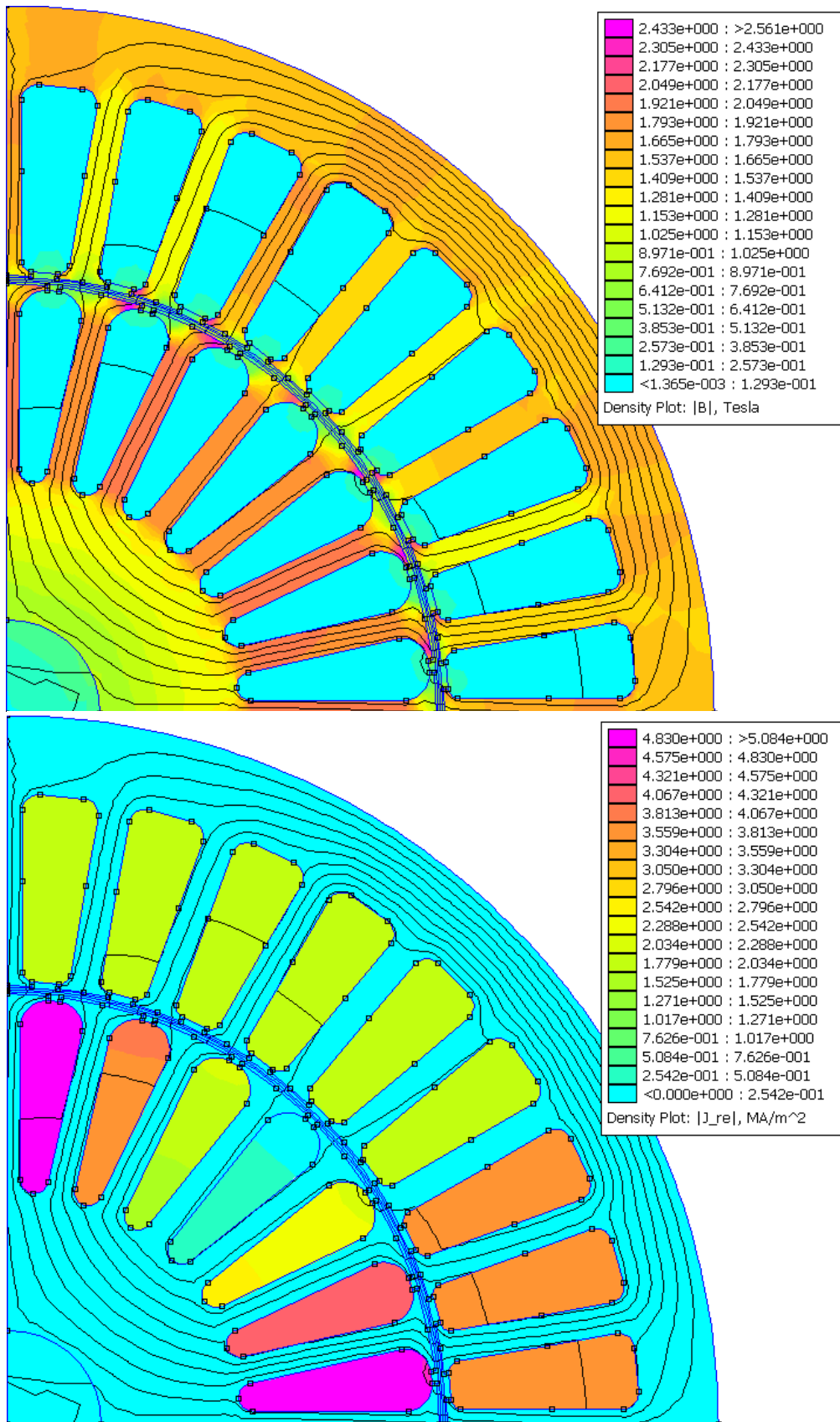
Πρώτη μεταβολή στη γεωμετρία είναι η αύξηση του πλάτους των δοντιών του σάτη. Για την απόφαση αυτή συμβάλλουν δύο λόγοι. Αφενός η ροπή στα δόντια είναι πολύ έντονη και αφετέρου η πυκνότητα ροής ρεύματος στα αυλάκια έχει περιθώριο αύξησης.

Αυξάνεται το πλάτος του δοντιού του σάτη bts από 2.5mm έως 4.5mm όπως φαίνεται στο γράφημα του **Σχήματος 3.12**. Φαίνεται επίσης η αντίστοιχη μεταβολή της ροπής κατά την αύξηση του πλάτους του δοντιού του σάτη.



Σχήμα 3.12 Μεταβολή της ροπής σε σχέση με το πλάτος δοντιού στάτη

Η τιμή που επιλέγεται είναι η $bts=3.6\text{mm}$ (έναντι του 2.5mm της προκαταρκτικής) για την οποία η ροπή σχεδόν μεγιστοποιείται. Δεν επιλέγεται κάποια μεγαλύτερη ώστε να μην επιβαρυνθεί η αύλακα με αυξημένη πυκνότητα ρεύματος. Επομένως για $bts=3.6\text{mm}$ παράγονται τα παρακάτω αποτελέσματα μαγνητικής επαγωγής και πυκνότητας ρεύματος του **Σχήματος 3.13**. Η αύξηση της ροπής που επιτυγχάνεται είναι της τάξης του 6.5%.

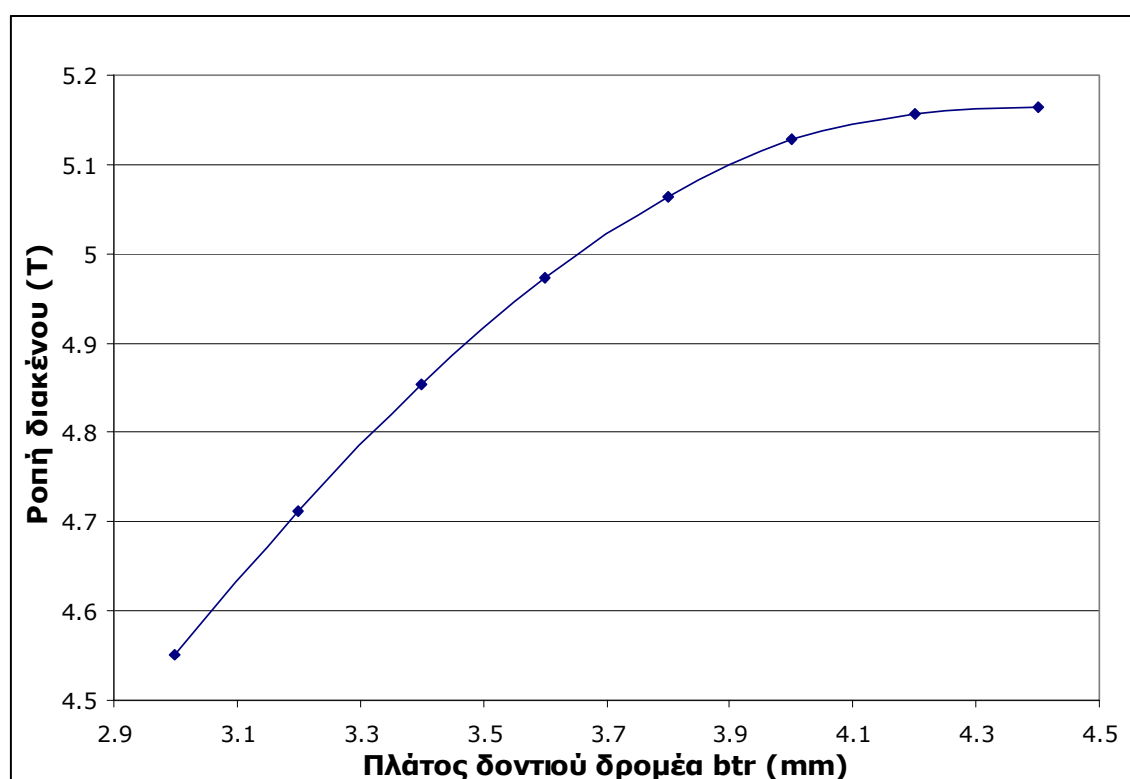


Σχήμα 3.13 Μέτρο μαγνητικής επαγωγής (πάνω) και πυκνότητα ρεύματος (κάτω) μετά τη μεταβολή του bts

Από τα αποτελέσματα του **Σχήματος 3.13** φαίνεται πως περιορίζεται σημαντικά η πυκνότητα ροής στα δόντια του στάτη και επιπλέον παρουσιάζονται μεγαλύτερες πυκνότητες ρεύματος στο στάτη (απολύτως ανεκτές) ως αποτέλεσμα της μείωσης του εμβαδού της αύλακας.

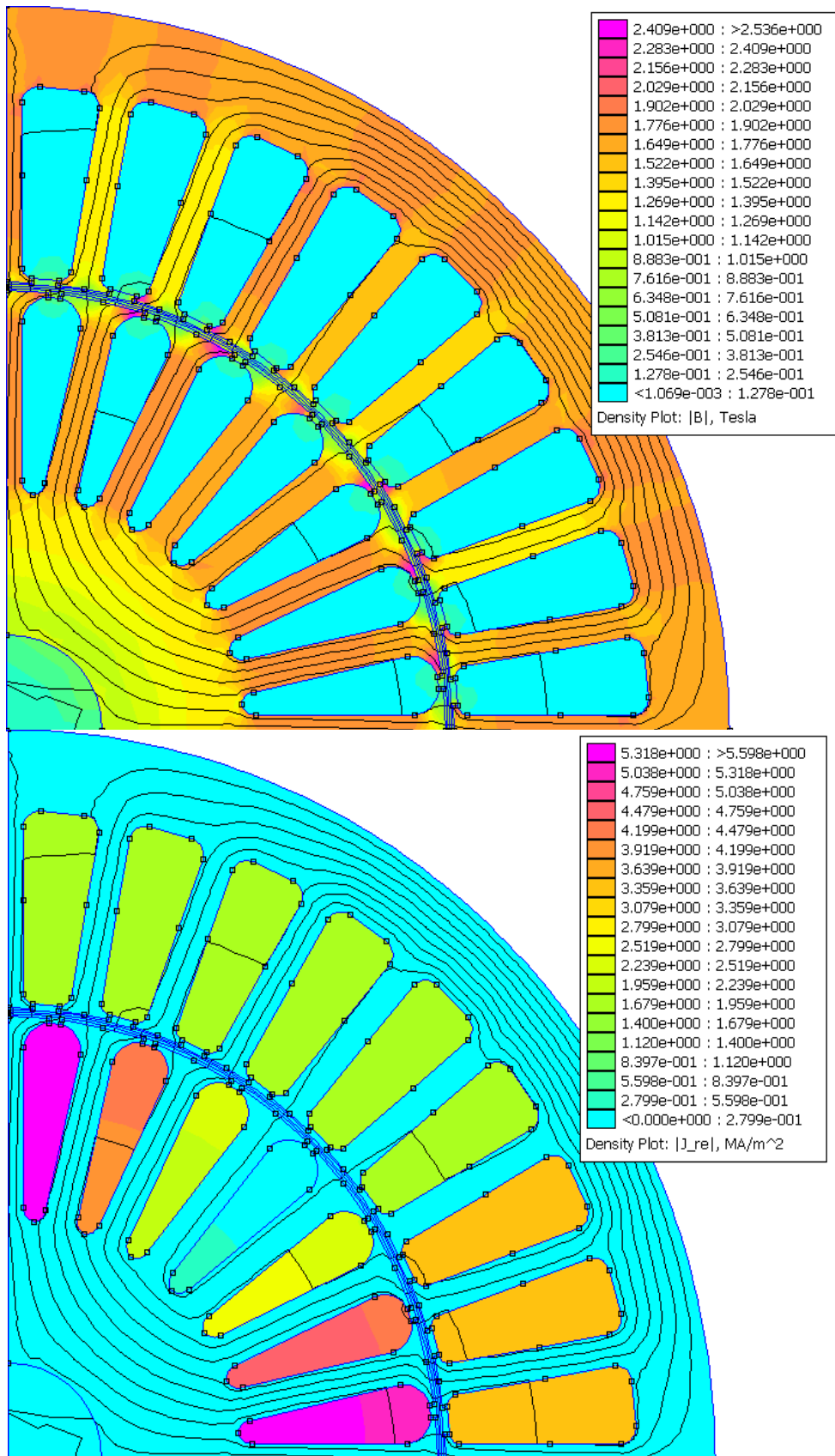
β) btr : πλάτος δοντιού δρομέα

Διατηρώντας την τιμή για το πλάτος του δοντιού στάτη που προέκυψε από το προηγούμενο βήμα, μεταβάλλεται τώρα το πλάτος του δοντιού του δρομέα. Στο γράφημα του **Σχήματος 3.14** καταγράφεται η ροπή.



Σχήμα 3.14 Μεταβολή της ροπής σε σχέση με το πλάτος δοντιού δρομέα

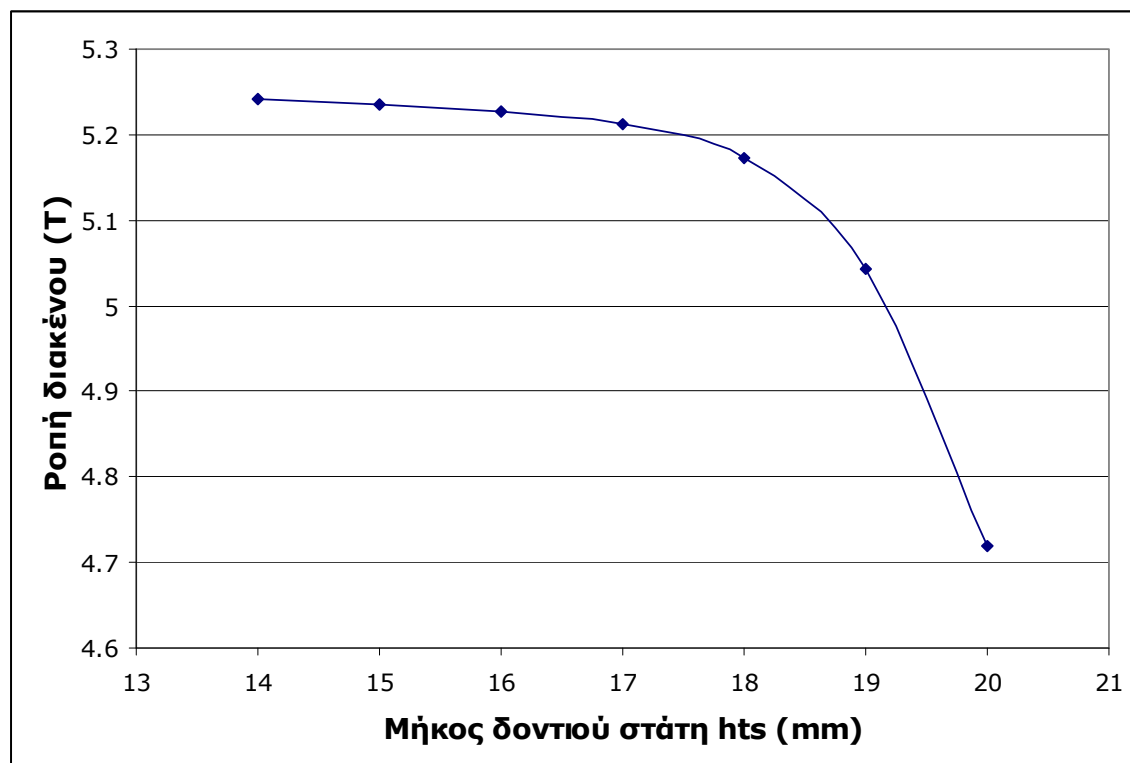
Η τιμή που είχε προκύψει από την προκαταρκτική σχεδίαση είναι 3.2mm. Επιλέγεται $btr=3.8mm$. Με αυτή μόνο τη μεταβολή επιτυγχάνεται αύξηση της ροπής κατά 7.5%. Η νέα κατάσταση φόρτισης του κινητήρα φαίνεται στο **Σχήμα 3.15**.



Σχήμα 3.15 Μέτρο μαγνητικής επαγωγής (πάνω) και πυκνότητα ρεύματος (κάτω) μετά τη μεταβολή του btr

Από τη μελέτη του **Σχήματος 3.15** προκύπτει ότι ροή στα δόντια του δρομέα περιορίζεται εμφανώς χωρίς να αναπτύσσεται μεγάλη πυκνότητα ρεύματος στα αυλάκια του δρομέα.

γ) hts : μήκος δοντιού στάτη

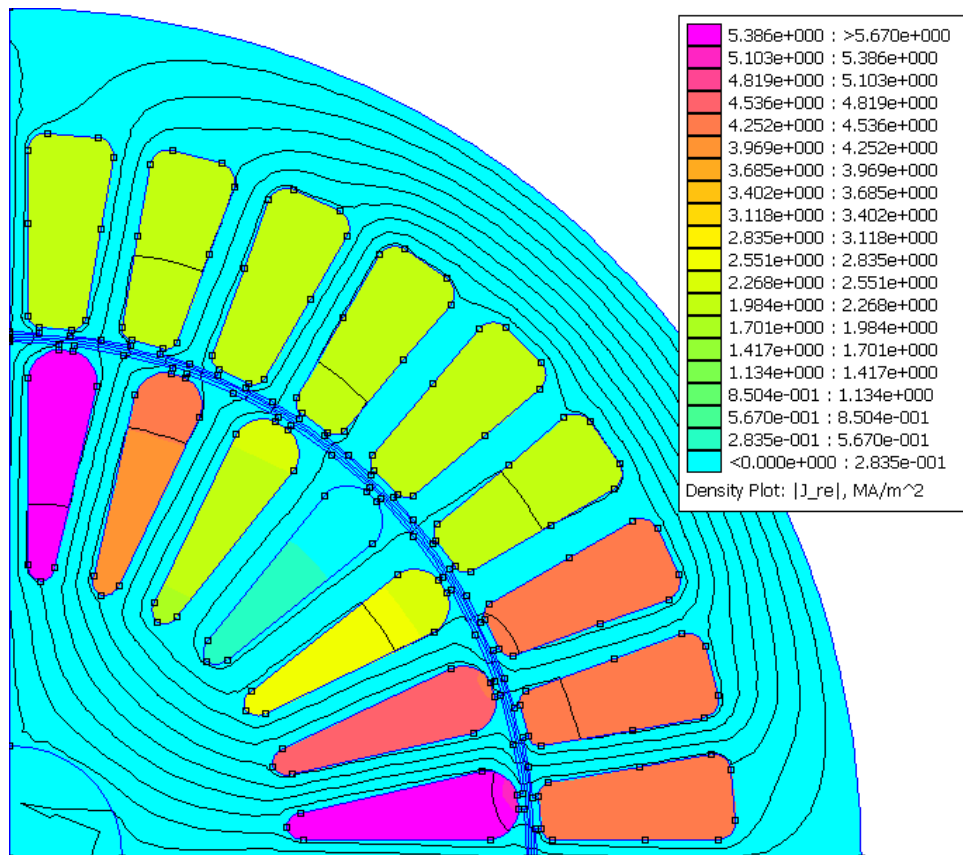
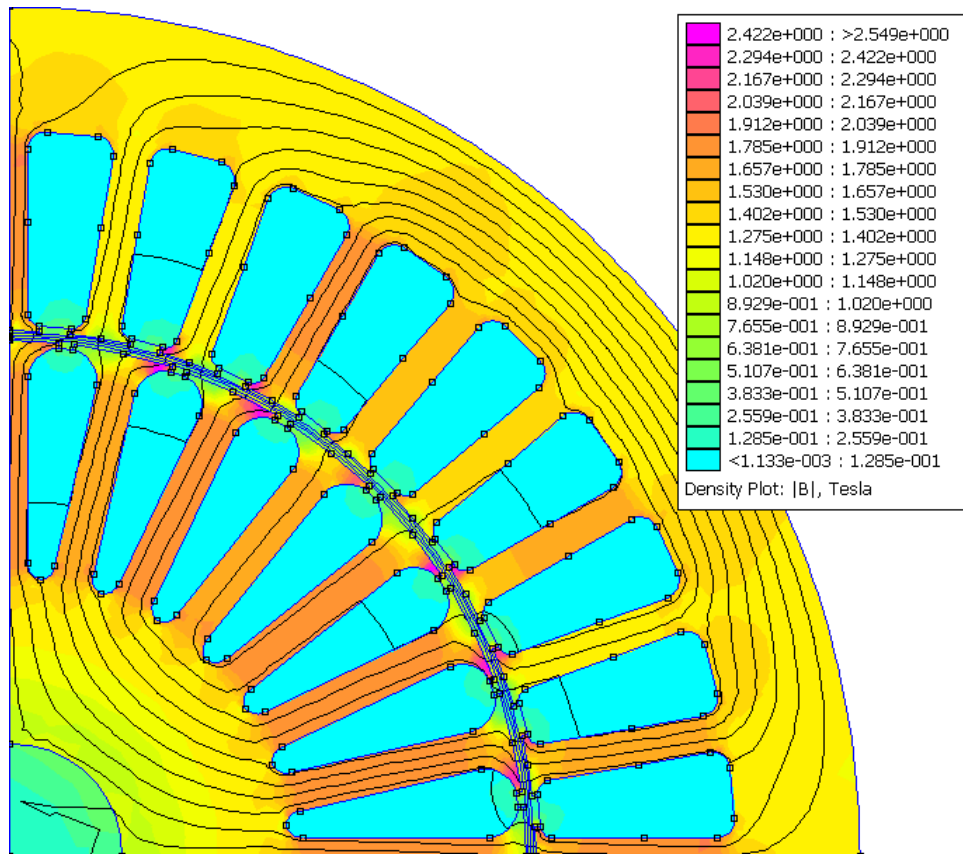


Σχήμα 3.16 Μεταβολή της ροπής σε σχέση με το μήκος δοντιού στάτη

Παρατηρείται στο γράφημα του **Σχήματος 3.16** πως καθώς το μήκος δοντιού του στάτη αυξάνει, έχει μικρή επίπτωση στη ροπή. Αυτό ισχύει μέχρι κάποιο μήκος όπου παρουσιάζεται ένα γόνατο και ξεκινά απότομη πτώση της ροπής. Αυτό συμβαίνει διότι αυξάνει η αντίδραση σκέδασης περιορίζοντας τη ροπή.

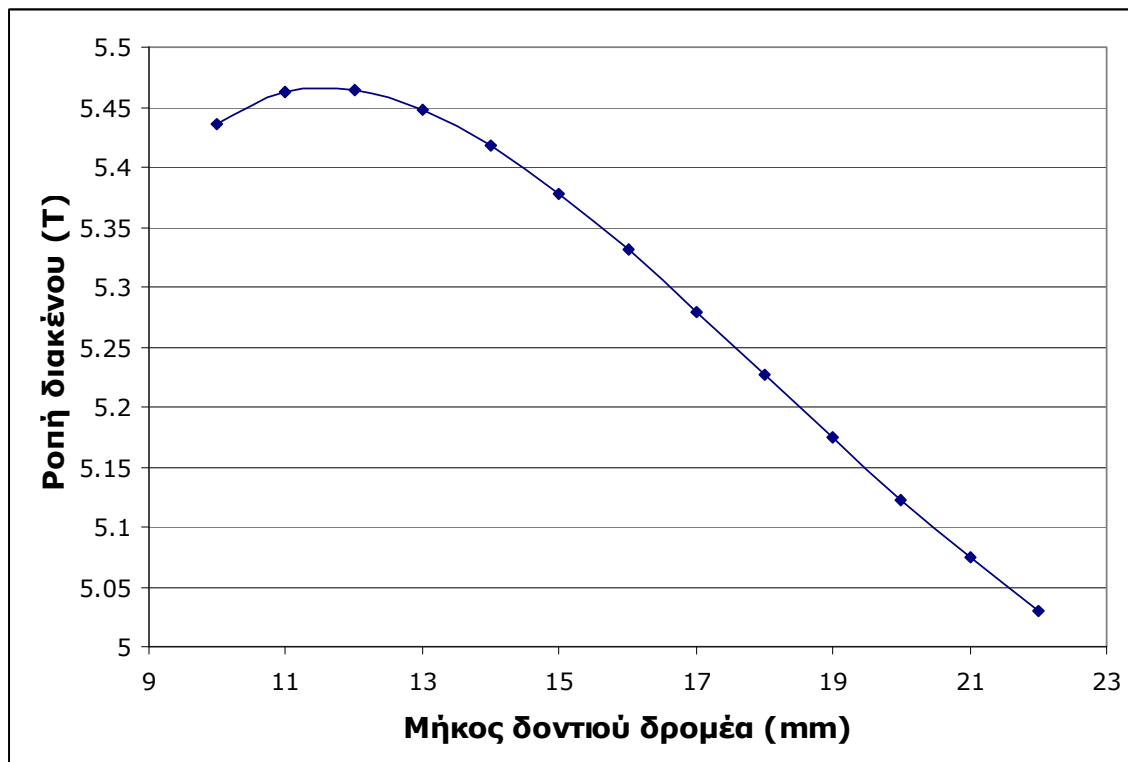
Επιλέγεται λοιπόν $hts=16\text{mm}$, μια τιμή πριν το γόνατο ώστε αφενός να επιτυγχάνεται μεγάλη ροπή και αφετέρου να μην μειώνεται πολύ το εμβαδό της αύλακας, πράγμα που θα προκαλούσε αυξημένη πυκνότητα ρεύματος. Η μεταβολή του μήκους από την αρχική τιμή (18.9mm) σε αυτή που επιλέχθηκε (16mm) προκάλεσε στη ροπή αύξηση 3.6%.

Η πεδιακή ανάλυση του κινητήρα με αυτή τη γεωμετρία παρατίθεται στο **Σχήμα 3.17**.



Σχήμα 3.17 Μέτρο μαγνητικής επαγωγής (πάνω) και πυκνότητα ρεύματος (κάτω) μετά τη μεταβολή του h_{ts}

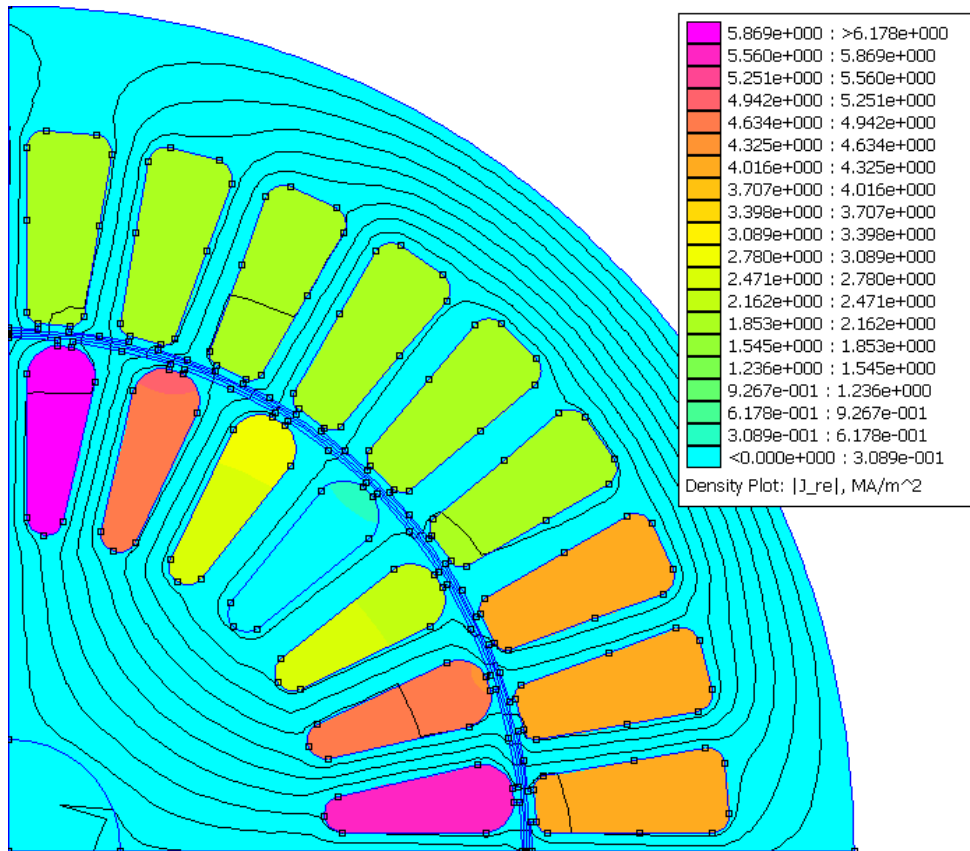
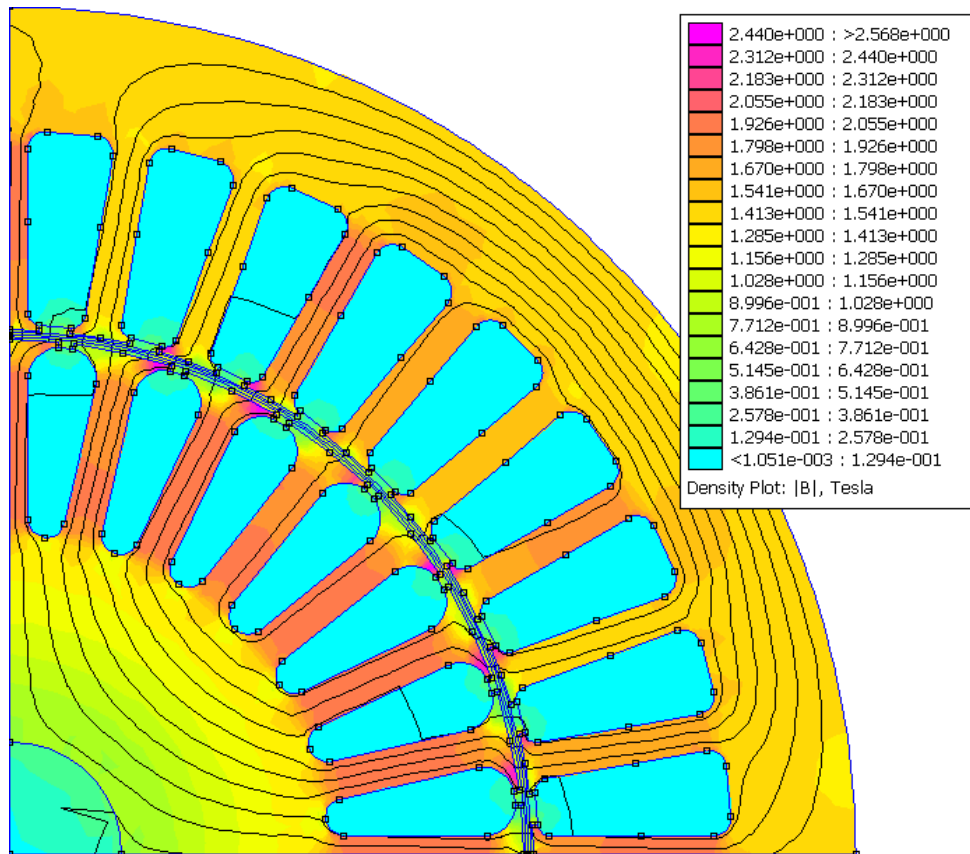
δ) h_{tr} : μήκος δοντιού δρομέα



Σχήμα 3.18 Μεταβολή της ροπής σε σχέση με το μήκος δοντιού δρομέα

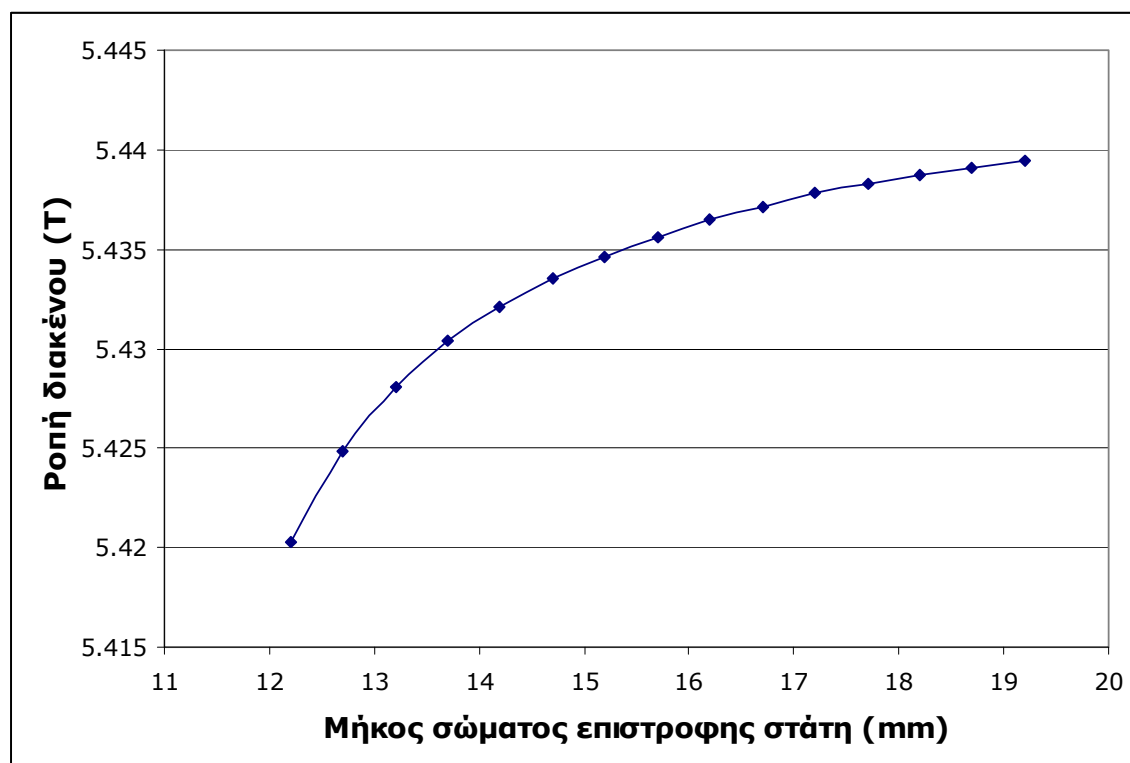
Με όμοιο τρόπο μεταβάλλεται το μήκος των δοντιών του δρομέα γύρω από την τιμή της προκαταρκτικής σχεδίασης $h_{tr}=15.5\text{mm}$ (**Σχήμα 3.18**). Επιλέγεται τιμή $h_{tr}=14\text{mm}$ ώστε να αυξηθεί η ροπή χωρίς να μειωθεί κατά πολύ το εμβαδό της αύλακας του δρομέα. Επιτυγχάνεται αύξηση της ροπής κατά 1.3%.

Στο **Σχήμα 3.19** φαίνεται η ανάλυση του κινητήρα.



Σχήμα 3.19 Μέτρο μαγνητικής επαγωγής (πάνω) και πυκνότητα ρεύματος (κάτω)

ε) hcs : μήκος σώματος επιστροφής στάτη



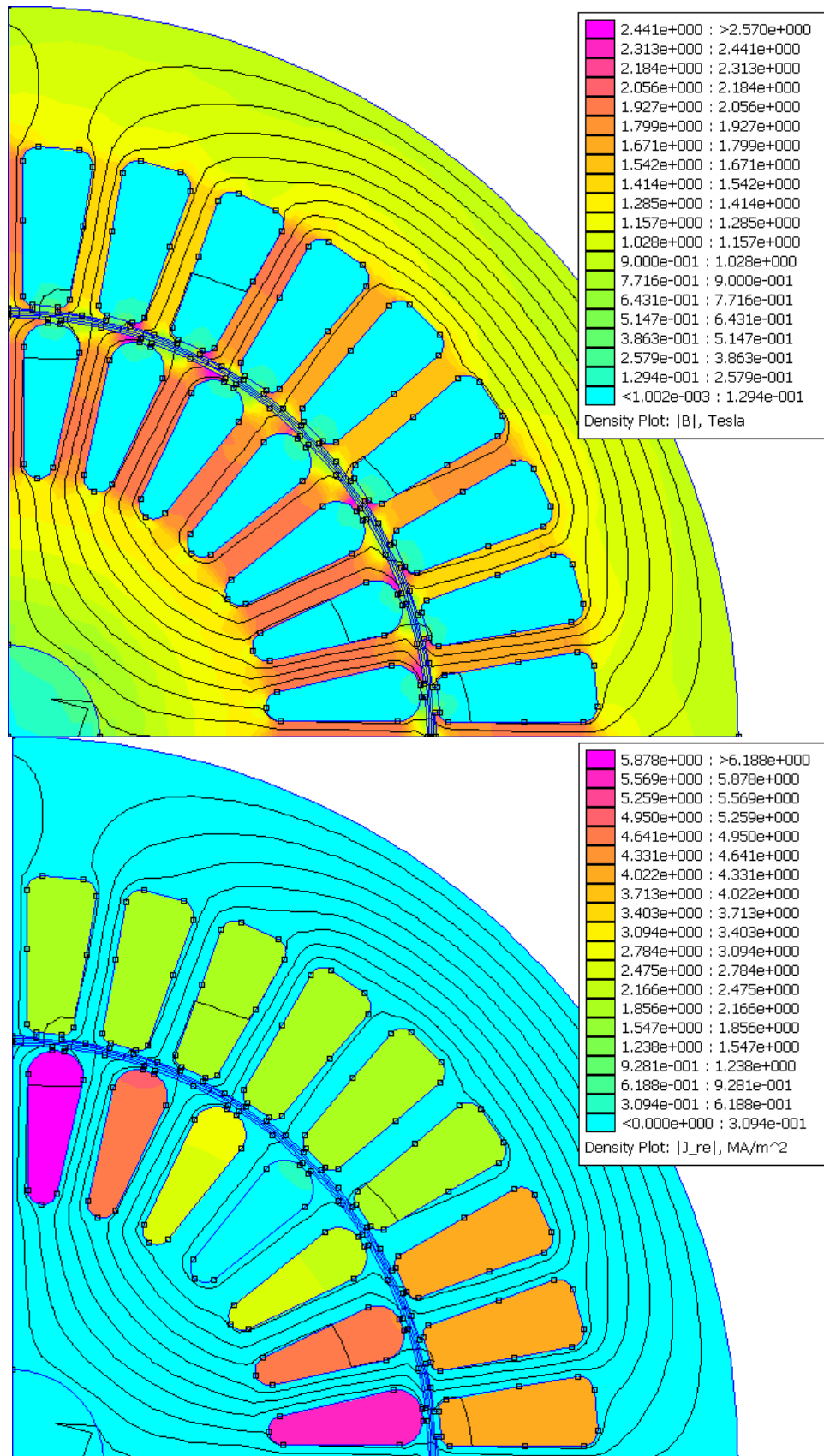
Σχήμα 3.20 Μεταβολή της ροπής σε σχέση με το μήκος του σώματος επιστροφής του στάτη

Παρατηρώντας ότι η πυκνότητα μαγνητικής ροής στο σώμα επιστροφής του στάτη (hcs) είναι αρκετά μεγαλύτερη από 1T, που τέθηκε ως σχεδιαστική προδιαγραφή, μεταβάλλεται το μήκος του ώστε να φτάσει στα επιθυμητά επίπεδα.

Επιλέγεται $hcs=16.7\text{mm}$.

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.20** η μεταβολή του hcs δεν έχει κάποια σημαντική επίπτωση στη ροπή (ανεπαίσθητη αύξηση). Η επιλογή γίνεται με σκοπό τη μείωση της πυκνότητας ροής στο σώμα του στάτη.

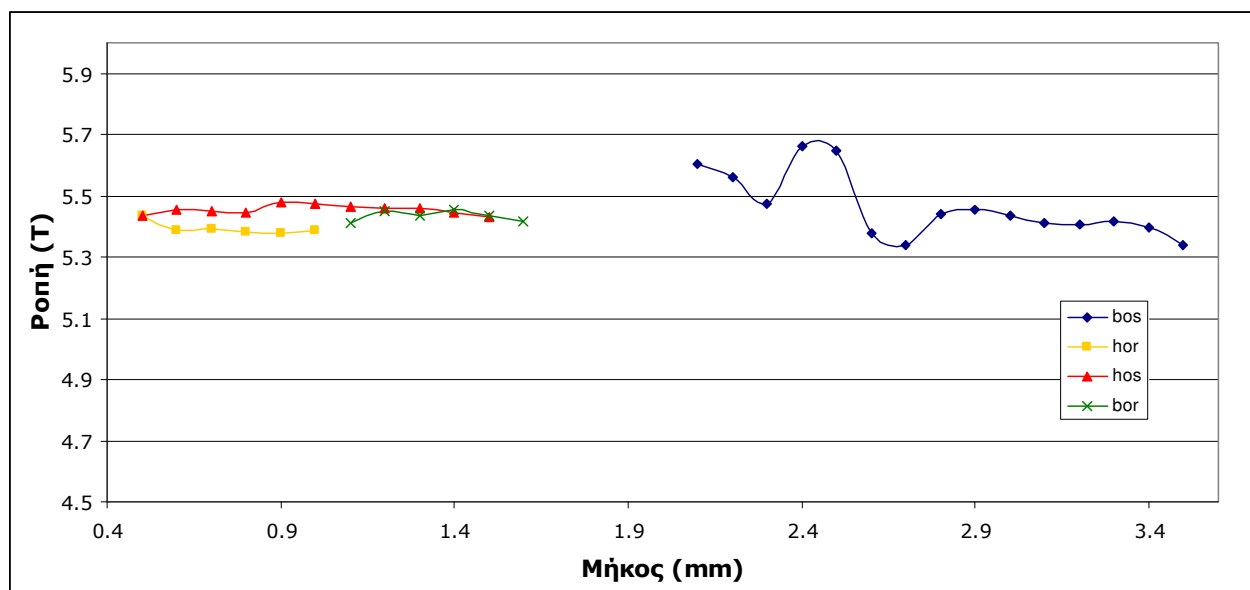
Στο **Σχήμα 3.21** φαίνεται η ανάλυση του κινητήρα.



Σχήμα 3.21 Μέτρο μαγνητικής επαγωγής (πάνω) και πυκνότητα ρεύματος (κάτω) μετά και τη μεταβολή του h_{cs}

στ) Μεταβολή διαστάσεων ανοίγματος αύλακας στάτη και δρομέα

Στα διαγράμματα του **Σχήματος 3.22** φαίνεται η μεταβολή της ροπής με μεταβολή των μεγεθών bos, bor, hos και hor.

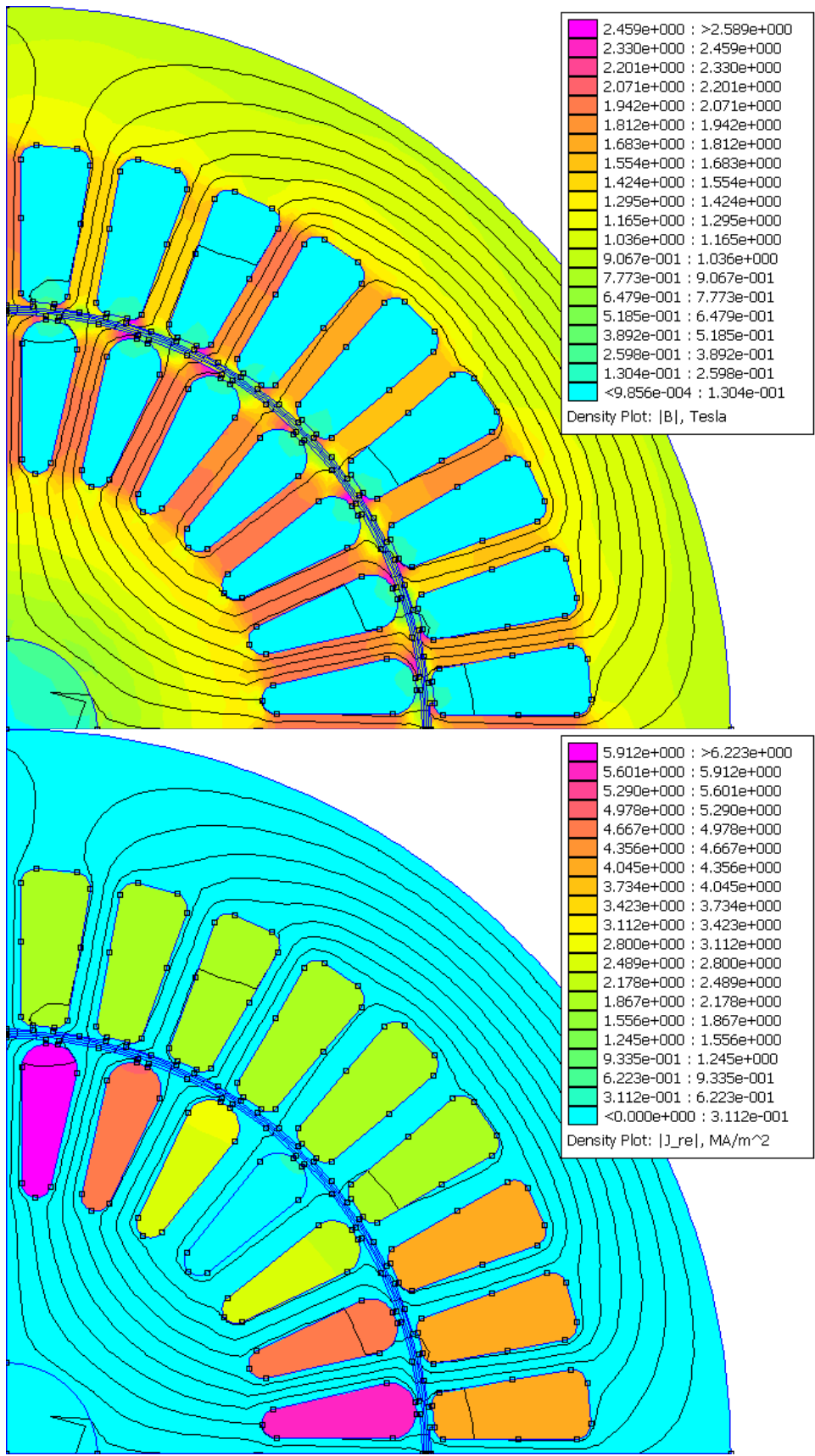


Σχήμα 3.22 Μεταβολή της ροπής σε σχέση με τις διαστάσεις ανοίγματος των αυλάκων

Παρατηρείται πως μεταβολές στη ροπή προκαλεί μόνο το πλάτος του ανοίγματος της αύλακας του στάτη. Επιλέγεται bos=2.5mm, τιμή κοντά στην τιμή της προκαταρκτικής αλλά που να αυξάνει τη ροπή, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.22**.

Αξίζει να σημειωθεί πως οι καμπύλες της μεταβολής της ροπής συναρτήσει των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ανοιγμάτων των αυλάκων δεν είναι μονότονη όπως ήταν στις άλλες παραμέτρους. Οι καμπύλες παρουσιάζουν μη ομαλές αλλαγές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι διαστάσεις ανοίγματος των αυλάκων επηρεάζουν πολύ τις αρμονικές χώρου του πεδίου. Έτσι μικρές αλλαγές μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές αλλαγές στην παραγόμενη ροπή.

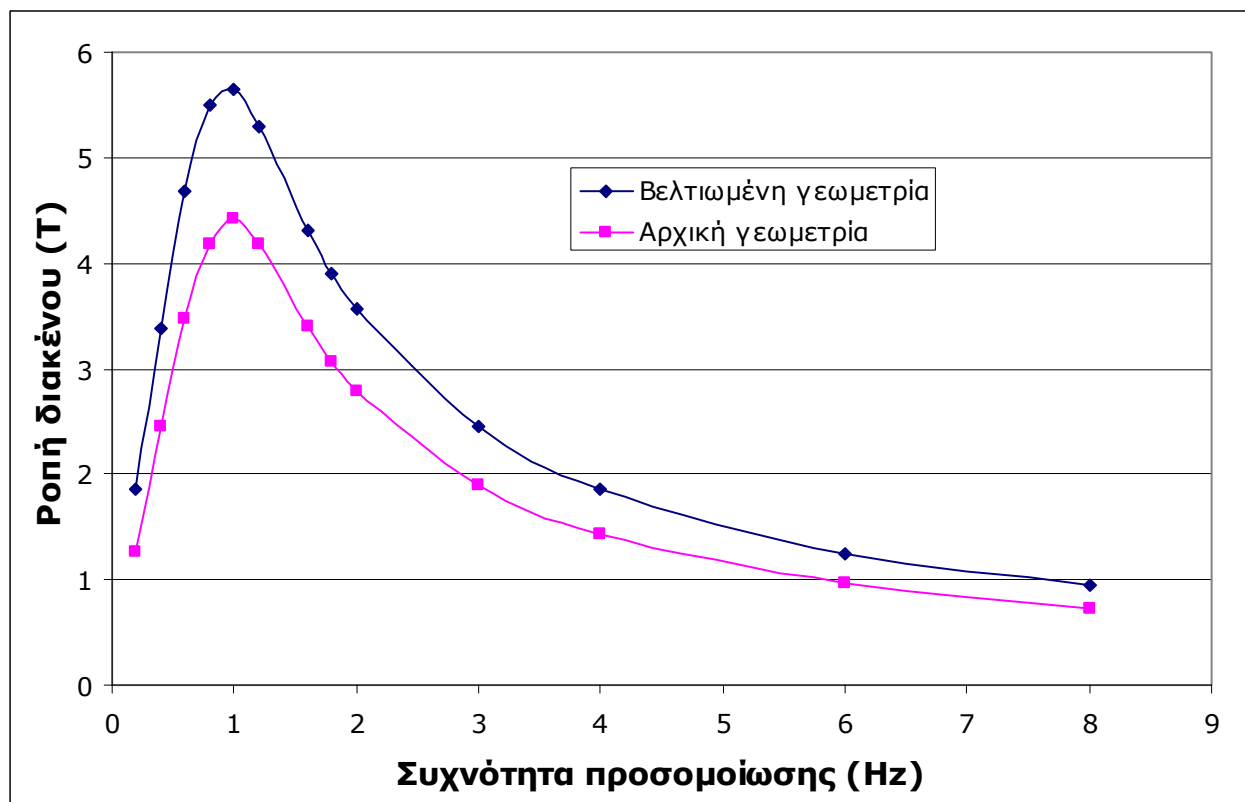
Η πεδιακή ανάλυση της βελτιωμένης γεωμετρίας φαίνεται στο **Σχήμα 3.23**.



Σχήμα 3.23 Μέτρο μαγνητικής επαγωγής (πάνω) και πυκνότητα ρεύματος (κάτω) μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης

3.3.2 Αποτελέσματα

Με τη βελτιωμένη γεωμετρία αναζητούμε πάλι τη συχνότητα που μεγιστοποιεί τη ροπή διότι ενδέχεται να έχει αλλάξει. Προκύπτει η καμπύλη ροπής συχνότητας του **Σχήματος 3.24** και συγκρίνεται με την αντίστοιχη προ της βελτίωσης της γεωμετρίας.



Σχήμα 3.24 Συγκριτική καμπύλη ροπής - συχνότητας πριν και μετά τη βελτίωση της γεωμετρίας

Παρατηρείται πως σε όλο το εύρος συχνοτήτων η παραγόμενη ροπή αυξήθηκε. Συγκεκριμένα η μέγιστη ροπή αυξήθηκε κατά 25%. Επίσης, η μέγιστη ροπή εμφανίζεται στην ίδια συχνότητα, δηλαδή 1Hz.

Στον **Πίνακα 3.1** φαίνονται συγκεντρωτικά οι τιμές των γεωμετρικών παραμέτρων πριν και μετά τη βελτιστοποίηση καθώς επίσης και η ποσοστιαία αύξηση της ροπής που κάθε αλλαγή προκάλεσε.

Γεωμετρική παράμετρος	Τιμή πριν τη βελτιστοποίηση	Τιμή μετά τη βελτιστοποίηση	Αύξηση ροπής
bts (πλάτος δοντιού στάτη)	2.5mm	3.6mm	6.5%
btr (πλάτος δοντιού δρομέα)	3.2mm	3.8mm	7.5%
hts (μήκος δοντιού στάτη)	18.9mm	16mm	3.6%
htr (μήκος δοντιού δρομέα)	15.5mm	14mm	1.3%
hcs (μήκος σώματος επιστροφής στάτη)	15.8mm	16.7mm	0%
bos (πλάτος ανοίγματος αύλακας στάτη)	3mm	2.5mm	3.9%
bor (πλάτος ανοίγματος αύλακας δρομέα)	1.5mm	1.5mm	-
hos (μήκος ανοίγματος αύλακας στάτη)	0.5mm	0.5mm	-
hor (μήκος ανοίγματος αύλακας δρομέα)	1.5mm	1.5mm	-

Πίνακας 3.1 Αρχικές και τελικές τιμές γεωμετρικών παραμέτρων και αντίστοιχη αύξηση της ροπής

Τέλος, προκειμένου να συγκριθεί η ευαισθησία της ροπής στη μεταβολή κάθε παραμέτρου με άμεσο τρόπο, εισάγεται η ευαισθησία της ροπής ως προς κάποια παράμετρο ως η ποσοστιαία μεταβολή της ροπής σε 1% μεταβολή της παραμέτρου αυτής. Έτσι, ανεξάρτητα από την τάξη μεγέθους των τιμών των παραμέτρων, είναι εφικτή η σύγκριση της ευαισθησίας που έχει η ροπή σε μεταβολή αυτών.

Προκύπτει λοιπόν ο **Πίνακας 3.2** που συγκεντρώνει ευαισθησία της ροπής σε κάθε γεωμετρική παράμετρο.

Γεωμετρική παράμετρος	Ευαισθησία ροπής
bts (πλάτος δοντιού στάτη)	0.25
btr (πλάτος δοντιού δρομέα)	0.43
hts (μήκος δοντιού στάτη)	0.32
htr (μήκος δοντιού δρομέα)	0.14
hcs (μήκος σώματος επιστροφής στάτη)	0.005
bos (πλάτος ανοίγματος αύλακας στάτη)	1.32
bor (πλάτος ανοίγματος αύλακας δρομέα)	0.04
hos (μήκος ανοίγματος αύλακας στάτη)	0.05
hor (μήκος ανοίγματος αύλακας δρομέα)	0.06

Πίνακας 3.2 Ελαστικότητα της ροπής στη μεταβολή κάθε γεωμετρικής παραμέτρου

Όσο μεγαλύτερη η τιμή της ευαισθησίας ως προς μία παράμετρο τόσο περισσότερο η μεταβολή της παραμέτρου επηρεάζει την τιμή της ροπής. Επειδή οι καμπύλες δεν είναι γραμμικές, σε κάθε σημείο ορίζεται και μια τιμή της ευαισθησίας. Για τις παραμέτρους που η ροπή μεταβάλλεται μονότονα, μια μέση τιμή της ευαισθησίας είναι επαρκής για να δώσει την πληροφορία που ζητείται. Τέτοιες παράμετροι είναι οι *bts*, *btr*, *hts*, *htr* και *hcs*. Για τις άλλες (*bos*, *bor*, *hos*, *hor*) ροπή δεν μεταβάλλεται μονότονα, χρησιμοποιείται η μέγιστη τιμή της ευαισθησίας. Έτσι προκύπτει η μεγάλη ευαισθησία της ροπής ως προς την παράμετρο *bos*.

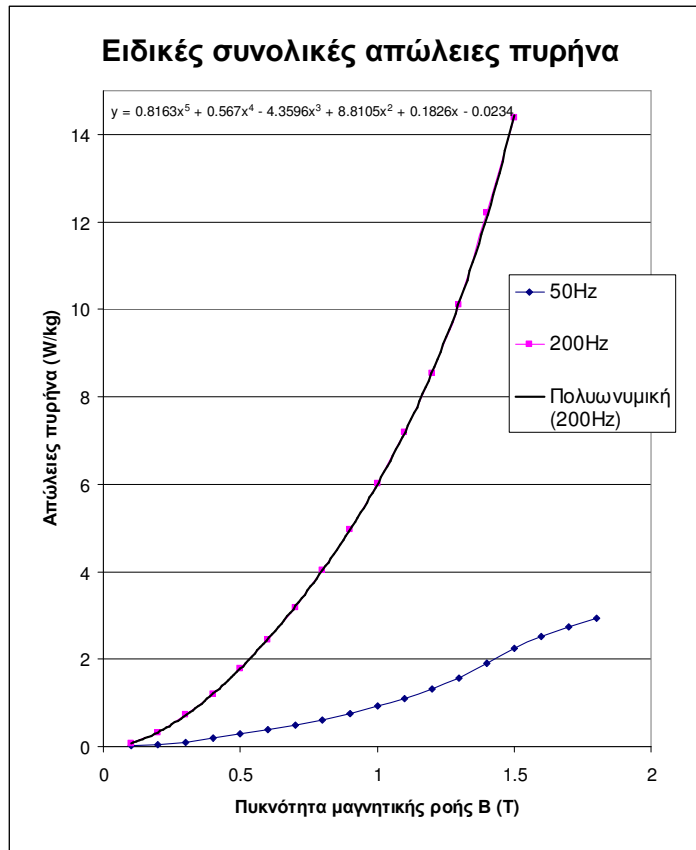
Με τα παραπάνω υπόψη, εξάγεται το συμπέρασμα πως οι διαστάσεις των δοντιών στάτη και δρομέα έχουν έντονη επίδραση στην τιμή της ροπής. Επιπλέον το άνοιγμα των δοντιών του στάτη μπορεί με μικρές αλλαγές να προκαλέσει αναλογικά σημαντικές μεταβολές στη ροπή, αλλά σε απόλυτα μεγέθη συγκρίσιμες με αυτές των άλλων παραμέτρων. Τέλος, το μήκος του σώματος επιστροφής του στάτη και οι υπόλοιπες διαστάσεις των ανοιγμάτων των αυλάκων φαίνεται να προκαλούν αμελητέες μεταβολές στη ροπή.

3.4 Υπολογισμός απωλειών και άλλα χαρακτηριστικά

3.4.1 Απώλειες πυρήνα

Ο υπολογισμός των απωλειών πυρήνα δεν είναι απλή διαδικασία. Για μια προσέγγιση των απωλειών πυρήνα της μηχανής γίνεται χρήση της καμπύλης ειδικών απωλειών του σιδήρου που δίνεται από την κατασκευαστή. Το FEMM επιτρέπει την πρόσβαση στα αποτελέσματα κάθε στοιχείου ξεχωριστά. Έτσι, κρατώντας την τιμή της πυκνότητας της μαγνητικής ροής (B) σε κάθε στοιχείο, μπορούμε αντλώντας στοιχεία την καμπύλη ειδικών απωλειών (**Σχήμα 3.25**) να υπολογίσουμε τις απώλειες σιδήρου σε κάθε στοιχείο ξεχωριστά. Αθροίζοντας τις επιμέρους απώλειες, προκύπτει μια προσέγγιση των συνολικών απωλειών στητή και δρομέα.

Οι απώλειες πυρήνα οφείλονται στην υστέρηση και στα δινορρέυματα. Και τα δύο αυτά φαινόμενα έχουν έντονη εξάρτηση από τη συχνότητα. Συγκεκριμένα όσο μεγαλύτερη η συχνότητα των πεδίων, τόσο σημαντικότερες και οι απώλειες που προκαλούν. Οι κατασκευαστές των μαγνητικών λαμαρινών συνήθως παρέχουν την καμπύλη απωλειών για τυπικές συχνότητες (50 ή 60 Hz). Στην παρούσα εφαρμογή όμως, οι συχνότητες των πεδίων στη μέγιστη ταχύτητα είναι πολλαπλάσιες (200Hz). Για το λόγο αυτό αναζητήθηκε η καμπύλη απωλειών στα 200Hz ως πιο αντιπροσωπευτική (**Σχήμα 3.25**).



Σχήμα 3.25 Ειδικές συνολικές απώλειες πυρήνα μαγνητικής λαμαρίνας M235-35A στα 50Hz και 200Hz

Αφού η καμπύλη ειδικών απωλειών του πυρήνα στα 2000Hz προσεγγίστηκε με ένα πολυώνυμο 5^{ου} βαθμού (**Σχήμα 3.25**), μια διαδικασία του matlab (Παράρτημα Α) ανέλαβε τον υπολογισμό των απωλειών μέσω της σχέσης:

$$P_{Fe} = \sum_{i=1}^m P_{ειδ,i} \cdot S_i \cdot L \cdot \rho \quad (3.16)$$

όπου,

$P_{ειδ,i}$ οι ειδικές απώλειες του στοιχείου i , που προκύπτουν από την καμπύλη ειδικών απωλειών για την πυκνότητα μαγνητικής ροής του στοιχείου i , σε W/kg

S_i το εμβαδό του στοιχείου i , σε mm²

L το ενεργό μήκος της μηχανής, σε mm, και
 ρ , η πυκνότητα του υλικού, σε kg/mm².

Οι απώλειες πυρήνα του στάτη είναι 26.4W.

Οι απώλειες πυρήνα του δρομέα είναι αμελητέες διότι η συχνότητα των πεδίων εκεί είναι μόλις 1Hz. [16], [17]

3.4.2 Ωμικές απώλειες

α) απώλειες χαλκού στάτη

Η ωμική αντίσταση ανά φάση του τυλίγματος του στάτη R_s δίνεται από τη σχέση:

$$R_s = \frac{l}{\sigma \cdot S} \quad (3.17)$$

όπου,

l το μήκος των αγωγών του στάτη (συμπεριλαμβανομένων των τερματικών συνδέσεων),

$\sigma = 4.8 \cdot 10^7 \text{ Sm}^{-1}$ η αγωγιμότητα του χαλκού στους 80°C και

S η διατομή του αγωγού που χρησιμοποιείται.

Με δεδομένο το ρεύμα γραμμής $I=16.34\text{A}$ που έχει υπολογιστεί, επιλέγεται αγωγός διατομής $S = 2.5\text{mm}^2$.

Το ενεργό μήκος των συνδέσεων των τυλιγμάτων του στάτη L_{ew} δίνεται από τη σχέση

$$L_{ew} = (0.083p + 1.217) \frac{pD + y_1}{2p} + 0.02 \quad (3.18)$$

όπου D η διάμετρος διακένου,

p τα ζεύγη πόλων και

y_1 το συνολικό ύψος της αύλακας του στάτη.

Επομένως $L_{ew} = 0.0958\text{m}$.

Το συνολικό μήκος αγωγών του στάτη είναι $l = 2N_s L + 2N_s L_{ew} = 33.36\text{m}$

όπου N_s το πλήθος των ελιγμάτων ανά φάση ($N_s=144$).

Επομένως η ωμική αντίσταση ανά φάση του τυλίγματος του στάτη είναι:

$$R_s = 0.278\Omega.$$

Οι απώλειες του τυλίγματος του στάτη δίνονται από τη σχέση

$$P_{Cu,s} = 3I^2 R_s \quad (3.19)$$

Προκύπτει $P_{Cu,s} = 223\text{W}$.

Η τιμή των απωλειών είναι εξαιρετικά μεγάλη και αυτό οφείλεται στο μεγάλο μήκος τερματικών συνδέσεων του τυλίγματος στάτη. Επειδή η μηχανή είναι δισκοειδής το μήκος των τερματικών συνδέσεων είναι πολλαπλάσιο του ενεργού μήκους των πηνίων του στάτη. Συγκεκριμένα, το 83% των απωλειών αυτών οφείλονται στις τερματικές συνδέσεις. Για να περιοριστούν οι απώλειες αυτές μπορούν να αναζητηθούν διαφορετικού τύπου τυλίγματα

που διαθέτουν μικρότερο μήκος τερματικών συνδέσεων (π.χ. τυλίγματα που τυλίγονται γύρω από το κάθε δόντι του στάτη). [15]

β) απώλειες χαλκού δρομέα

Ο υπολογισμός των απωλειών Joule του δρομέα γίνεται ικανοποιητικά από το FEMM που υπολογίζει τα ρεύματα στην κατεύθυνση z και χρησιμοποιεί τη σχέση $i^2 R$.

Προκύπτει λοιπόν

$$P_{r,Joule} = 16.5W$$

Οι ωμικές απώλειες στάτη είναι ιδιαίτερα περιορισμένες όπως προβλέφθηκε λόγω της χρήσης βαθιών αυλάκων στο δρομέα.

3.4.3 Συνολικές απώλειες και απόδοση

Στον **Πίνακα 3.3** φαίνονται όλες οι απώλειες που υπολογίστηκαν:

πυρήνα (P_{core})	26.4W
χαλκού στάτη ($P_{cu,s}$)	223W
χαλκού δρομέα ($P_{cu,r}$)	16.5W

Πίνακας 3.3 Απώλειες που υπολογίστηκαν

Επίσης θεωρούνται μηχανικές απώλειες $P_{m,loss}$ τριβών, ανεμισμού και πρόσθετες μηχανικές, 2% της ισχύος εξόδου λόγω της υψηλής ταχύτητας περιστροφής.

$$P_{in} = P_{out} + P_{cu,r} + P_{cu,s} + P_{core} + P_{m,loss} \quad (3.20)$$

Έτσι υπολογίζεται η $P_{in} = 4118W$ και $P_{m,loss} = 82W$.

Η απόδοση του κινητήρα είναι:

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{cu,r} + P_{cu,s} + P_{core} + P_{m,loss}} \quad (3.21)$$

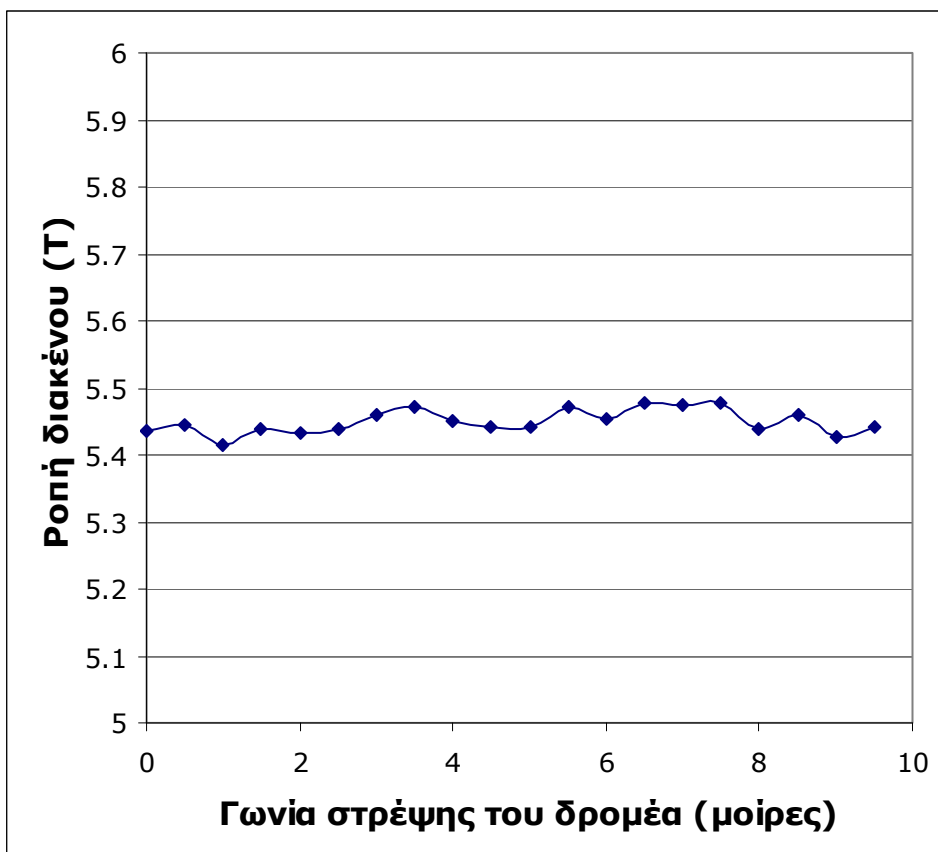
και προκύπτει

$$n = 0.92$$

Η απόδοση του κινητήρα που υπολογίστηκε θεωρείται πολύ ικανοποιητική.

3.4.4 Ροπή σε σχέση με τη θέση του δρομέα

Μεταβάλλοντας τη σχετική θέση στάτη δρομέα αναμένεται μικρή διακύμανση της παραγόμενης ροπής. Προκύπτει το γράφημα του **Σχήματος 3.26**.

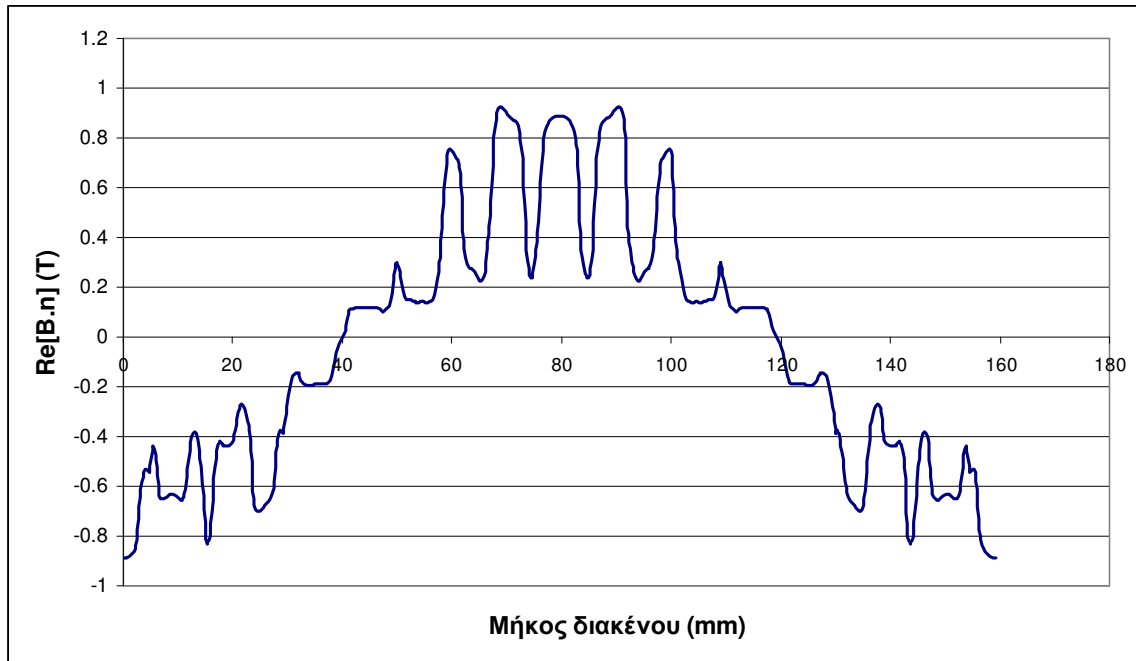


Σχήμα 3.26 Ροπή διακένου με μεταβολή της θέσης του δρομέα

Οι μεταβολή της ροπής σε σχέση με τη θέση του δρομέα είναι μικρή, της τάξης του 0.5%. Καθώς ο δρομέας αλλάζει θέση, μεταβάλλεται η γεωμετρία του μαγνητικού κυκλώματος και ως αποτέλεσμα επικρατούν άλλες αρμονικές χώρου που αλλάζουν τη συνολική ροπή.

3.4.5 Πυκνότητα μαγνητικής ροής κατά μήκος του διακένου

Στο **Σχήμα 3.27** φαίνεται το πραγματικό μέρος της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο. Όπως φαίνεται έχει έντονο αρμονικό περιεχόμενο που οφείλεται στη διαμόρφωση των αυλάκων του στάτη και του δρομέα.



Σχήμα 3.27 Πυκνότητα μαγνητικής ροής κατά μήκος του διακένου

Αναλύοντας τη κυματομορφή κατά Fourier προκύπτει το αρμονικό περιεχόμενο και η συμμετοχή κάθε αρμονικής. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον **Πίνακα 3.4**.

Τάξη αρμονικής	% συμμετοχή
1	67
3	2
5	6
7	3
13	11
15	8
17	14
19	8
35	5
37	4

Πίνακας 3.4 Αρμονικό περιεχόμενο μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο

Επικρατεί η θεμελιώδης αρμονική και είναι έντονη η παρουσία κάποιων ανώτερων αρμονικών (13^η, 15^η, 17^η, 19^η). Αυτό είναι αποτέλεσμα των αυλακώσεων του στάτη και του δρομέα που δημιουργούν ένα πολύπλοκο μαγνητικό κύκλωμα.

Κεφάλαιο 4

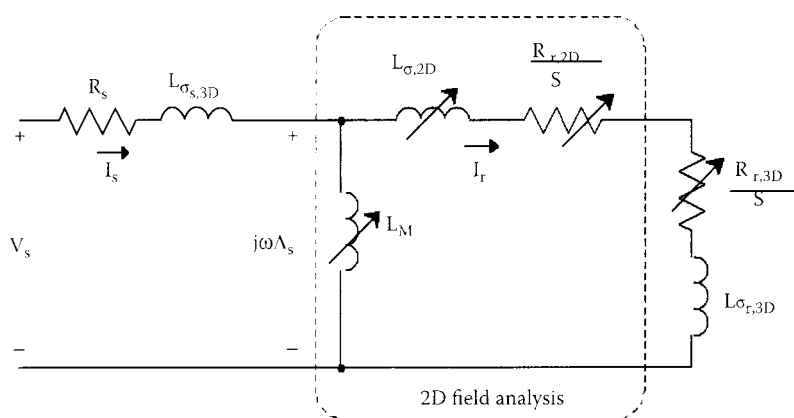
Χαρακτηριστικά επίδοσης κινητήρα επαγωγής

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η εξαγωγή των χαρακτηριστικών λειτουργίας του κινητήρα. Κατασκευάζεται ένα ισοδύναμο κύκλωμα μεταβλητών παραμέτρων που κρίνεται ικανοποιητικό για την ανάλυση της κανονικής λειτουργίας. Οι παράμετροι υπολογίζονται με αναλυτικές και αριθμητικές μεθόδους και οι καμπύλες ρεύματος και τάσης ως προς την ολίσθηση χαράσσονται.

4.1 Υπολογισμός παραμέτρων ισοδύναμου κυκλώματος

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων σε δύο διαστάσεις, αφήνει εκτός της ανάλυσης πολλά φαινόμενα που οφείλονται στην τρισδιάστατη φύση της γεωμετρίας. Για το λόγο αυτό προκειμένου να βγουν ασφαλή συμπεράσματα για τη λειτουργία του κινητήρα τα τρισδιάστατα φαινόμενα πρέπει να συμπεριληφθούν, και ο πιο εμφανής τρόπος είναι μέσω ενός ισοδύναμου κυκλώματος.

Θεωρείται λοιπόν το ισοδύναμο κύκλωμα μεταβλητών παραμέτρων του **Σχήματος 4.1**. Όπως φαίνεται οι παράμετροι που μπορούν να υπολογιστούν από 2-διάστατη (2D) ανάλυση βρίσκονται μέσα στο κουτί και οι παράμετροι που οφείλονται σε 3-διάστατα (3D) φαινόμενα είναι απ' έξω.



Σχήμα 4.1 Ισοδύναμο κύκλωμα μεταβλητών παραμέτρων τριφασικού κινητήρα επαγωγής. Επισημαίνονται οι παράμετροι που προσδιορίζονται από τη 2-διάστατη ανάλυση

Οι 2D παράμετροι δεν είναι σταθερές. Η αντίδραση μαγνήτισης L_M είναι συνάρτηση της πεπλεγμένης ροής του στάτη Λ_s , δεδομένου του κορεσμού, αν και αποδίδεται μόνο στον κορεσμό. Η συνολική αντίδραση σκέδασης $L_{\sigma, 2D}$ και η αντίσταση του δρομέα $R_{r, 2D}$ είναι συναρτήσεις της συχνότητας του δρομέα f_r , η οποία είναι ανάλογη της ολισθησης του δρομέα s , λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της κατανομής ρευμάτων στις μπάρες του δρομέα.

Αντίθετα οι παράμετροι που αντιστοιχούν στα 3D φαινόμενα θεωρούνται σταθερές. Η αντίσταση του τυλίγματος του στάτη R_s και η αντίδραση σκέδασης $L_{\sigma s, 3D}$ θεωρούνται ανεξάρτητα από την ανομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος. Παρόμοια και οι αντίστοιχες παράμετροι του δρομέα $R_{r, 3D}$ και $L_{\sigma r, 3D}$ θεωρούνται σταθερές. Λαμβάνουν υπόψη τους δακτυλίους βραχυκύκλωσης (end-rings) του δρομέα και την κλίση των αυλακιών (skewing). Υπολογίζονται αναλυτικά και χρησιμοποιούνται στο ισοδύναμο κύκλωμα. Οι

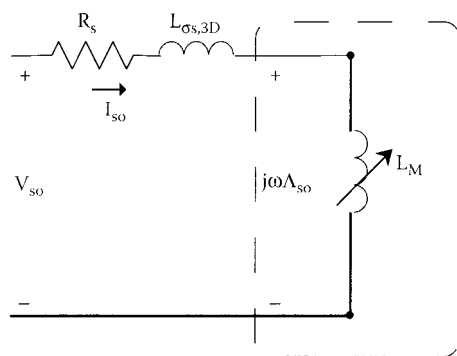
απώλειες σιδήρου δεν περιλαμβάνονται στο ισοδύναμο αυτό (γι' αυτό και δεν υπάρχει αντίσταση R_o που να αντιπροσωπεύει αυτές τις απώλειες).

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων μία σειρά από προσομοιώσεις είναι απαραίτητη. Πρακτικά γίνονται δύο δοκιμές της μηχανής:

- η δοκιμή κενού για τον προσδιορισμό της L_M , και
- η δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα για τις υπόλοιπες 2D παραμέτρους

4.1.1 Δοκιμή κενού φορτίου

Σκοπός της δοκιμής κενού φορτίου είναι ο προσδιορισμός της μη γραμμικής αντίδρασης μαγνήτισης L_M . Θεωρώντας της αρμονικές πεδίου αμελητέες και την ταχύτητα του δρομέα σύγχρονη με το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το τύλιγμα του στάτη (ολίσθηση $s=0$), τότε καθόλου ρεύματα δεν επάγονται στις μπάρες του δρομέα. Ο δρομέας είναι απλά ένα μέρος του μονοπατιού της μαγνητικής ροής. Έτσι μια μαγνητοστατική λύση είναι εφικτή. Το πεδιακό πρόβλημα είναι μη γραμμικό και περιγράφεται από χρονομεταβλητές ποσότητες. Για τη δοκιμή κενού φορτίου αντιστοιχεί το κύκλωμα του **Σχήματος 4.2**.

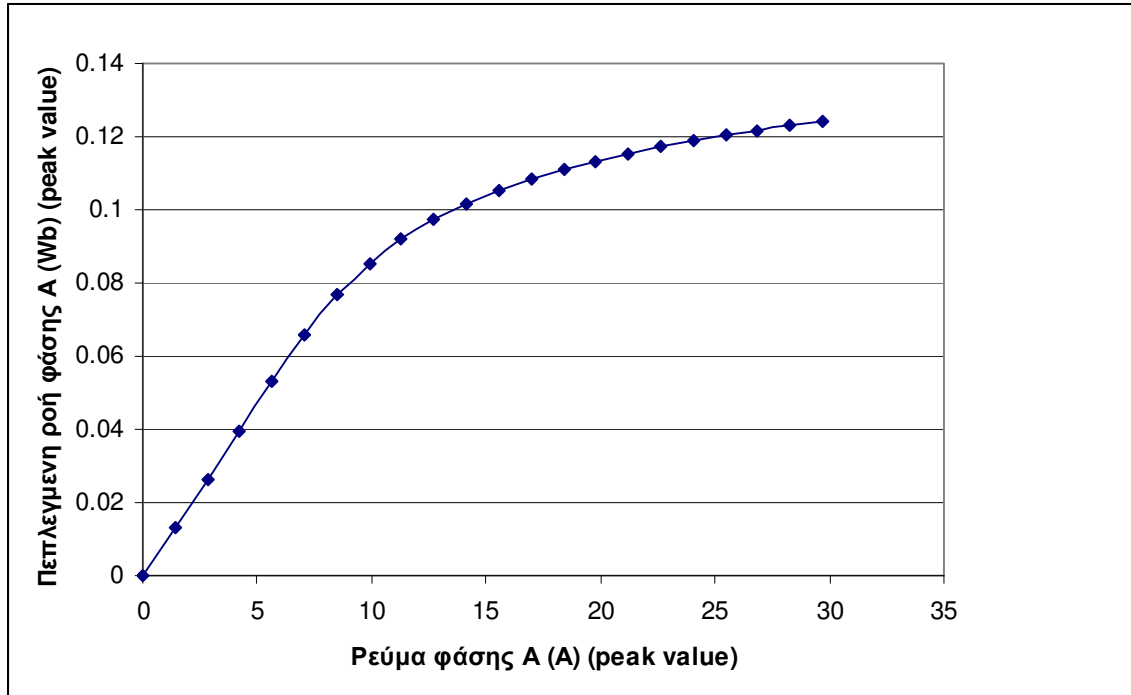


Σχήμα 4.2 Μείωση του ισοδύναμου κυκλώματος κατά τη δοκιμή κενού φορτίου

Το FEMM δίνει τη δυνατότητα απευθείας υπολογισμού της πεπλεγμένης ροής ανά φάση μέσω των κυκλωματικών υπολογισμών που κάνει. Η ροή μετράται στο κύκλωμα της φάσης A, στο οποίο τη χρονική στιγμή της προσομοίωσης το ρεύμα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του. Οπότε μεταβάλλοντας το ρεύμα από μηδέν έως και 130% του ονομαστικού και καταγράφοντας την πεπλεγμένη ροή κάθε φορά, προκύπτει η τιμή της αντίδρασης μαγνήτισης L_M ως εξής:

$$L_M(\Lambda_{so}) = \frac{\Lambda_{so}}{I_{so}} \quad (4.1).$$

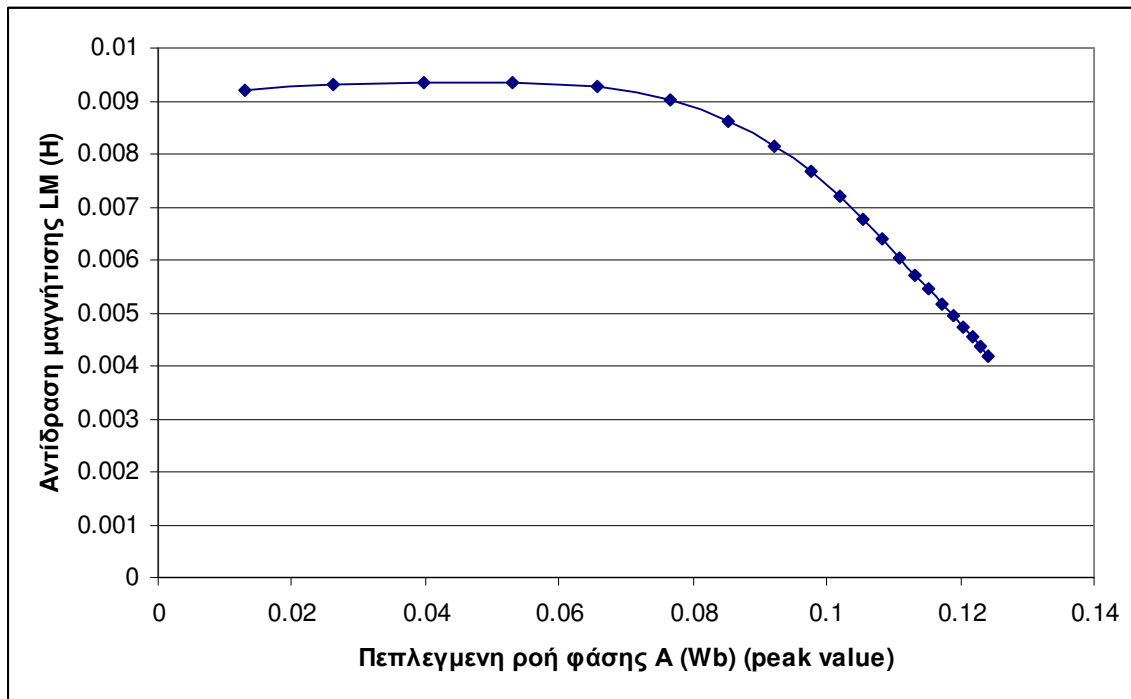
Από την προσομοίωση προκύπτει το γράφημα του **Σχήματος 4.3** που δίνει την πεπλεγμένη ροή σε συνάρτηση με το ρεύμα της φάσης A.



Σχήμα 4.3 Πεπλεγμένη ροή σε συνάρτηση με το ρεύμα της φάσης A

Στο **Σχήμα 4.3** φαίνεται ξεκάθαρα ο κορεσμός του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής που ξεκινά μετά το γραμμικό τμήμα της καμπύλης.

Σύμφωνα με τη σχέση $L_M(\Lambda_{so}) = \frac{\Lambda_{so}}{I_{so}}$, η κλίση της καμπύλης αυτής δίνει τη μεταβλητή τιμή της αντίδρασης μαγνήτισης L_M . Η τιμή της αντίδρασης μαγνήτισης L_M ως συνάρτηση της πεπλεγμένης ροής, δίνεται στο γράφημα του **Σχήματος 4.4**.



Σχήμα 4.4 Αντίδραση μαγνήτισης L_M ως συνάρτηση της πεπλεγμένης ροής

Η σταθερή τιμή της αντίδραση μαγνήτισης που αντιστοιχεί στο γραμμικό τμήμα της καμπύλης του **Σχήματος 4.4** είναι $L_{M,linear} = 0.0093H$.

Για να είναι τα αποτελέσματα χρήσιμα γίνεται η θεώρηση ότι η εξάρτηση της L_M από τον κορεσμό είναι ίδια τόσο στην περίπτωση κενού φορτίου όσο και στη λειτουργία υπό φορτίο, δηλαδή:

$$L_M(\Lambda_{so}) = L_M(\Lambda_s) \quad (4.2).$$

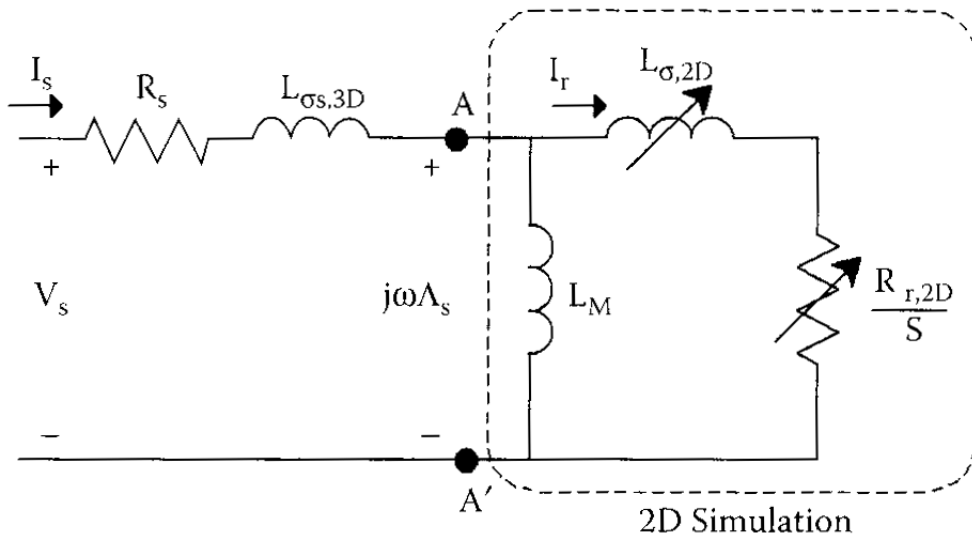
4.1.2 Δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα

Κατά τη διάρκεια αυτής της δοκιμής ο δρομέας είναι ακινητοποιημένος σε μια σταθερή θέση και τριφασικά ημιτονοειδή ρεύματα εξαναγκάζονται στα τυλίγματα του στάτη. Η εξάρτηση των παραμέτρων $R_{r,2D}$ και $L_{\sigma,2D}$ του **Σχήματος 4.1** από τη συχνότητα του δρομέα f_r μπορεί να εξακριβωθεί αλλάζοντας τη συχνότητα του προβλήματος. Η συχνότητα του δρομέα είναι η ίδια με τη συχνότητα του προβλήματος, λόγω του ακινητοποιημένου δρομέα.

Στη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα, το ονομαστικό ρεύμα αντιστοιχεί σε σχετικά χαμηλές τάσεις, επομένως και χαμηλές μαγνητικές ροές. Συνεπώς τα μαγνητικά υλικά του προβλήματος μπορούν να θεωρηθούν γραμμικά. Το πεδιακό πρόβλημα είναι πλέον

γραμμικό και χαρακτηρίζεται από πεδιακές ποσότητες που μεταβάλλονται ημιτονοειδώς στην ορισμένη συχνότητα.

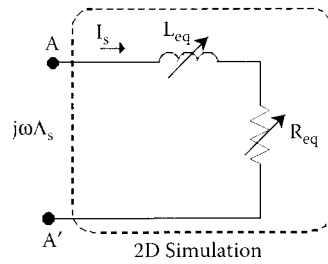
Το ισοδύναμο κύκλωμα για τη δοκιμή αυτή φαίνεται στο **Σχήμα 4.5**.



Σχήμα 4.5 Ισοδύναμο κύκλωμα για τη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα

Όπως φαίνεται, τα 3D φαινόμενα δεν λαμβάνονται υπόψη στην πεδιακή ανάλυση. Θα υπολογιστούν αναλυτικά και θα προστεθούν στο ισοδύναμο αργότερα. Δηλαδή, οι παράμετροι που υπολογίζονται από την πεδιακή ανάλυση είναι οι $R_{r,2D}$ και $L_{\sigma,2D}$. Θεωρώντας το πρόβλημα γραμμικό, η αντίδραση μαγνήτισης L_M υποτίθεται ότι έχει σταθερή τιμή, αυτή που υπολογίστηκε από τη δοκιμή κενού φορτίου. Η ανάλυση επικεντρώνεται στις παραμέτρους του δρομέα. Από τη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα, που διεξάγεται σε διάφορες συχνότητες, μπορεί να εξακριβωθεί η εξάρτηση των $R_{r,2D}$ και $L_{\sigma,2D}$ από τη συχνότητα, που οφείλεται στη μη ομοιογενή κατανομή ρευμάτων στις ράβδους του δρομέα σε διάφορες ταχύτητες.

Με την υπόθεση στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, ημιτονοειδώς κατανομημένο, οι απώλειες Joule του δρομέα, P_{jr} , και η τιμή της μαγνητικής ενέργειας του μαγνητικού υλικού W_m , είναι χρονικά σταθερά. Οι $R_{r,2D}$, $L_{\sigma,2D}$ και L_M του κυκλώματος του σχήματος αντιστοιχούν στην ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση $R_{eq} + j\omega_r L_{eq}$ του κυκλώματος του **Σχήματος 4.6**.



Σχήμα 4.6 Παράμετροι που αντιστοιχούν στη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα

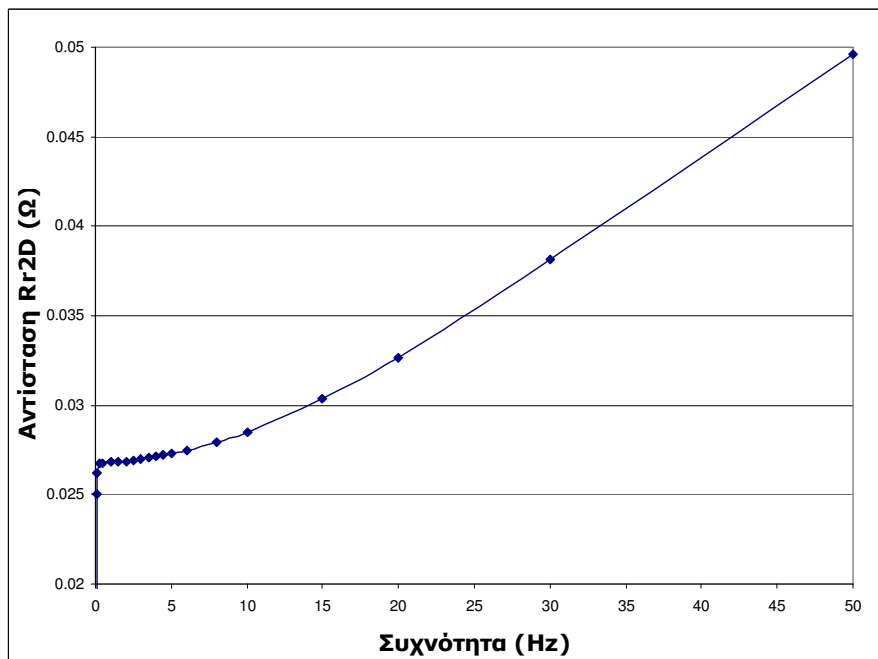
Οι τιμές R_{eq} και L_{eq} δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$R_{eq} = \frac{P_{jr}}{3I_s^2} \text{ και } L_{eq} = \frac{2W_m}{3I_s^2} \quad (4.3)$$

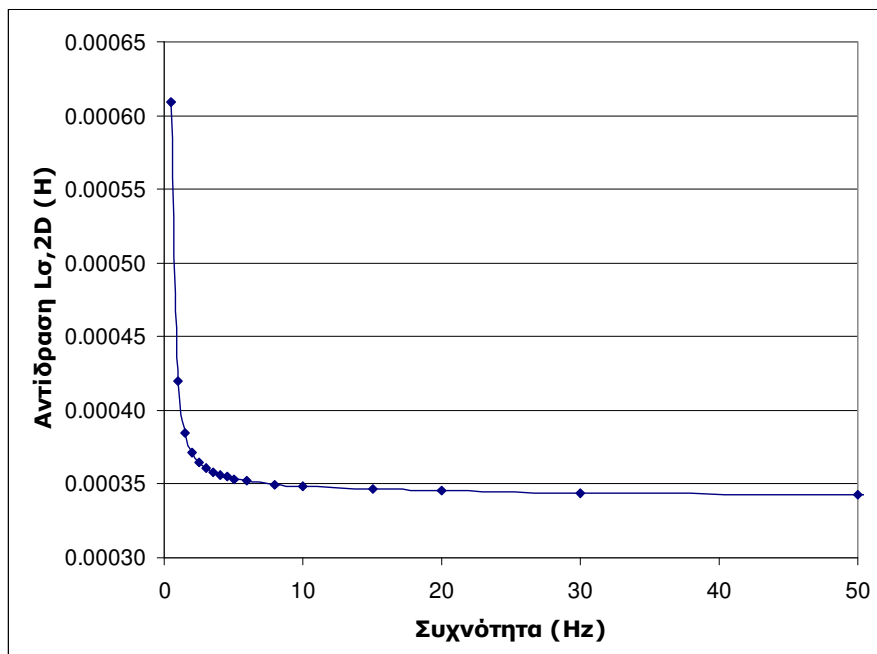
Όπου I_s η RMS τιμή του ρεύματος που χρησιμοποιήθηκε στη δοκιμή. Αφού το L_M είναι γνωστό και ίσο με την ακόρεστη τιμή του από τη δοκιμή κενού φορτίου, μπορούν να υπολογιστούν οι συναρτήσεις $R_{r,2D}(f_r)$ και $L_{\sigma,2D}(f_r)$ του κυκλώματος του **Σχήματος 4.5**.

Αφού προσδιοριστούν με προσομοίωση οι τιμές των R_{eq} και L_{eq} για διάφορες τιμές της συχνότητας, πρέπει να υπολογιστούν τα $R_{r,2D}$, $L_{\sigma,2D}$. Αυτό γίνεται με λύση του συστήματος μη γραμμικών εξισώσεων που προκύπτει.

Στο **Σχήμα 4.7** φαίνεται η συνάρτηση $R_{r,2D}(f_r)$, και στο **Σχήμα 4.6** η συνάρτηση $L_{\sigma,2D}(f_r)$.



Σχήμα 4.7 Μεταβολή της αντίστασης $R_{r,2D}$ με τη συχνότητα του δρομέα



Σχήμα 4.8 Μεταβολή της αντίδρασης $L_{\sigma,2D}$ με τη συχνότητα του δρομέα

4.1.3 Υπολογισμός παραμέτρων 3D φαινομένων

Για την ολοκλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος, οι παράμετροι που αντιστοιχούν συνδέσεις των τυλιγμάτων του στάτη ($L_{\sigma s,ew}$), στην κλίση των αυλακιών του δρομέα ($L_{\sigma s,sk}$), και στην επίδραση των δακτυλίων βραχυκύκλωσης του δρομέα ($R_{r,3D}$) πρέπει να προσδιοριστούν.

Η αντίδραση σκέδασης $L_{\sigma s,3D}$ περιλαμβάνει την αντίδραση που οφείλεται στις συνδέσεις των τυλιγμάτων του στάτη ($L_{\sigma s,ew}$) και στην κλίση των αυλακιών του δρομέα ($L_{\sigma s,sk}$).

Μια εκτίμηση της $L_{\sigma s,ew}$ (end-winding leakage) δίνεται από τη σχέση:

$$L_{\sigma s,ew} = \mu_0 \frac{N^2}{2p} L_{ew} \lambda_{ew} \quad (4.4)$$

όπου L_{ew} το ενεργό μήκος των συνδέσεων των τυλιγμάτων του στάτη (που υπολογίστηκε στην παράγραφο 3.4),

λ_{ew} ο ειδικός συντελεστής επιδεκτικότητας (οι τιμές του κυμαίνονται από 0.35 έως 0.55 ανάλογα με τον τύπο του τυλίγματος) και

$N = 2N_s$ το πλήθος αγωγών ανά φάση.

Τελικά:

$$L_{\sigma s, ew} = 0.001123H$$

Η αντίδραση που οφείλεται στην κλίση των αυλακιών του δρομέα ($L_{\sigma s, sk}$) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$L_{\sigma s, sk} = L_M (1 - k_{sk}^2) \quad (4.5)$$

με $k_{sk} = \frac{\sin(\varepsilon_{sk}/2)}{\varepsilon_{sk}/2}$, όπου ε_{sk} η γωνία κλίσης σε rad.

Η γωνία κλίσης μπορεί να είναι τυπικά από 5° έως 30° . Συνήθως είναι τόση ώστε το μήκος κλίσης να είναι όσο το μήκος μιας αύλακας. Στην προκειμένη περίπτωση η γωνία είναι $\varepsilon_{sk} = 29.24^\circ$ και ο συντελεστής $k_{sk} = 0.989$.

Επομένως θεωρώντας τη σταθερή τιμή της L_M , προκύπτει:

$$L_{\sigma s, sk} = 0.2 \text{ mH} .$$

Τελικά η αντίδραση σκέδασης $L_{\sigma s, 3D}$ είναι:

$$L_{\sigma s, 3D} = L_{\sigma s, sk} + L_{\sigma s, ew} = 0.001323H$$

Η ωμική αντίσταση ανά φάση του τυλίγματος του στάτη R_s έχει υπολογιστεί και είναι:

$$R_s = 0.278\Omega .$$

Η αντίσταση των δακτυλίων του δρομέα δίνεται από τη σχέση:

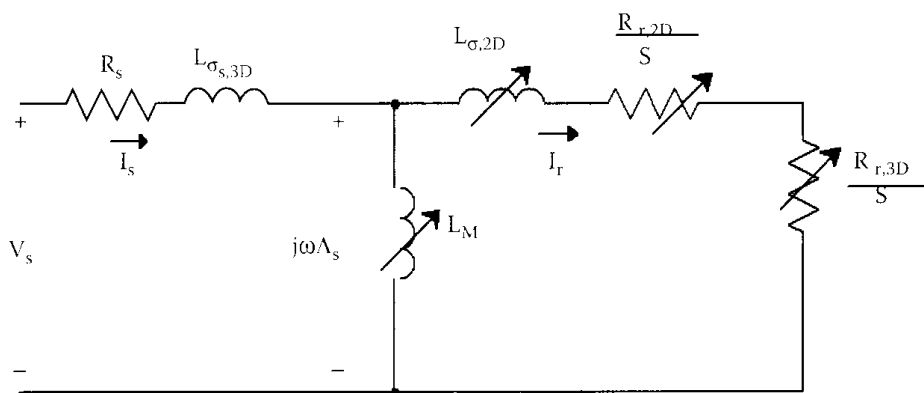
$$R_{r, 3D} = \rho \frac{3(k_w N)^2}{2\pi p^2 S_{ring}} \quad (4.6)$$

$$R_{r, 3D} = 0.03006\Omega$$

Έχοντας προσδιορίσει τις παραμέτρους του ισοδυνάμου κυκλώματος, η επίδοση της μηχανής σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας μπορεί να προβλεφθεί.

4.1.4 Το ισοδύναμο κύκλωμα

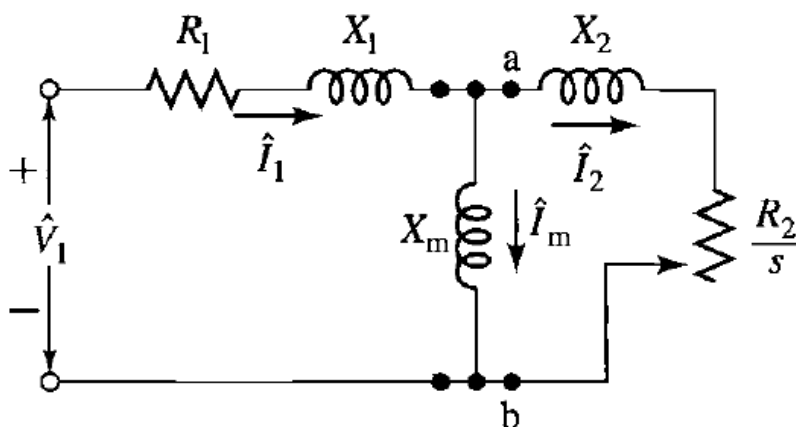
Το ισοδύναμο μεταβλητών παραμέτρων του οποίου οι παράμετροι υπολογίστηκαν φαίνεται στο **Σχήμα 4.10**:



Σχήμα 4.9 Ισοδύναμο κύκλωμα μεταβλητών παραμέτρων τριφασικού κινητήρα επαγωγής.

Στο κύκλωμα του **Σχήματος 4.9** φαίνονται οι παράμετροι που προσδιορίστηκαν. Από αυτές οι R_s , $L_{\sigma_{s,3D}}$ και $R_{r,3D}$ προσδιορίστηκαν με αναλυτικό τρόπο ενώ οι $L_M(\Lambda_s)$, $L_{\sigma,2D}(f_r)$ και $R_{r,2D}(f_r)$ με δοκιμές που προσομοιώθηκαν. Συγκεκριμένα η $L_M(\Lambda_s)$ προσδιορίστηκε με τη δοκιμή κενού φορτίου και οι $L_{\sigma,2D}(f_r)$ και $R_{r,2D}(f_r)$ με τη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα.

Για ευκολία στην περαιτέρω ανάλυση, οι παράμετροι που προσδιορίστηκαν αντιστοιχίζονται στις παραμέτρους του κλασικού ισοδυνάμου του **Σχήματος 4.10**:



Σχήμα 4.10 Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα

Από την αντιστοίχιση προκύπτει:

$$R_1 = R_s$$

$$X_1 = \omega L_{\sigma s, 3D}$$

$$X_m(\Lambda_s) = \omega L_M(\Lambda_s)$$

$$R_2(f_r) = R_{r, 3D} + R_{r, 2D}(f_r)$$

$$X_2(f_r) = \omega L_{\sigma, 2D}(f_r)$$

Υπενθυμίζεται ότι οι παράμετροι $L_M(\Lambda_s)$, $L_{\sigma, 2D}(f_r)$ και $R_{r, 2D}(f_r)$ είναι μεταβλητές και εξαρτώνται από το ρεύμα και τη συχνότητα του δρομέα. Κατ' επέκταση και οι $X_m(\Lambda_s)$, $R_2(f_r)$ και $X_2(f_r)$ θα είναι μεταβλητές. Προκειμένου να γίνεται εύκολη χρήση τους σε εξισώσεις προσεγγίζονται από κατάλληλα πολυώνυμα ή άλλου τύπου συναρτήσεις.

Επειδή ισχύει $f_r = sf_e$, τα μεγέθη που εξαρτώνται από τη συχνότητα f_r ουσιαστικά εξαρτώνται από την ολίσθηση s (για σταθερή ηλεκτρική συχνότητα τροφοδοσίας). [5]

4.2 Υπολογισμός χαρακτηριστικών επίδοσης κινητήρα

4.2.1 Καμπύλη ρεύματος ολίσθησης

Από το ισοδύναμο του **Σχήματος 1.10** σε αντιπαραβολή με αυτό του **Σχήματος 4.9** προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$j\omega\Lambda_s = \hat{V}_1 \frac{jX_m // \left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right)}{R_1 + jX_1 + \left(jX_m // \left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right) \right)} \quad (4.7)$$

Όπως έχει αναφερθεί $X_m(\Lambda_s) = \omega L_M(\Lambda_s)$. Επομένως για κάθε τιμή της ολίσθησης s πρόκειται για μια μη γραμμική εξίσωση με άγνωστο το Λ_s .

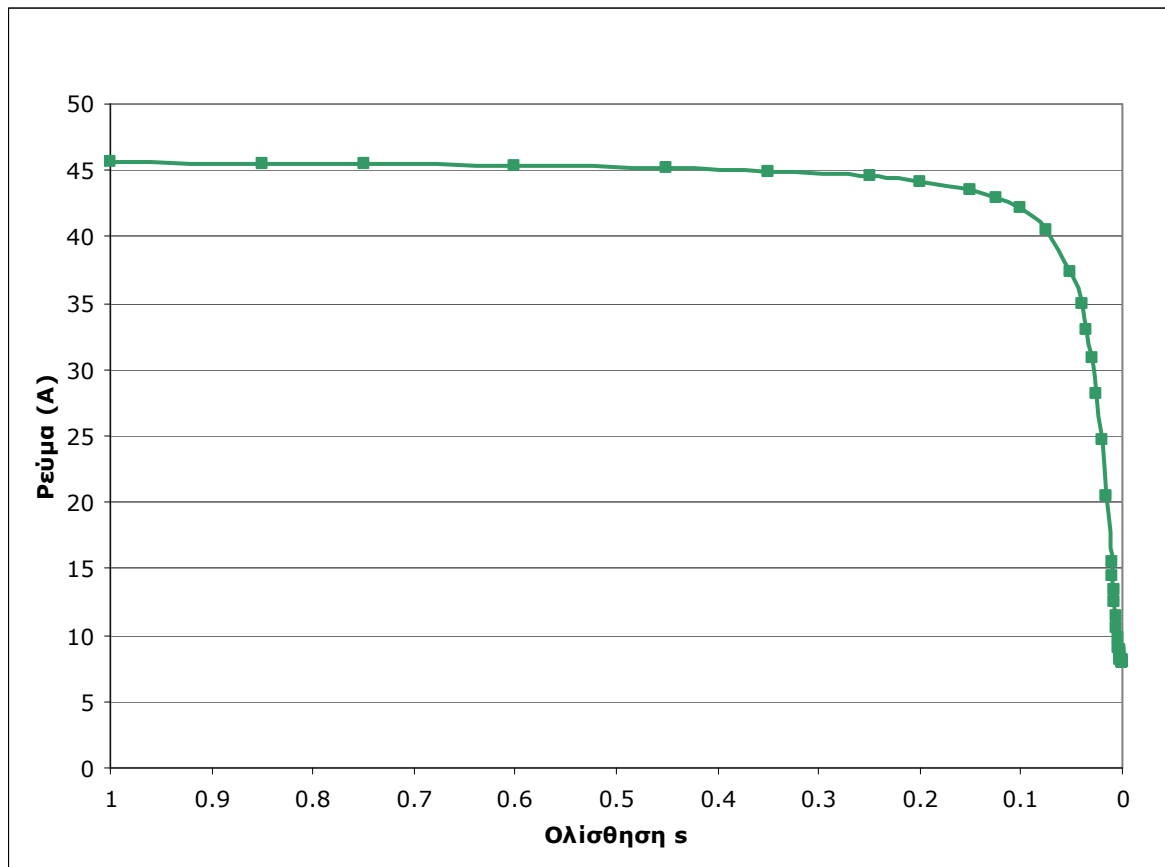
Λύνοντας με επαναληπτικό τρόπο την εξίσωση για διάφορες τιμές της ολίσθησης, λαμβάνεται η πεπλεγμένη ροή Λ_s ως συνάρτηση της ολίσθησης ($\Lambda_s = f(s)$). Κατ' επέκταση μπορούν να προσδιοριστούν και οι τιμές της αντίδρασης X_m ως $X_m(s)$, δηλαδή:

$$X_m(f_r)$$

Από την ανάλυση του ισοδυνάμου του **Σχήματος 4.10** προκύπτει το ρεύμα γραμμής από τη σχέση:

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{V}_1}{R_1 + jX_1 + \left(jX_m // \left(\frac{R_2}{s} + jX_2 \right) \right)} \quad (4.8)$$

Στη σχέση αυτή όμως, όλες οι μεταβλητές παράμετροι μπορούν να εκφραστούν ως συναρτήσεις της ολίσθησης. Επομένως προσεγγίζοντας τη λύση της εξίσωσης για διάφορες τιμές της ολίσθησης κατασκευάζεται η χαρακτηριστική ρεύματος - ολίσθησης (**Σχήμα 4.11**).



Σχήμα 4.11 Καμπύλη ρεύματος - ολίσθησης

Παρατηρώντας την καμπύλη ρεύματος - ολίσθησης, μερικά χρήσιμα συμπεράσματα μπορούν να βγουν. Πρώτα φαίνεται ότι το ρεύμα εκκίνησης είναι περίπου $I_{εκκ} = 46A$ δηλαδή λιγότερο από τρεις φορές το ρεύμα κανονικής λειτουργίας ($I_N = 16.34A$). Το ρεύμα εκκίνησης είναι τόσο μικρό λόγω της μεγάλης ωμικής αντίστασης που παρουσιάζουν τα τυλίγματα του στάτη. Είναι τόσο μεγάλη, που η μεταβολή της αντίστασης του δρομέα κατά τη μεταβολή της ολίσθησης δεν είναι ικανή να επηρεάσει σημαντικά το ρεύμα.

Επιπλέον, το ρεύμα κανονικής λειτουργίας επιτυγχάνεται σε πολύ μικρή ολίσθηση (περίπου 1%), επομένως ο κινητήρας θα λειτουργεί πολύ κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα.

4.2.2 Καμπύλη ροπής ολίσθησης

Για την κατασκευή της καμπύλης ροπής ολίσθησης του κινητήρα, επιστρατεύεται για ακόμη μια φορά το ισοδύναμο του **Σχήματος 4.10**.

Αφού αναλυθεί κατά τα γνωστά (παράγραφος 1.5.2) προκύπτει η σχέση που δίνει τη ροπή, ως συνάρτηση της ολίσθησης:

$$T_{em} = \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_{th}^2 R_2 / s}{\left(R_{th} + R_2 / s\right)^2 + (X_{th} + X_2)^2} \quad (4.9)$$

Η σχέση αυτή είναι της μορφής:

$$T_{em} = f(X_m, R_2, X_2, s)$$

Όπου X_m, R_2, X_2, s οι μεταβλητές ποσότητες που εμπεριέχει. Είναι όμως $X_m = f(\Lambda_s)$ και $\Lambda_s = f_2(s)$ επομένως:

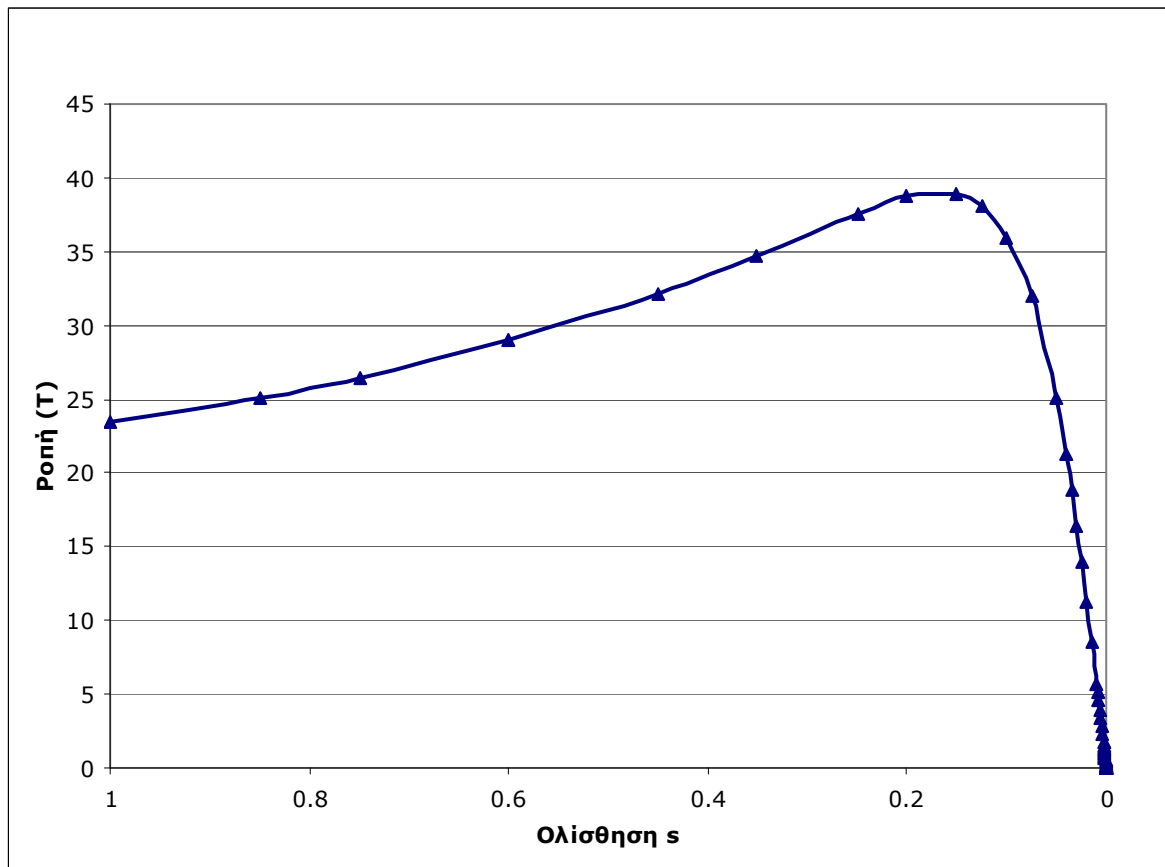
$$X_m = f_3(s)$$

$$R_2 = f_4(s)$$

$$X_2 = f_5(s)$$

Άρα τελικά $T_{em} = f(s)$.

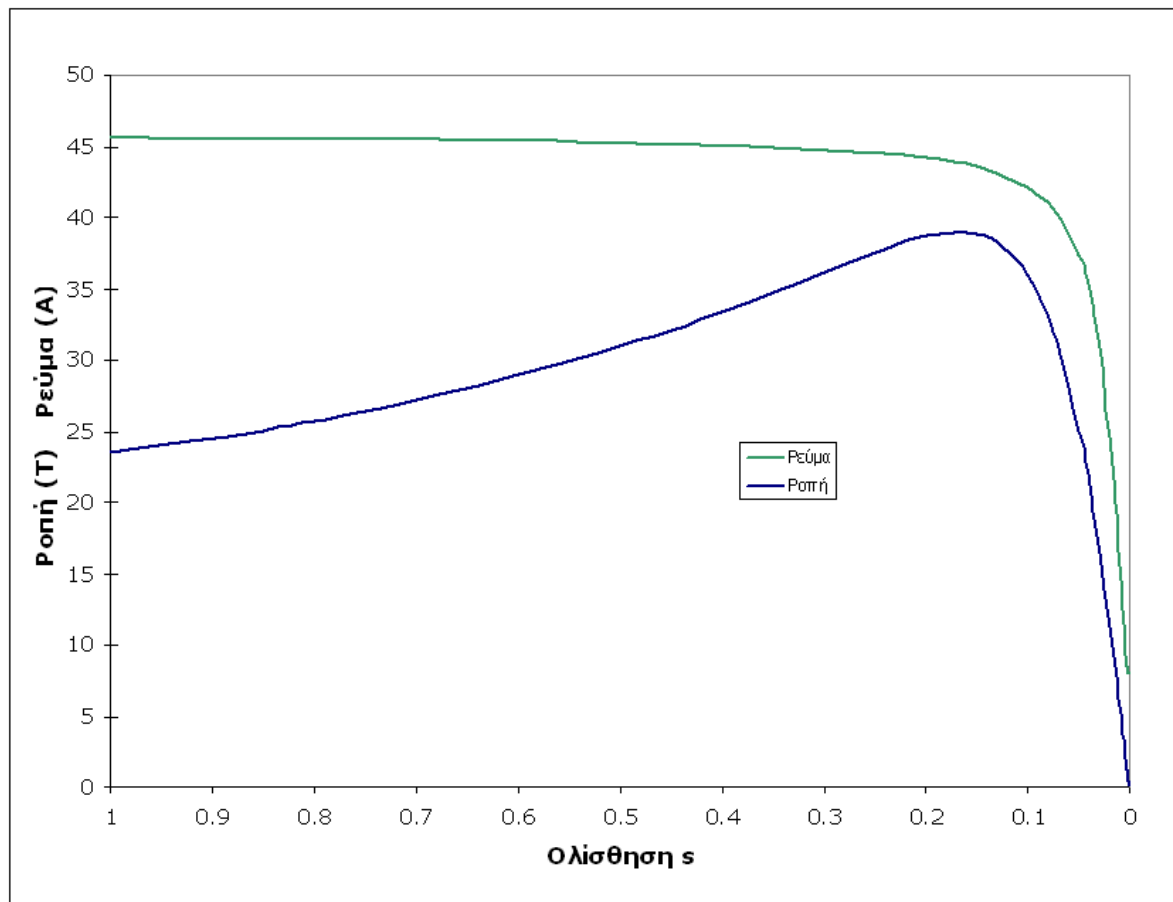
Για τις διάφορες τιμές της ολίσθησης προκύπτουν οι τιμές της ροπής και χαράσσεται η χαρακτηριστική ροπής ολίσθησης (**Σχήμα 4.12**).



Σχήμα 4.12 Καμπύλη ροπής - ολίσθησης

Από την καμπύλη ροπής - ολίσθησης του **Σχήματος 4.12** προκύπτουν διάφορα χρήσιμα χαρακτηριστικά. Η ροπή εκκίνησης του κινητήρα είναι $T_{εκκ} = 23.4Nm$, λίγο μεγαλύτερη από διπλάσια της ονομαστικής ροπής ($T = 6Nm$). Η ολίσθηση ονομαστικής ροπής είναι μικρή (περίπου 1%) πράγμα που εξασφαλίζει οικονομική λειτουργία. Αξίζει να σημειωθεί πως ο κινητήρας που σχεδιάστηκε μπορεί να επιτύχει μέγιστη ροπή $T_{max} = 38.9Nm$ περίπου. Ωστόσο, λειτουργία σε μεγαλύτερη ροπή από την $T = 6Nm$ δεν θεωρείται αποδεκτή για το συγκεκριμένο κινητήρα λόγω των υψηλών απωλειών στην κατάσταση αυτή.

Τέλος οι δύο καμπύλες τοποθετούνται και σε κοινό διάγραμμα (**Σχήμα 4.13**)



Σχήμα 4.13 Καμπύλη ροπής – ολίσθησης και ρεύματος – ολίσθησης

Μελετώντας τις καμπύλες παρατηρείται πως είναι ιδιαίτερα απότομες στην περιοχή κανονικής λειτουργίας. Αυτό σημαίνει πως κατά τη μεταβολή του φορτίου πολύ μικρές μεταβολές στην ταχύτητα και το ρεύμα συμβαίνουν.

Γυρνώντας πίσω στις προδιαγραφές κατασκευής του κινητήρα (**Πίνακας 2.1**) μπορεί κανείς με αυτοπεποίθηση να πει πως αυτές ικανοποιούνται. Με βάση την καμπύλη αυτή ο κινητήρας αποδίδει με άνεση τα 6Nm ροπής στις 6000ΣΑΛ. Μπορεί κανείς να θεωρήσει υπερβολή τη σχεδίαση του κινητήρα σε αυτές τις συνθήκες, μιας και αποτελούν τις μέγιστες απαιτήσεις. Επιλέχθηκε όμως αυτή η στρατηγική ώστε να γίνει κατά το δυνατό πιο αποδοτικός. Επειδή η συχνότητα των ρευμάτων είναι μεγάλη (200Hz) οι απώλειες που σχετίζονται με τη φόρτιση του μαγνητικού υλικού είναι πολύ σημαντικές και πρέπει να κρατηθούν χαμηλά. Για το λόγο αυτό κρίθηκε απαγορευτική οποιαδήποτε υπερφόρτιση του κινητήρα, έστω και παροδική. Επομένως σχεδιάστηκε ώστε να αποδίδει τα μέγιστα με απολύτως ανεκτή φόρτιση. Ως φυσικό επακόλουθο, τα ονομαστικά μεγέθη θα αποδίδονται με πολύ χαμηλότερη φόρτιση, κρατώντας τις απώλειες σε πολύ χαμηλά επίπεδα. [5]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση της εργασίας και συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν. Ακόμη εντοπίζονται τα σημεία που η εργασία αυτή συνεισφέρει στην προαγωγή της επιστήμης και επισημαίνονται θέματα που χρειάζονται περαιτέρω διερεύνηση.

5.1 Σύνοψη εργασίας

Στην παρούσα εργασία έγινε αρχικά η προκαταρκτική σχεδίαση του κινητήρα ακολουθώντας γενικές αρχές σχεδίασης. Με δεδομένες τις βασικές διαστάσεις και χαρακτηριστικά η τοπολογία αναλύθηκε με χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων και μετά από ανάλυση ευαισθησίας προέκυψε η τελική γεωμετρία του κινητήρα. Επίσης, για τον κινητήρα αυτό υπολογίστηκαν οι απώλειες με χρήση αποτελεσμάτων από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων και μελετήθηκε το αρμονικό περιεχόμενο της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο.

Έχοντας προσδιορίσει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που μεγιστοποιούν τη ροπή κρατώντας τις φορτίσεις της μηχανής σε επιθυμητά επίπεδα, προκύπτει η ανάγκη για πρόβλεψη της επίδοσης της μηχανής. Για το λόγο αυτό παρουσιάστηκε και εφαρμόστηκε μια μεθοδολογία για την κατασκευή ενός ισοδυνάμου μοντέλου μεταβλητών παραμέτρων. Οι παράμετροι του ισοδυνάμου υπολογίστηκαν από μια σειρά δοκιμών που προσομοιώθηκαν με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Ως αποτέλεσμα, χαράχθηκε η χαρακτηριστική ροπής στρωφών του κινητήρα και έδωσε σαφή εικόνα της προβλεπόμενης συμπεριφοράς του υπό συνθήκες λειτουργίας.

5.2 Κυριότερα συμπεράσματα

- Από την προκαταρκτική σχεδίαση που βασίζεται σε γενικές αρχές προσδιορίζονται σε ικανοποιητικό βαθμό τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα. Παρατηρούνται όμως κάποια εμφανή προβλήματα (αναλογία χαλκού / σιδήρου στα δόντια) που επιβεβαιώνονται με την ανάλυση της μηχανής με πεπερασμένα στοιχεία. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητο να ακολουθείται πάντα μια διαδικασία βελτιστοποίησης (ανάλυση ευαισθησίας). Μετά την ανάλυση ευαισθησίας επιβεβαιώνεται πως οι επιδόσεις της μηχανής μπορούν να βελτιωθούν σημαντικά.
- Συγκεκριμένα στην παρούσα εφαρμογή η ροπή της μηχανής αυξήθηκε κατά 25% με μεταβολή μερικών μόνο τοπικών διαστάσεων (πλάτος και μήκος δοντιών στάτη και δρομέα).
- άλλες γεωμετρικές παράμετροι (π.χ. μήκος σώματος του στάτη για επιστροφή της ροής, διαστάσεις ανοίγματος αυλάκων δρομέα) παρατηρήθηκε ότι δεν είχαν κάποια σημαντική επίπτωση στη ροπή.

- Η δισκοειδής μορφή της μηχανής απαιτεί πολύ μεγάλο μήκος τερματικών συνδέσεων στο τύλιγμα του στάτη (83% του μήκους του) και κάνει την αντίσταση του συγκριτικά μεγάλη. Ως αποτέλεσμα παρατηρούνται πολύ σημαντικές απώλειες (5% της ισχύος εισόδου) μόνο από το φαινόμενο Joule στα τυλίγματα του στάτη. Ωστόσο, αυτή η μεγάλη τιμή της αντίστασης περιορίζει σημαντικά το ρεύμα κατά την εκκίνηση. Συγκεκριμένα, η μέγιστη τιμή του ρεύματος δεν ξεπερνά το τριπλάσιο του ονομαστικού.
- Οι ωμικές απώλειες του δρομέα είναι ιδιαίτερα περιορισμένες (<0.5% της ισχύος εισόδου). Αυτό οφείλεται στη χρήση χαλκού, που έχει μεγαλύτερη αγωγιμότητα απ' το αλουμίνιο, και στο ότι οι αύλακες επιλέχθηκαν βαθιές.
- Επίσης, από τη διαδικασία προσδιορισμού της επίδοσης της μηχανής φάνηκε πως είναι εφικτή η κατασκευή της χαρακτηριστικής ροπής στρωφών από ισοδύναμο μεταβλητών παραμέτρων οι τιμές των οποίων υπολογίζονται με αριθμητικές μεθόδους
- παρατηρήθηκε ωστόσο ότι το αποτέλεσμα είναι πολύ ευαίσθητο όσον αφορά τις τιμές των παραμέτρων. Για το λόγο αυτό, όλες οι θεωρήσεις κατά την εξαγωγή αυτών, πρέπει να γίνονται με ιδιαίτερη προσοχή

5.3 Σημεία επιστημονικής συνεισφοράς

Στην παρούσα εργασία προτείνεται και παρουσιάζεται ένας ολοκληρωμένος τρόπος σχεδίασης και ανάλυσης κινητήρα επαγωγής για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας.

Αρχικά, συνδυάζεται κλασσική σχεδίαση με μια απλή στην εφαρμογή διαδικασία βελτιστοποίησης που βελτιώνει σημαντικά τη γεωμετρία. Αυτό επιτυγχάνεται με διαδοχική λύση αρμονικών προβλημάτων πεπερασμένων στοιχείων και μεταβολή των γεωμετρικών παραμέτρων με κριτήριο τη μεγιστοποίηση της ροπής.

Επιπλέον, αναφορικά με την ανάλυση της λειτουργίας του κινητήρα, προτείνεται πέρα από την απλή λύση του αρμονικού προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία να ακολουθείται διαδικασία κατασκευής κατάλληλου ισοδυνάμου κυκλώματος. Δηλαδή, τα πεπερασμένα στοιχεία να χρησιμοποιούνται ως μέσο προσδιορισμού των παραμέτρων του ισοδυνάμου κυκλώματος και όχι απευθείας για την εκτίμηση της επίδοσης του κινητήρα.

5.4 Εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής αναδείχθηκαν τα παρακάτω σημεία που χρειάζονται περαιτέρω διερεύνηση:

- πειραματική επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών του κινητήρα που υπολογίσθηκαν
- καθορισμός ενός συστηματικότερου τρόπου βελτιστοποίησης της γεωμετρίας με κριτήριο την παραγόμενη ροπή και παράλληλο έλεγχο των περιορισμών για τη φόρτιση της μηχανής

Βιβλιογραφία

- [1] Ι.Α. Τεγόπουλος, **Ηλεκτρικές Μηχανές, Μέρος Β΄**, Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 1991
- [2] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, **Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας**, Ε.Μ.Π., 2001
- [3] Stephen J. Chapman, **Ηλεκτρικές Μηχανές, 3^η Έκδοση**, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003
- [4] Ion Boldea, Syed A. Nasar, **The Induction Machines Design Handbook, Second Edition**, CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2010
- [5] Nicola Bianchi, **Electrical Machine Analysis Using Finite Elements**, CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2005
- [6] E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr., Stephen Umans, **Electric Machinery, sixth edition**, McGraw-Hill, 2003
- [7] M. G. Say, **Electrical Engineering Design Manual, Third Edition**, Chapman and Hall Ltd, 1962
- [8] M. G. Say, **Electrical Alternating Current Machines, Fifth Edition**, Longman Scientific & Technical, 1983
- [9] E. S. Hamdi, **Design of Small Electrical Machines**, Wiley & Sons, 1994
- [10] Zia A. Yamayee, **Electromechanical Energy Devices And Power Systems**, John Wiley & Sons, Inc, 1994
- [11] Juha Pyrhönen, Tapani Jokinen, Valéria Hrabovcová, **Design Of Rotating Electrical Machines**, John Wiley & Sons, Ltd, 2008
- [12] Kirtley, J.L. Cowie, J.G. Brush, E.F. Peters, D.T. Kimmich, R., **Improving Induction Motor Efficiency with Die-cast Copper Rotor Cages**, Power Engineering Society General Meeting, 2007, IEEE

- [13] David Meeker, **Finite Element Method Magnetics User's manual, version 4.2**, February 5, 2009
- [14] David Meeker, **Finite Element Method Magnetics OctaveFEMM, version 1.2**, March 25, 2009
- [15] Pia Salminen, **Fractional Slot Permanent Magnet Synchronous Motors for Low Speed Applications**, Thesis for the degree of Doctor of Science, Lappeenranta University of Technology, Finland, 2004
- [16] Άγγελος Α. Χριστοφή, **Σχεδίαση και Βελτιστοποίηση Δρομέα Ηλεκτρικής Μηχανής Επαγωγής Ισχύος 2HP**, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Ιούλιος 2010
- [17] Αναστάσιος Γ. Βήχος, **Σχεδίαση και βελτιστοποίηση κινητήρα μονίμων μαγνητών για εφαρμογή ηλεκτροκίνησης**, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Ιούνιος 2009
- [18] Δημήτριος Χ. Παναγιωτόπουλος , **Σχεδίαση και βελτιστοποίηση επαγωγικού κινητήρα**, Διπλωματική εργασία, Αθήνα, Ιούλιος 2011