



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Σχεδίαση και συγκριτικά πλεονεκτήματα κινητήρα
επαγωγής για ηλεκτρικό όχημα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Β. Ντόβολος

Επιβλέπων : Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Σχεδίαση και συγκριτικά πλεονεκτήματα κινητήρα
επαγωγής για ηλεκτρικό όχημα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Β. Ντόβολος

Επιβλέπων : Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....

Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Στέφανος Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Σταύρος Παπαθανασίου
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015

.....
Κωνσταντίνος Β. Ντόβολος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών
Υπότροφος του κληροδοτήματος ‘ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΔΗ’

Copyright © Κωνσταντίνος Β. Ντόβολος, 2015.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους βοήθησαν κατά την εκπόνηση της.

Ευχαριστώ θερμά, τον Καθηγητή μου κ. Αντώνιο Κλαδά, που με εμπιστεύθηκε με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος καθώς και για τη συνεχή καθοδήγησή του και την άψογη συνεργασία για την περάτωση της εργασίας, επιλύοντας τις διάφορες απορίες μου επί του θέματος της σχεδίασης και λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών. Επίσης, ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα, κ. Αθανάσιο Σαρηγιαννίδη, που με βοήθησε στα διάφορα στάδια εκπόνησης της παρούσας εργασίας, παρέχοντας πρόθυμα τις γνώσεις και την εμπειρία του.

Αφιερώνεται στην οικογένεια μου και σε
όσους έχουν σταθεί στο πλευρό μου.

*Κάνεις ό,τι κάνεις, μα κάποτε τρως την πόρτα.
Μ'αν θέλεις μένεις όρθιος μέχρι στο νου σου
ν'ανάφουν φώτα, όπως και πρώτα.*

Περίληψη

Σκοπός της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση και ανάλυση της λειτουργικής συμπεριφοράς κινητήρα επαγωγής 45 kW για εφαρμογή σε ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Περιγράφεται λεπτομερώς η διαδικασία σχεδίασης του κινητήρα, από τις βασικές διαστάσεις του μέχρι την τελική, βελτιστοποιημένη γεωμετρία. Υλοποιείται δρομέας κλωβού, ενώ εξετάζονται δύο διαφορετικές τοπολογίες, με συγκεντρωμένο και διανεμημένο τύλιγμα στο στάτη.

Η μέθοδος σχεδίασης που αναπτύχθηκε αποτελείται από τέσσερα βασικά στάδια: Στο πρώτο στάδιο, κατά την προκαταρκτική σχεδίαση, γίνεται αποτίμηση των βασικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών του διακένου, του δρομέα και του στάτη της μηχανής κάνοντας χρήση αναλυτικών σχέσεων, με κριτήριο τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά επίδοσης και εμπειρικές σχέσεις που αφορούν τις μαγνητικές και ηλεκτρικές φορτίσεις.

Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται η οριστική σχεδίαση της γεωμετρίας του κινητήρα επαγωγής χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων για ανάλυση του μαγνητικού πεδίου του ενεργού μέρους της μηχανής. Παράλληλα, υλοποιείται ρουτίνα βελτιστοποίησης της γεωμετρίας αυτής, χρησιμοποιώντας τεχνικές ανάλυσης ευασθησίας των παραμέτρων, με σκοπό την αύξηση της επίδοσης της μηχανής και τη μείωση των απωλειών της.

Στο τρίτο στάδιο γίνεται ανάλυση της συμπεριφοράς του κινητήρα σε διαφορετικές συνθήκες φόρτισης, με υπολογισμούς που βασίζονται στις παραμέτρους του ανά φάση ισοδύναμου κυκλώματος, που προέκυψαν από την πεδιακή ανάλυση.

Στο τέταρτο στάδιο επιχειρείται ανάλυση της συμπεριφοράς του κινητήρα σε ταχύτητες μεγαλύτερες της ονομαστικής, εφαρμόζοντας τεχνικές εξασθένησης πεδίου, και συγκρίνεται με έναν αντίστοιχο σύγχρονο κινητήρα μόνιμων μαγνητών.

Τέλος, ανακεφαλαιώνεται η διαδικασία σχεδίασης του κινητήρα, παρουσιάζονται τα κυριότερα αποτελέσματα και ευρήματα της εργασίας και επισημαίνονται τα συγκριτικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της επιλογής ασύγχρονης μηχανής σε εφαρμογές ηλεκτροκίνητων οχημάτων.

ΛέξειςΚλειδιά

Κινητήρας επαγωγής, δρομέας κλωβού, συγκεντρωμένα τυλίγματα, διανεμημένα τυλίγματα, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, προκαταρκτική σχεδίαση, βελτιστοποίηση γεωμετρίας, τεχνική ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρων, ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα, εξασθένηση πεδίου.

Abstract

In the current paper a three-phase squirrel cage induction motor of 45 kW nominal power is designed, in order to be used in an electric vehicle application. In order to cover the needs of this specific application a cage rotor configuration has been selected and two different types of stator windings, concentrated and distributed respectively, have been examined to determine the most suitable one for the application.

The methodology implemented involves four main stages: In a first step an initial motor design is undertaken by using analytical formulae. The desired specifications have been taken into account concerning the nominal and maximum torque, the nominal speed, the power supply as well as the prescribed current and flux density by considering through empirical relations the magnetic and electric loadings..

In a second step the critical design is performed by using the finite element method and optimized using an extended sensitivity analysis of its geometrical parameters. For the purpose of this thesis Finite Element Method Magnetics (FEMM) is used for the analysis of the motor. To facilitate and speed-up the optimization process, the motor is parametrically designed, targeting the performance increase with minimum loss involved .

In a third step the motor equivalent circuit parameters are evaluated through field analysis in order to determine the motor's behavior under different operating conditions.

In a fourth step the motor's behavior is examined at speeds exceeding nominal, by applying field weakening techniques, and under these operating conditions the motor response has been compared, to that of a permanent magnet synchronous one.

Finally, the proposed design procedure of the motor is summarized, the main results and findings are presented while the relative advantages and disadvantages of selecting squirrel cage induction motor configuration in electric vehicle applications are underlined.

Keywords

Induction motor, squirrel cage rotor, concentrated windings, distributed windings, finite element method, preliminary design, geometry optimization, sensitivity analysis technique, motor equivalent circuit, flux weakening.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ.....15

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	16
1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	16
1.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ.....	19
1.3.1 Στάτης.....	20
1.3.2 Δρομέας.....	20
1.3.3 Τυλίγματα.....	21
1.3.3.1 Συγκεντρωμένα και Διανεμημένα Τυλίγματα.....	22
1.3.3.2 Τυλίγματα Πλήρους και Κλασματικού Βήματος.....	24
1.3.3.3 Τυλίγματα Απλής και Διπλής Στρώσης.....	26
1.3.3.4 Άκρα Τυλιγμάτων.....	27
1.4 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	29
1.4.1 Ανάλυση Ισοδύναμου Κυκλώματος.....	35
1.4.2 Χαρακτηριστική Ροπής-Στροφών.....	37
1.4.3 Κατάταξη Κινητήρων Επαγωγής.....	40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ.....44

2.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ.....	45
2.2 ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ.....	47
2.2.1 Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης.....	47
2.2.2 Βήματα προκαταρκτικής σχεδίασης.....	50
2.3 ΠΕΔΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	51
2.3.1 Μαγνητοστατικά προβλήματα.....	52
2.3.2 Οριακές συνθήκες.....	53
2.3.3 Η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων.....	55
2.3.4 Το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων FEMM.....	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ.....57

3.1 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ	58
3.1.1 Μοντελοποίηση των βασικών δυνάμεων που ασκούνται στο όχημα.....	58
3.1.2 Σύστημα μετάδοσης.....	62
3.1.3 Εξαγωγή προδριαγραφών ηλεκτρικού κινητήρα.....	64
3.2 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ.....	66

3.2.1	Διαστασιολόγηση διακένου.....	66
3.2.2	Παραμετροποιημένη σχεδίαση.....	69
3.2.3	Σχεδίαση Στάτη.....	70
3.2.4	Σχεδίαση Δρομέα.....	73
3.2.5	Τελική Γεωμετρία.....	75
3.2.6	Υλικά κατασκευής.....	77
3.3	ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΗΧΑΝΗΣ	79
3.3.1	Απώλειες Χαλκού.....	79
3.3.2	Απώλειες Πυρήνα.....	79
3.3.3	Μοντελοποίηση απωλειών.....	81
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....		84
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΤΟ FEMM.....	84
4.1.1	Σύγκριση τοπολογιών συγκεντρωμένου και διανεμημένου τυλίγματος.....	84
4.1.2	Μαγνητοστατική ανάλυση.....	95
4.1.3	Αρμονική ανάλυση.....	96
4.1.4	Απώλειες και απόδοση.....	98
4.2	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ.....	98
4.2.1	Ανάλυση ευαισθησίας γεωμετρικών παραμέτρων Δρομέα.....	99
4.2.2	Ανάλυση ευαισθησίας γεωμετρικών παραμέτρων Στάτη.....	111
4.2.3	Τελική γεωμετρία.....	126
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ		133
5.1	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ	134
5.1.1	Δοκιμή κενού φορτίου.....	135
5.1.2	Δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα.....	137
5.1.3	Υπολογισμός παραμέτρων 3D φαινομένων.....	139
5.1.4	Το ισοδύναμο κύκλωμα.....	141
5.2	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	142
5.2.1	Καμπύλη ρεύματος- ολίσθησης.....	143
5.2.2	Καμπύλη ροπής- ολίσθησης.....	143
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΣΥΓΧΡΟΝΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ.....		144
6.1	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ.....	145
6.2	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	145
6.2.1	Απώλειες και απόδοση.....	146
6.2.2	Συντελεστής πυκνότητας ροπής.....	148

6.2.3 Πυκνότητα ισχύος.....	149
6.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΞΑΣΘΕΝΙΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ.....	149
6.3.1 Σύγχρονος κινητήρας μόνιμων μαγνητών.....	150
6.3.2 Ασύγχρονος κινητήρας.....	158
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	7
7.1 ΣΥΝΟΨΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	
7.2 ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	
7.3 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΕ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ	
7.4 ΣΗΜΕΙΑ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗΣ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑΣ.....	
7.5 ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....	
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών μηχανών επαγωγής και κυρίως των κινητήρων. Εξάγεται και αναλύεται το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα επαγωγής και παρουσιάζεται η διαδικασία εξαγωγής της χαρακτηριστικής ροπής στροφών. Δίδεται η κατηγοριοποίηση των κινητήρων κατά NEMA και τα χαρακτηριστικά κάθε κατηγορίας.

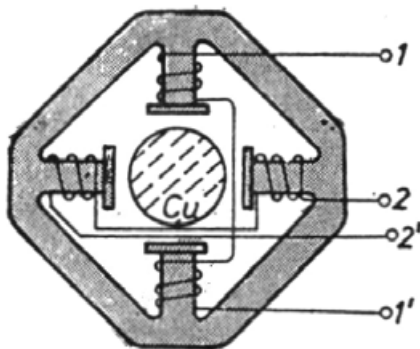
1.1 Εισαγωγή

Οι επαγωγικές μηχανές αποτελούν τις πιο διαδεδομένες μηχανές στα βιομηχανικά συστήματα κίνησης και στις περισσότερες οικιακές εφαρμογές. Η απλή κατασκευή τους, το χαμηλό κόστος, η ελάχιστη συντήρηση και η απευθείας σύνδεση τους στο εναλλασσόμενο δίκτυο είναι τα κύρια πλεονεκτήματα των μηχανών επαγωγής.

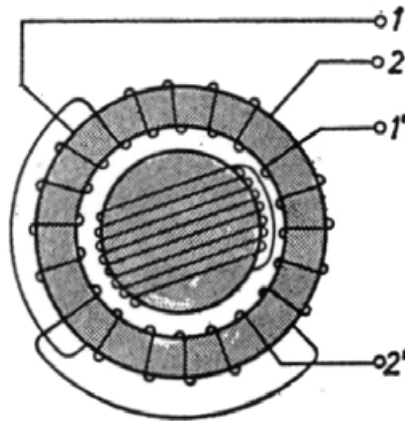
Στο εμπόριο διατίθενται διάφορα είδη επαγωγικών μηχανών καθένα για διαφορετική εφαρμογή. Αν και οι επαγωγικές μηχανές είναι εύκολες στο σχεδιασμό και την κατασκευή σε σχέση με τις μηχανές συνεχούς ρεύματος, ο έλεγχος της ροπής και της ταχύτητας που απαιτείται σε αρκετές εφαρμογές απαιτεί μεγαλύτερη κατανόηση του σχεδιασμού και των χαρακτηριστικών της μηχανής και τις καθιστά σε πολλές περιπτώσεις πιο πολύπλοκες από τις μηχανές συνεχούς ρεύματος.

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 στον 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.

Γύρω στα 1900 ο κινητήρας επαγωγής ήταν έτοιμος για ευρεία βιομηχανική χρήση. Δεν αποτελεί έκπληξη λοιπόν ότι πριν το 1910 οι αμαξοστοιχίες 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 κινητήρα

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.

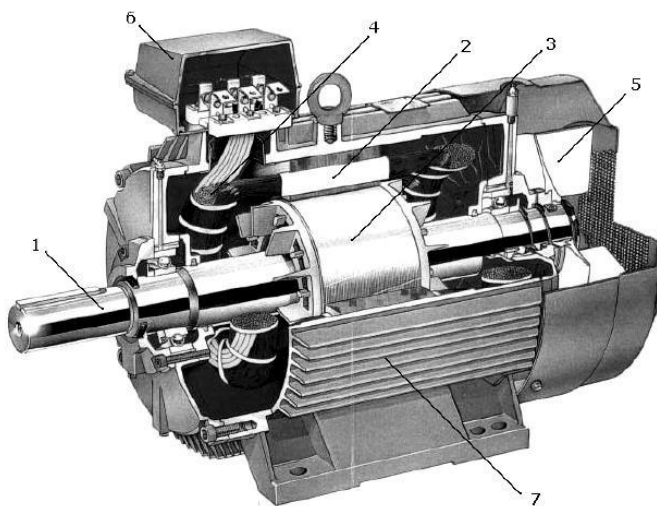
Γεγονότα και εξελίξεις που σημάδεψαν την ιστορία των κινητήρων επαγωγής είναι τα εξής [7]:

- Όλο και καλύτερα αναλυτικά μοντέλα μόνιμης κατάστασης
- Καλύτερα μονωτικά υλικά και συστήματα ψύξης
- Φθηνοί 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

1.3 Κατασκευαστικά στοιχεία μηχανών επαγωγής

Όπως οι περισσότερες μηχανές, μια επαγωγική μηχανή διαθέτει ένα σταθερό εξωτερικό μέρος, που ονομάζεται στάτης και ένα δρομέα ο οποίος περιστρέφεται στο εσωτερικό με ένα προσεκτικά κατασκευασμένο διάκενο αέρος μεταξύ των δύο. Το *σχήμα 1.3* είναι μια τομή της μηχανής όπου φαίνονται τα κύρια κατασκευαστικά στοιχεία της. [1]



Σχήμα 1.3 Κινητήρας επαγωγής βραχυκυκλωμένου κλωβού:

1.Άξονας 2.Στάτης 3.Δρομέας 4.Τυλίγμα στάτη 5.Φτερωτή ανεμισμού 6.Κιβώτιο σύνδεσης τυλιγμάτων/ακροδεκτών 7. Πλαίσιο (Κατασκευή ABB, 90kW, 1484 ΣΑΛ, 630kg) [1]

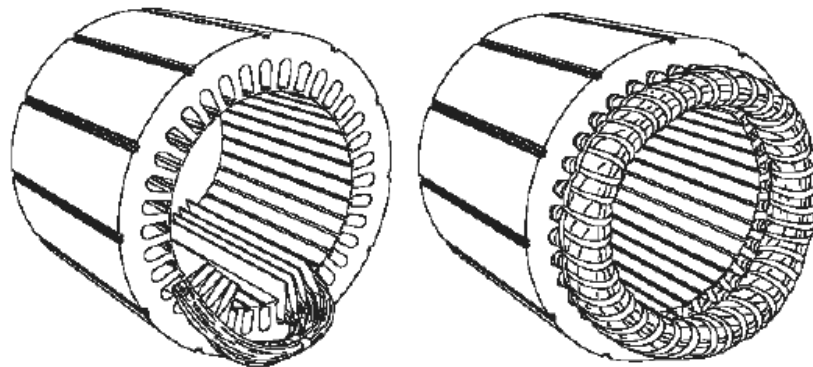
Πρακτικά όλες οι μηχανές χρησιμοποιούν την περιστροφή ενός μαγνητικού πεδίου για την κίνηση του δρομέα τους. Η τριφασική επαγωγική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος είναι ο μόνος τύπος μηχανής όπου το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγεται φυσικά στο στάτη λόγω της φύσης της τροφοδοσίας. Οι μηχανές συνεχούς ρεύματος εξαρτώνται είτε από μηχανική είτε από ηλεκτρονική μετατροπή για τη δημιουργία στρεφόμενων μαγνητικών πεδίων ενώ η μονοφασική επαγωγική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος εξαρτάται από επιπρόσθετα ηλεκτρικά στοιχεία.

Στο εσωτερικό κάθε μηχανής σχηματίζονται δύο σύνολα ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Στην επαγωγική μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος το ένα σύνολο σχηματίζεται στο στάτη λόγω της τροφοδοσίας που συνδέεται στα τυλίγματα του. Η εναλλασσόμενη μορφή της τροφοδοσίας επάγει μια ηλεκτρομαγνητική δύναμη (ΗΜΔ) στο δρομέα σύμφωνα με το νόμο του Lenz και έτσι δημιουργείται το δεύτερο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο (εξ ου και το

όνομα επαγωγική μηχανή). Η αλληλεπίδραση των δύο αυτών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων παράγει ροπή. Ως αποτέλεσμα η μηχανή περιστρέφεται στην κατεύθυνση της παραγόμενης ροπής.

1.3.1 Στάτης

Ο στάτης είναι κατασκευασμένος από λεπτά φύλλα αλουμινίου ή σιδήρου τα οποία συνδέονται μεταξύ τους ώστε να σχηματίσουν ένα κοίλο κύλινδρο, τον πυρήνα του στάτη, με αυλακώσεις όπως φαίνεται στο *σχήμα 1.4*.



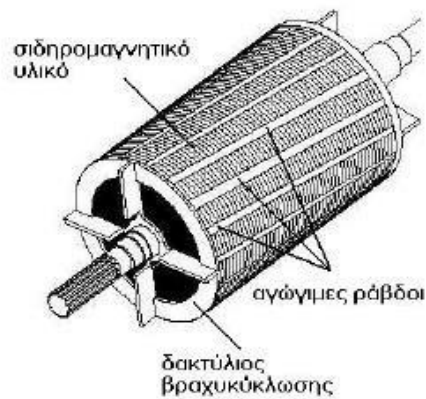
Σχήμα 1.4 Στάτης μηχανής επαγωγής [1]

Τα τυλίγματα τοποθετούνται κατά κανόνα στις ομοιόμορφα διανεμημένες αύλακες του σιδηρομαγνητικού υλικού 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 των τριφασικών μηχανών συνδέονται σε αστέρα ή τρίγωνο. Τα τυλίγματα μπορεί να είναι μονής ή διπλής στρώσης. Στα τυλίγματα διπλής στρώσης κάθε αύλακα περιέχει δύο πλευρές πηνίου, μια στην κορυφή και μια στον πυθμένα της. Κάθε πηνίο έχει μια πλευρά σε πάνω μέρος και την άλλη σε κάτω μέρος αύλακας. Ανάλογα με το τύλιγμα και την τροφοδότηση η μηχανή μπορεί να έχει οποιοδήποτε αριθμό μαγνητικών πόλων. [1,3]

1.3.2 Δρομέας

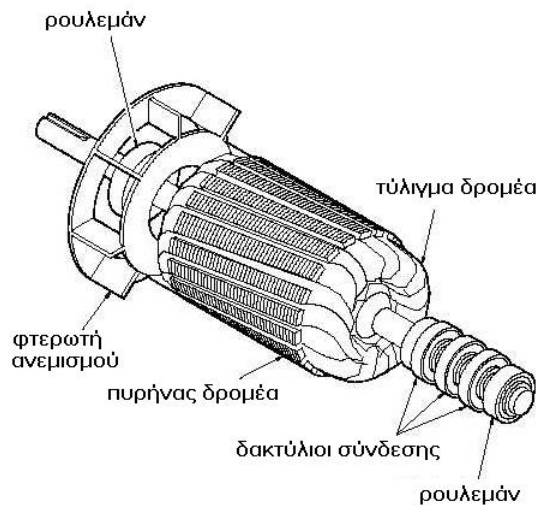
Στο δρομέα της μηχανής επαγωγής, το τύλιγμα είναι ηλεκτρικά κλειστό και πολύ συχνά δεν έχει εξωτερικούς ακροδέκτες. Υπάρχουν δύο τύποι τυλιγμάτων δρομέα που χρησιμοποιούνται:

- **Τύλιγμα κλωβού:** Το τύλιγμα αυτό αποτελείται από αγωγίμες ράβδους αλουμινίου ή χαλκού οι οποίες βραχυκυκλώνονται στα άκρα τους με δακτυλίους και τοποθετούνται σε αύλακες στο πυρήνα του δρομέα.



Σχήμα 1.5 Δρομέας με τύλιγμα κλωβού [1]

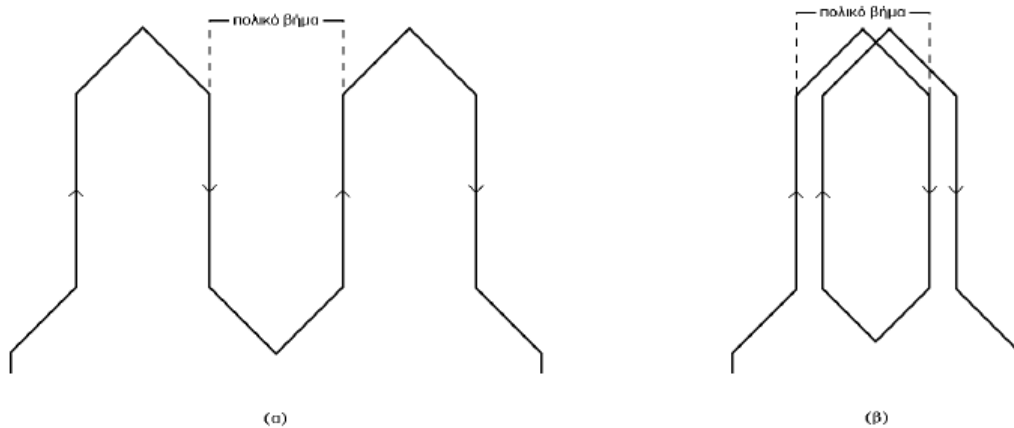
- Τύλιγμα δρομέα με δακτυλίους :** Τυλιγμένοι δρομείς για κινητήρες μέχρι 10kW εφοδιάζονται με συμμετρικά τριφασικά τυλίγματα όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στο στάτη. Για δρομείς κινητήρων μεγαλύτερης ισχύος χρησιμοποιούνται σχεδόν πάντοτε δύο στρώματα με δύο πλευρές πηνίου σε κάθε αύλακα και με ακέραιο ή κλασματικό αριθμό αυλάκων ανά πολικό βήμα και φάση q . Η σύνδεση των τριών φάσεων στο δρομέα γίνεται συνήθως κατά αστέρα.



Σχήμα 1.6 Τυλιγμένος δρομέας [1]

1.3.3 Τυλίγματα

Η επιλογή του είδους του τυλίγματος της μηχανής έχει στόχο την όσο καλύτερη χωρική κατανομή του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Υπάρχουν δύο ειδών τυλίγματα. Το **βροχοειδές** τύλιγμα (σχήμα 1.7 β), που συναντάται συνήθως σε μηχανές με μικρό αριθμό πόλων, κινητήρες πολλών στροφών ή γεννήτριες θερμικών σταθμών και το **κυματοειδές** (σχήμα 1.7α), που συναντάται σε κινητήρες χαμηλών στροφών ή γεννήτριες υδροηλεκτρικών σταθμών.



Σχήμα 1.7 Τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών: (α) κυματοειδές, (β) βροχοειδές [8]

1.3.3.1 Συγκεντρωμένο και διανεμημένο τύλιγμα

Η βασικότερη διάκριση των τυλιγμάτων των ηλεκτρικών μηχανών είναι αυτή ανάμεσα στο συγκεντρωμένο και στο διανεμημένο τύλιγμα.

Το **διανεμημένο** τύλιγμα αποτελεί την πιο καθιερωμένη και ευρέως χρησιμοποιούμενη επιλογή. Η ιδέα του διανεμημένου τυλιγματος προέκυψε από την ανάγκη για παραγωγή ημιτονοειδούς ΗΕΔ ή ΜΕΔ στο διάκενο (χωρική κατανομή), προκειμένου να παραχθεί στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Γνωρίζουμε όμως ότι το κύμα ΜΕΔ ενός πηνίου έχει γενικά τετραγωνική μορφή.

Αρα για να επιτευχθεί ημιτονικότητα, είναι αναγκαία η κατάλληλη τοποθέτηση των πηνίων στα αυλάκια ώστε να καταφέρουμε χρησιμοποιώντας ορθογωνικές κατανομές, να προσεγγίσουμε την ημιτονική. Αυτό σημαίνει ότι οι σπείρες κάθε τυλιγματος, κατανέμονται κατάλληλα στα αυλάκια, προκειμένου να σχηματίσουν πηνία πλήρους ή κλασματικού βήματος. Όσο περισσότερες είναι οι **πλευρές πηνίου ανά πόλο και φάση**, τόσο καλύτερα προσεγγίζουμε την ημιτονική κυματομορφή.

Σε αντίθεση με το διανεμημένο, στο **συγκεντρωμένο** τύλιγμα, όλες οι σπείρες τυλίγονται σε σειρά σχηματίζοντας ένα πολύκλωνο πηνίο. Κάθε πηνίο, τυλίγεται γύρω από ένα δόντι κι έτσι κατασκευάζεται το τύλιγμα της μηχανής.

Αν γνωρίζουμε τους πόλους και τις αυλάκες μιας μηχανής, ένας γρήγορος τρόπος να διαπιστώσουμε αν το τύλιγμα της είναι συγκεντρωμένο είναι, να εξετάσουμε τον αριθμό αυλάκων ανά πόλο και φάση q . Ο αριθμός αυτός δίνεται από τη βασική σχέση:

$$q = \frac{Q}{m \cdot P} \quad (1.1)$$

, όπου m ο αριθμός των φάσεων (συνήθως $m = 3$).

Εάν ισχύει $q < 1$, τότε το τύλιγμα είναι συγκεντρωμένο.

Το συγκεντρωμένο τύλιγμα αποτελεί μια μοντέρνα τοπολογία, η επιλογή της οποίας γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλής χάρη στα σημαντικά **πλεονεκτήματα** που παρουσιάζει. Τα κυριότερα από αυτά είναι τα εξής [4]:

- Κοντύτερα, μη επικαλυπτόμενα άκρα τυλιγμάτων (μειωμένες απώλειες Cu).
- Εύκολη κατασκευή, λιγότερα πηνία.
- Δεν υπάρχουν αμοιβαίες αυτεπαγωγές μεταξύ φάσεων, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη ανοχή σε αντίστοιχα σφάλματα.
- Κατάλληλα για λειτουργία εξασθένησης πεδίου (flux weakening), λόγω υψηλής αυτεπαγωγής ευθέως άξονα.
- Μεγαλύτερες τιμές συντελεστή πληρότητας χαλκού στην αύλακα.

Από την άλλη πλευρά, το **διανεμημένο τύλιγμα**:

- Προσφέρει καλύτερη ημιτονικότητα, άρα μικρότερη αρμονική παραμόρφωση τάσης, και χαμηλότερες παρασιτικές ροπές (cogging torque).
- Παρέχει περισσότερες κατασκευαστικές επιλογές, όσον αφορά τους δυνατούς συνδυασμούς για τον αριθμό των πόλων και των αυλακιών.
- Συνδυάζεται καλύτερα με ασύγχρονες μηχανές.
- Προσφέρει μεγαλύτερη ΗΕΔ, χάρη στον υψηλότερο συντελεστή τυλίγματος kw, που επιτυγχάνεται, ειδικά σε μηχανές IPM.

Το συγκεντρωμένο τύλιγμα, είναι δυνατό να υλοποιηθεί μόνο με τους συνδυασμούς πόλων και αυλακιών που φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα. [18]

Table 3.3: Fundamental winding factors for different combinations of pole and slot numbers and double-layer windings.

Q_s/p	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
6	0.866		0.866	0.5		0.5	0.866		0.866	0.5		0.5	0.866		0.866	0.5		0.5	0.866
9	0.617	0.866	0.945	0.945	0.866	0.617	0.328		0.328	0.617	0.866	0.945	0.945	0.866	0.617	0.328		0.328	0.617
12	$q=1$		0.866	0.933		0.933	0.866								0.866	0.933		0.933	0.866
15			0.621	0.866		0.951	0.951		0.866	0.621								0.621	0.866
18		$q=1$		0.647	0.866	0.902	0.945		0.945	0.902	0.866	0.647							
21						0.866	0.89		0.953	0.953		0.89	0.866						
24			$q=1$			0.76	0.866		0.933	0.95		0.95	0.933		0.866	0.76			
27								0.866	0.877	0.915	0.945	0.954	0.954	0.945	0.915	0.877	0.866		
30				$q=1$					0.866	0.874		0.936	0.951		0.951	0.936		0.874	0.866
33										0.866		0.903	0.928		0.954	0.954		0.928	0.903
36					$q=1$						0.866	0.867	0.902	0.933	0.945	0.953		0.953	0.945
39												0.866	0.863		0.918	0.936		0.954	0.954
42						$q=1$							0.866		0.89	0.913		0.945	0.953
45														0.866	0.859	0.886		0.927	0.945
48							$q=1$								0.866	0.857		0.905	0.933
51																0.866		0.88	0.901
54								$q=1$									0.866	0.854	0.877
57																		0.866	0.852
60									$q=1$										0.866

$q=1/2, 1/4$	$q=3/8, 3/10$	$Q_s=21+6k, p=Q_s\pm 1, k=0, 1, 2 \dots$
$q=3/7, 3/11$	$q=5/14, 5/16$	$Q_s=24+6k, p=Q_s\pm 2, k=0, 1, 2 \dots$
$q=2/5, 2/7$	not appropriate	$k_{w1} < 0.866$

Σχήμα 1.8: Δυνατοί συνδυασμοί πόλων-αυλάκων για συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης, και οι αντίστοιχοι συντελεστές k_w [18]

Οι τιμές κάθε κελιού αντιστοιχούν στο συντελεστή τυλίγματος που επιτυγχάνεται για κάθε δυνατό συνδυασμό πόλων-αυλάκων. Ικανοποιητικές τιμές συντελεστή τυλίγματος, θεωρούνται αυτές που προσεγγίζουν την μονάδα, και ένα συχνό όριο είναι να απαιτείται $k_w \geq 0.866$, έτσι ώστε να μην προκαλείται μεγάλη απομείωση της θεμελιώδους της επαγόμενης τάσης. Παρατηρούμε ότι για μια ολιγοπολική μηχανή, η επιλογή συγκεντρωμένου τυλίγματος μας περιορίζει σημαντικά όσον αφορά τον αριθμό των αυλάκων που θα επιλέξουμε.

1.3.3.2

Τυλίγματα πλήρους και κλασματικού βήματος

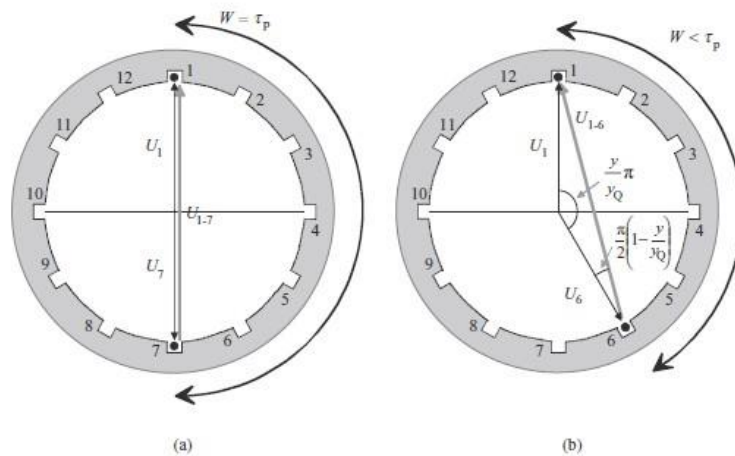
Ως **πολικό βήμα** ορίζεται η γωνιακή απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πόλων της μηχανής. Ανεξάρτητα από τον αριθμό των πόλων της μηχανής, ένα πολικό βήμα αντιστοιχεί πάντοτε σε 180 ηλεκτρικές μοίρες. Η μηχανική γωνία που αντιστοιχεί σε ένα πολικό βήμα είναι:

$$\rho_p = \frac{360}{p} \quad (1.2)$$

Ως **βήμα ενός πηνίου (coil-pitch)** ορίζεται η γωνιακή απόσταση μεταξύ των δύο πλευρών του εν λόγω πηνίου (coil sides). Αν η απόσταση αυτή είναι ίση με την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πόλων, τότε λέμε ότι έχουμε τύλιγμα **πλήρους** βήματος. Αντίθετα, αν η απόσταση αυτή είναι μικρότερη, και αποτελεί ένα κλάσμα του πολικού βήματος, τότε έχουμε τύλιγμα **κλασματικού** βήματος.

Για παράδειγμα ένα πηνίο κλασματικού βήματος 5/6, καλύπτει τα πέντε έκτα της

απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών πόλων της μηχανής. Στο σχήμα 1.9, αναπαρίσταται η ίδια τοπολογία, αρχικά με τύλιγμα πλήρους, και στη συνέχεια με τύλιγμα κλασματικού βήματος:



Σχήμα 1.9: Τοπολογία πλήρους (a) και κλασματικού (b) τυλίγματος.[8]

Γενικότερα, το βήμα ενός πηνίου κλασματικού βήματος, δίνεται σε ηλεκτρικές μοίρες, από την παρακάτω σχέση [4] :

$$\rho = \frac{\theta m}{\rho_p} \cdot 180^\circ \quad (1.3)$$

Το κλασματικό βήμα αποτελεί μια ιδιαίτερα διαδεδομένη σχεδιαστική επιλογή, καθώς επιτυγχάνει την απομείωση των ανώτερων αρμονικών χώρου που εισάγουν τα τυλίγματα. Η απομείωση αυτή επιτυγχάνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

Η χρήση του κλασματικού βήματος διπλής στρώσης σε μια μηχανή, συνεπάγεται ότι σε κάποιες από τις αύλακές της, θα φιλοξενοούνται αγωγοί διαφορετικών φάσεων μέσα στην ίδια αύλακα. Αυτό έχει ως συνέπεια την δημιουργία ρευμάτων, οι γωνίες των οποίων (αν αυτά περιγραφούν ως διανύσματα χώρου) θα λαμβάνουν τιμές μεταξύ των γωνιών των δύο διαφορετικών φάσεων, που συνυπάρχουν στη συγκεκριμένη αύλακα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η δημιουργία ρευμάτων (άρα και αντίστοιχων κυμάτων ΜΕΔ) με ενδιάμεσες τιμές φάσης, οι οποίες συμβάλλουν στην ημιτονικότητα της κατανομής.

Εκτός βέβαια από στην απομείωση των αρμονικών, με το κλασματικό βήμα απομειώνεται σε κάποιο βαθμό και η θεμελιώδης συνιστώσα των παραγόμενων κυμάτων ΜΕΔ, γεγονός που έχει δυσμενείς συνέπειες στην ικανότητα ροπής της μηχανής. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιείται κατά τη σχεδίαση ένας συμβιβασμός μεταξύ των αντικρουόμενων κριτηρίων, και μια τυπική απαίτηση προβλέπει οι αρμονικές να περιορίζονται τελικά στο 5% της θεμελιώδους συνιστώσας.

Ειδικά στις **ασύγχρονες** μηχανές όπου το πεδίο του δρομέα δεν προκύπτει από δική μας διέγερση, αλλά ακολουθεί το πεδίο του στάτη, οι ανώτερες αρμονικές στάτη και δρομέα συμβάλλουν δημιουργώντας σοβαρά προβλήματα απωλειών, θορύβου και μηχανικών

καταπονήσεων.

Στις **σύγχρονες** μηχανές η επιτακτικότητα για τύλιγμα κλασματικού βήματος δεν είναι τόσο μεγάλη, καθώς φροντίζουμε το τύλιγμα δρομέα να δημιουργεί χωρικές αρμονικές διαφορετικής τάξης από αυτές του στάτη. Τέλος, στις μηχανές **μονίμων μαγνητών** δεν υπάρχουν τυλίγματα στο δρομέα με αποτέλεσμα να μην τίθεται ζήτημα συμβολής των επιμέρους αρμονικών.

Συντελεστές βήματος και πλάτους τυλίγματος

Η μείωση που προκαλείται στην αντι-HEΔ λόγω κλασματικού βήματος, ποσοτικοποιείται μέσω του **συντελεστή βήματος k_p (pitch factor)**, ο οποίος ορίζεται ως:

$$k_{pn} = \sin \frac{n \cdot \text{βήμα πηνίου}}{2} \quad (1.4)$$

, όπου n η τάξη της αρμονικής, για την οποία γίνεται ο υπολογισμός. Μπορούμε επομένως να διαλέξουμε κατάλληλο κλασματικό βήμα, προκειμένου να επιτύχουμε μοναδιαίο συντελεστή βήματος για την τάξη αρμονικής που μας ενδιαφέρει.

Στη γεωμετρία διανεμημένου τυλίγματος με $q > 1$, πηνία της ίδιας φάσης τοποθετούνται σε διαδοχικές αύλακες. Οι επιμέρους τάσεις προστίθενται διανυσματικά, με αποτέλεσμα η συνολική τάση στα άκρα του τυλίγματος να είναι ελαφρώς απομειωμένη λόγω της γωνίας μεταξύ των διανυσμάτων. Η απομείωση αυτή της επαγόμενης τάσης ποσοτικοποιείται με το **συντελεστή βήματος k_d (distribution factor)**, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$k_{dn} = \frac{\sin \frac{n \cdot m \cdot \alpha}{2}}{m \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (1.5)$$

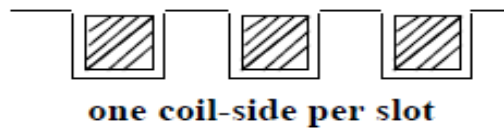
, όπου : n η τάξη της αρμονικής
 m ο αριθμός πηνίων ανά φάση
 α το βήμα αύλακος

1.3.3.3 Τυλίγματα απλής και διπλής στρώσης

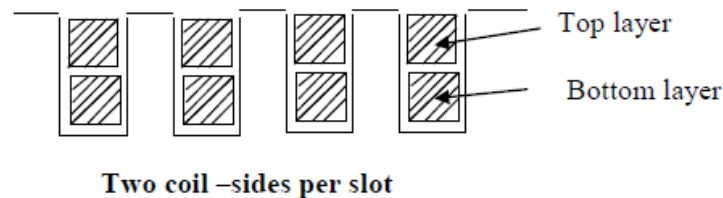
Μια βασική διάκριση των τυλιγμάτων ηλεκτρικών μηχανών είναι σε τυλίγματα απλής και διπλής στρώσης.

Στα τυλίγματα απλής στρώσης, σε κάθε αύλακα όλος ο χώρος καταλαμβάνεται από **μία μόνο πλευρά πηνίου** (Σχήμα 1.10).

Αντίθετα, στα τυλίγματα διπλής στρώσης, μέσα στην ίδια αύλακα υπάρχει άρτιος αριθμός (συνήθως 2) πλευρών πηνίου, που χωρίζουν το αυλάκι σε δύο στρώματα (Σχήμα 1.11).

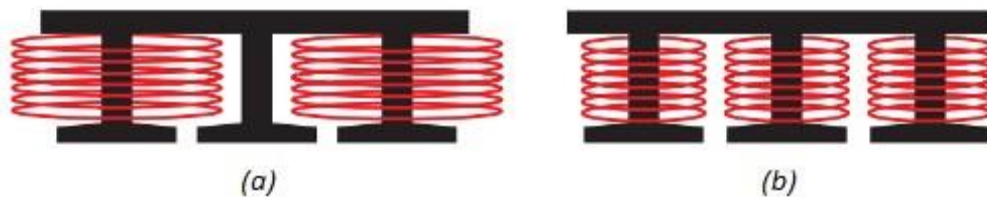


Σχήμα 1.10: Τύλιγμα απλής στρώσης.[9]



Σχήμα 1.11: Τύλιγμα διπλής στρώσης.[9]

Στην περίπτωση του **συγκεντρωμένου** τυλίγματος, το τυλίγμα διπλής στρώσης θα έχει ένα πηνίο τυλιγμένο γύρω από κάθε δόντι (σχήμα 1.12.b) , ενώ στο απλής στρώσης (σχήμα 1.12.a), τα πηνία θα τυλίγονται γύρω από εναλλασσόμενα δόντια (“δόντι παρά δόντι”).



Σχήμα 1.12: Συγκεντρωμένο τύλιγμα απλής (a) και διπλής (b) στρώσης.[9]

Το τύλιγμα διπλής στρώσης παρουσιάζει ένα πλήθος από πλεονεκτήματα σε σχέση με το τύλιγμα μονής στρώσης, του οποίου η χρήση περιορίζεται σε μικρές μηχανές.

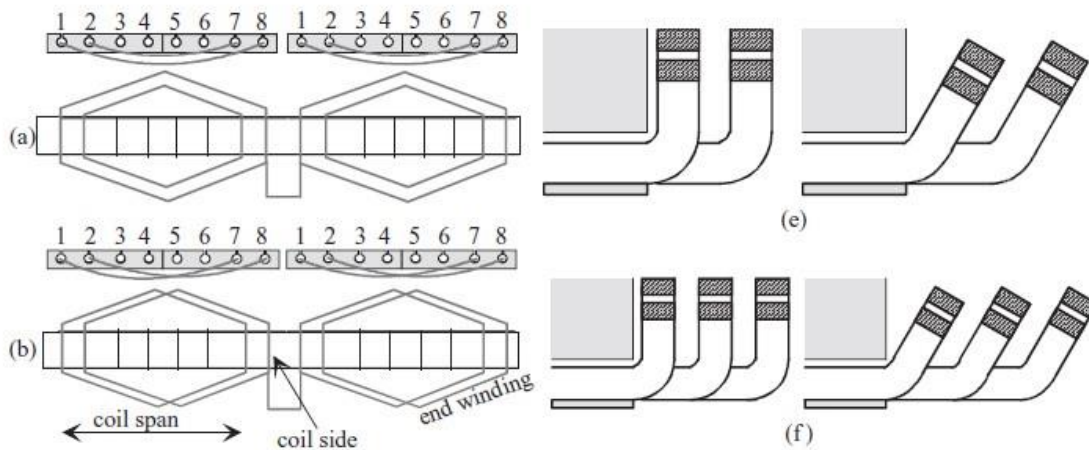
Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του τυλίγματος διπλής στρώσης είναι τα εξής:

- Επιτρέπει τη δημιουργία διανεμημένου τυλίγματος κλασματικού βήματος.
- Επιτυγχάνεται πιο ημιτονοειδής αντι-ΗΕΔ.
- Ευκολότερη κατασκευή, και χαμηλότερο κόστος πηνίων.
- Πιο κοντά άκρα τυλιγμάτων, άρα μικρότερες σκεδάσεις σε αυτά.

1.3.3.4 Άκρα τυλιγμάτων

Ονομάζουμε **άκρα ενός πηνίου**, τα κομμάτια του πηνίου, τα οποία δεν βρίσκονται μέσα στις αύλακες αλλά εξέρχουν από αυτές. Τα άκρα όλων των πηνίων διαμορφώνουν τελικά τα άκρα του τυλίγματος της μηχανής. Είναι δυνατό, για τις ίδιες απαιτήσεις παραγωγής μαγνητικής ροής να επιτύχουμε διαφορετικές διαμορφώσεις των άκρων των πηνίων, κατανέμοντας κατάλληλα τις σπείρες στα αυλάκια της μηχανής.

Στο σχήμα 1.13 φαίνονται δύο διαφορετικές διαμορφώσεις άκρων τυλίγματος.



Σχήμα 1.13: Διαφορετικές διαμορφώσεις άκρων τυλιγμάτων.[9]

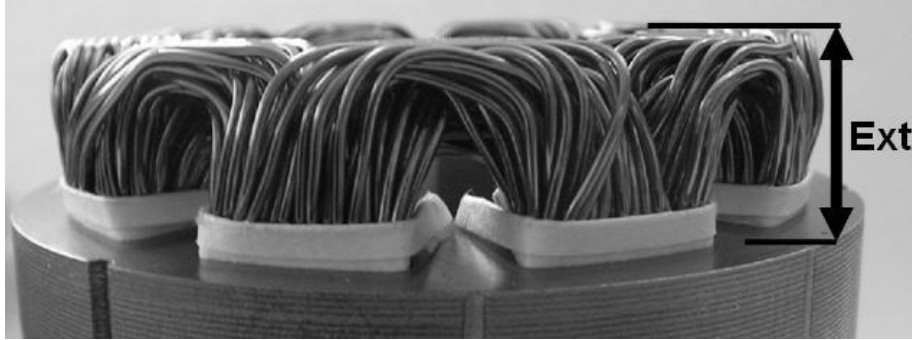
Το τύλιγμα του σχήματος (a) ονομάζεται **ομόκεντρο** (concentric winding), και παράγει άκρα τυλίγματος της μορφής του σχήματος (e). Παρατηρούμε ότι η έκταση που καλύπτει κάθε πηνίο είναι διαφορετική, καθώς και ότι τα άκρα πηνίων σχηματίζουν δύο ξεχωριστά, μη επικαλυπτόμενα επίπεδα.

Το τύλιγμα του σχήματος (b) ονομάζεται **αδαμαντοειδές** (diamond winding), και παράγει άκρα τυλίγματος της μορφής του σχήματος (f). Αντίθετα από το ομόκεντρο, στο αδαμαντοειδές τύλιγμα όλα τα πηνία έχουν το ίδιο πλάτος. Όπως αναφέραμε, στις δύο αυτές διαμορφώσεις τα άκρα τυλίγματος διαφέρουν, όμως το τύλιγμα μέσα στις αύλακες είναι πανομοιότυπο.

Αυτό σημαίνει ότι η κύρια μαγνητική ροή που παράγεται είναι ίδια, όμως οι σκεδάσεις θα είναι διαφορετικές, καθώς όπως φαίνεται στο σχήμα (e), οι αυτεπαγωγές σκέδασης εμπλέκουν τα άκρα πηνίων των τυλιγμάτων μόνο δύο φάσεων, ενώ στο σχήμα (f), εμπλέκονται και οι 3 φάσεις του τυλίγματος.

Συμπεραίνουμε τελικά ότι με κατάλληλη διαμόρφωση των άκρων τυλίγματος μπορούμε να μειώσουμε τις ανεπιθύμητες σκεδάσεις, και να περιορίσουμε έτσι τις αντίστοιχες απώλειες της μηχανής.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η κατασκευαστική διαμόρφωση του τυλίγματος μιας πραγματικής μηχανής, για συγκεντρωμένο και διανεμημένο τύλιγμα.



Σχήμα 1.14: Άκρα συγκεντρωμένου τυλίγματος.[9]



Σχήμα 1.15: Άκρα διανεμημένου τυλίγματος.[9]

Παρατηρούμε ότι, τα άκρα των ομάδων πηνίων είναι σαφώς κοντύτερα στην περίπτωση του συγκεντρωμένου τυλίγματος. Αντίθετα, στο διανεμημένο τυλίγμα, μεγάλο μέρος του τυλίγματος εξέρχει του ενεργού μέρους της μηχανής, γεγονός που αυξάνει τις απώλειες λόγω σκεδάσεως της μαγνητικής ροής.

Αυτό το πλεονέκτημα του συγκεντρωμένου τυλίγματος, είναι ιδιαίτερα κρίσιμο, όταν η μηχανή προορίζεται για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης καθώς προσφέρει οικονομία χώρου και ευρωστία στην κατασκευή.

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]:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (1.6)$$

, όπου f είναι η ηλεκτρική συχνότητα τροφοδοσίας και p το πλήθος πόλων μηχανής.

Αντίστοιχα σε rad/sec η σύγχρονη ταχύτητα είναι:

$$\omega_s = \frac{2\pi \cdot f}{p/2} \quad (1.7)$$

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

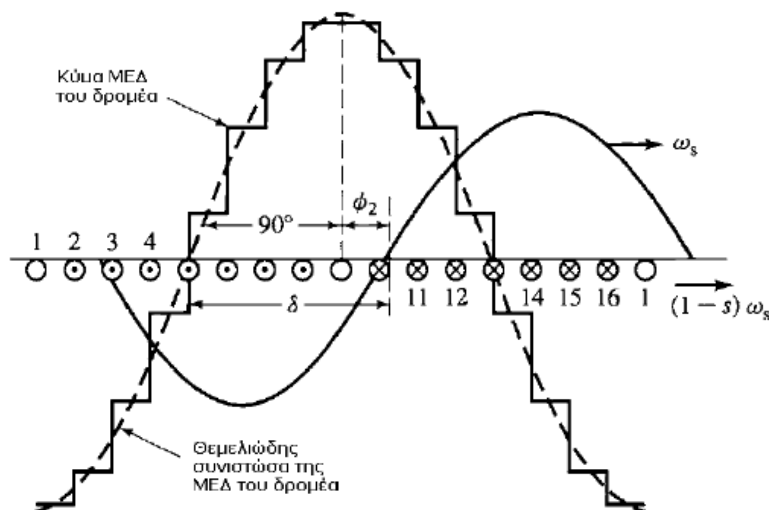
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1.8)$$

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

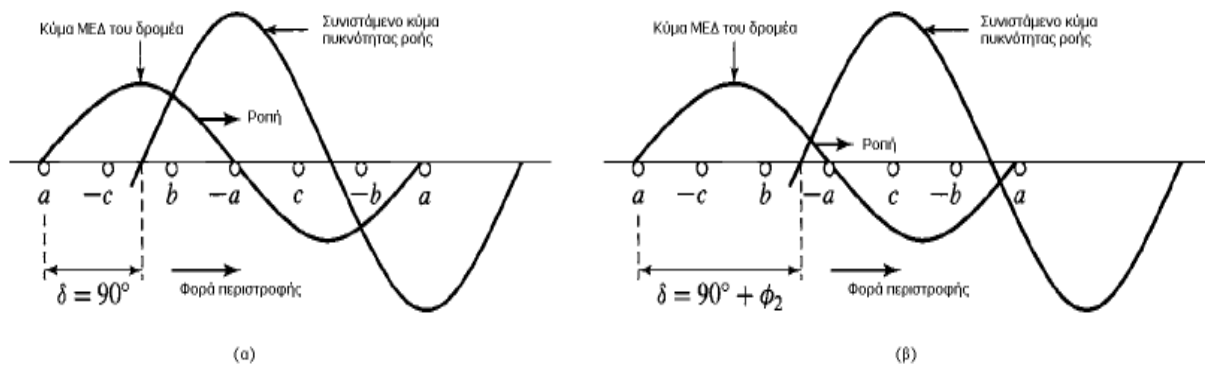
$$n = (1-s) \cdot n_s \quad (1.9)$$

Το κύμα πυκνότητας ροής του στάτη κινείται ως προς το δρομέα με την ταχύτητα ολίσθησης $s \cdot n_s$. Επάγει συνεπώς στο τύλιγμα του δρομέα εναλλασσόμενες τάσεις συχνότητας $s \cdot f$, όπου f είναι η συχνότητα των ρευμάτων του στάτη. Επειδή ο δρομέας είναι βραχυκυκλωμένος, οι επαγόμενες στο τύλιγμα του τάσεις θα προκαλέσουν εναλλασσόμενα τριφασικά ρεύματα και συνακόλουθα ένα μαγνητικό πεδίο που θα στρέφεται με ταχύτητα $s \cdot n_s \cdot \omega_s$ προς το δρομέα. Ως προς το στάτη συνεπώς, το μαγνητικό πεδίο του δρομέα περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα n_s . Το κύμα της μαγνητεγερτικής δύναμης (ΜΕΔ) του δρομέα σχηματίζει επομένως μια σταθερή γωνία με το συνιστάμενο κύμα ροής, η οποία υπερβαίνει τις 90 ηλεκτρικές μοίρες κατά τη γωνία του συντελεστή ισχύος $\cos\phi_2$ του τυλίγματος του δρομέα.

Τα κύματα μαγνητικής ροής και ΜΕΔ στο διάκενο φαίνονται στο Σχήμα 1.16 και Σχήμα 1.17 για την περίπτωση τυλίγματος κλωβού και τυλιγμένου δρομέα, αντίστοιχα.



Σχήμα 1.16: Ανάπτυξη κύματος ΜΕΔ σε δρομέα με τύλιγμα κλωβού [1]



Σχήμα 1.17: Σνιστάμενο κύμα ΜΕΔ και κύμα ΜΕΔ δρομέα: (α) $\cos\phi_2=1$,
(β) $\cos\phi_2\neq 1$ [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 μιας φάσης. Τα ρεύματα και οι τάσεις των άλλων φάσεων μπορούν να βρεθούν με κατάλληλη μετακίνηση της φάσης ($\pm 120^\circ$ στην περίπτωση τριφασικής μηχανής).

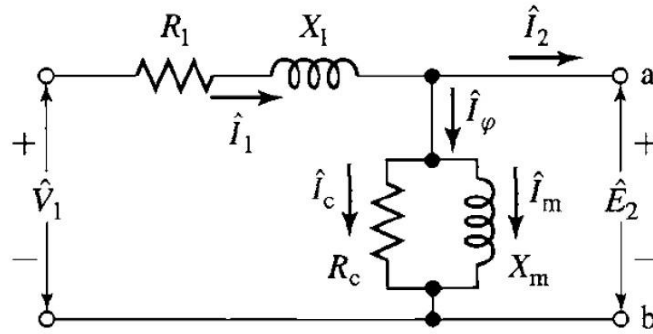
Αρχικά θεωρείται ο στάτης. Το κύμα ροής του διακένου που στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα παράγει συμμετρικές πολυφασικές αντι-ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις στις φάσεις του στάτη. Η τάση ακροδεκτών του στάτη διαφέρει από την αντι-ΗΕΔ κατά την πτώση τάσης στο σύνθετη αντίσταση σκεδάσεως του στάτη $Z_1=R_1+jX_1$.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

$$\widehat{V}_1 = \widehat{E}_2 + \widehat{I}_1 \cdot (R_1 + jX_1) \quad (1.10)$$

, όπου :

- \widehat{V}_1 : είναι η τάση ακροδεκτών στάτη
- \widehat{E}_2 : η αντι-ΗΕΔ που αναπτύσσεται από τη συνιστάμενη ροή διακένου
- \widehat{I}_1 : το ρεύμα του στάτη
- R_1 : η πραγματική αντίσταση στάτη
- X_1 : η αντίδραση σκεδάσεως του στάτη

Οι θετικές φορές των ρευμάτων και των τάσεων σημειώνονται στο ισοδύναμο κύκλωμα που φαίνεται στο Σχήμα 1.18.



Σχήμα 1.18: Ισοδύναμο κύκλωμα στάτη κινητήρα επαγωγής [1]

Η συνισταμένη ροή διακένου δημιουργείται από τις συνδυασμένες ΗΕΔ των ρευμάτων του στάτη και τα δρομέα. Ακριβώς όπως στο ανάλογο του μετασχηματιστή, το ρεύμα μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες. Η συνιστώσα φορτίου I_2 παράγει ΜΕΔ η οποία αντιτίθεται ακριβώς στην ΗΕΔ του ρεύματος του δρομέα. Η συνιστώσα διεγέρσεως I_ϕ είναι το πρόσθετο ρεύμα του στάτη το οποίο απαιτείται για τα δημιουργία της συνισταμένης ροής διακένου και είναι συνάρτηση της ΗΕΔ E_1 . Το ρεύμα διεγέρσεως μπορεί να αναλυθεί σε μια συνιστώσα απωλειών πυρήνα I_π σε φάση με την E_1 και σε μια συνιστώσα μαγνήτισης I_m που έπεται της ΗΕΔ 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 μαγνητίζουσα αγωγιμότητα b_m παράλληλα με την τάση E_1 , όπως φαίνεται στο σχήμα 1.18. Τόσο η g_π όσο και η b_m συνήθως καθορίζονται στην ονομαστική συχνότητα του στάτη και για μια τιμή της E_1 πλησίον της αναμενόμενης τιμής λειτουργίας. Γίνεται η παραδοχή ότι και τα δύο μεγέθη παραμένουν σταθερά για τις μικρές αποκλίσεις από την τιμή 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 είναι δακτυλιοφόρος. Από την πλευρά τα ισοδύναμου κυκλώματος του στάτη του Σχήματος 1.18, ο δρομέας μπορεί να παρασταθεί σαν μια σύνθετη αντίσταση Z_2 :

$$Z_2 = \frac{\hat{E}_2}{\hat{I}_2} \quad (1.11)$$

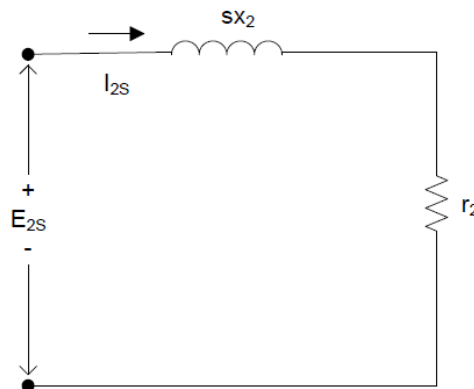
, που αντιστοιχεί στη σύνθετη αντίσταση σκέδασης ενός σταθερού δευτερεύοντος.

Για την ολοκλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος, πρέπει να προσδιοριστεί η αντίσταση αυτή, ανάγοντας τις ποσότητες στάτη και δρομέα (ρεύματα και τάσεις) σε ποσότητες του δρομέα ανηγμένες στο στάτη. 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 τυλίγματος 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:

$$Z_{2s} = \frac{\hat{E}_{2s}}{\hat{I}_{2s}} = r_2 + j \cdot x_2 \quad (1.12)$$

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 η συχνότητα ολισθήσεως $f_r = s \cdot f_e$ μπορεί να αναχθεί στη συχνότητα αυτή απλά πολλαπλασιάζοντας την με την ολίσθηση s . Το ισοδύναμο κύκλωμα, όπως φαίνεται από το πλαίσιο αναφοράς της συχνότητας ολισθήσεως των ρευμάτων του δρομέα, δίνεται στο Σχήμα 1.19.



Σχήμα 1.19 : Ισοδύναμο ανά δάση κύκλωμα δρομέα πολυφασικής μηχανής επαγωγής στη συχνότητα ολισθήσεως [1]

Στη συνέχεια παρατηρείται ότι το κύμα ΜΕΔ διακένου παράγεται από τη συνδυασμένη δράση του ρεύματος στάτη I_1 και του αντίστοιχου ρεύματος φορτίου I_2 . Το ίδιο μπορεί να εκφραστεί παρομοίως σε όρους ρεύματος στάτη και αντίστοιχου ρεύματος δρομέα I_{2s} . Αυτά τα δύο ρεύματα είναι ίσα σε πλάτος αφού το I_{2s} ορίζεται ως το ρεύμα ενός ισοδύναμου δρομέα με τον ίδιο αριθμό ελιγμάτων ανά φάση με το στάτη. Καθώς το συνιστάμενο κύμα ΜΕΔ διακένου καθορίζεται από το ανυσματικό άθροισμα του ρεύματος στάτη και δρομέα, είτε του πραγματικού ή του ισοδύναμου δρομέα, τα I_2 και I_{2s} πρέπει επίσης να είναι ίσα σε φάση (στις αντίστοιχες ηλεκτρικές τους συχνότητες) γι' αυτό θεωρείται:

$$\hat{I}_{2s} = \hat{I}_2 \quad (1.13)$$

Τέλος, το κύμα ροής του διακένου επάγει και την ΗΕΔ E_{2s} στη συχνότητα ολισθήσεως του δρομέα και την αντι-ΗΕΔ E_1 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:

$$E_{2s} = s \cdot E_1 \quad (1.14)$$

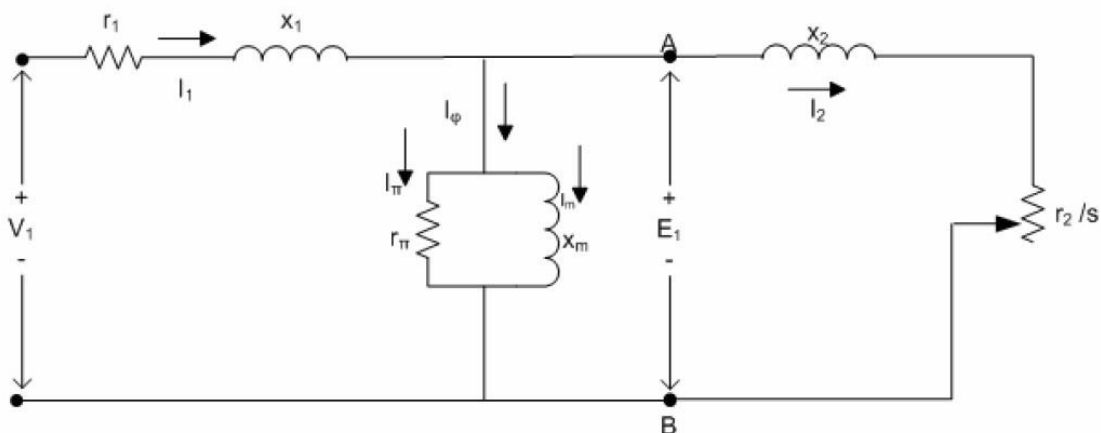
Καθώς η φάση κάθε μιας από αυτές τις τάσεις και του προκύπτοντας κύματος ροής διακένου είναι 90° , αυτές οι δύο τάσεις πρέπει επίσης να έχουν ίσους φασιθέτες στις αντίστοιχες ηλεκτρικές τους συχνότητες.

Εύκολα προκύπτει ότι :

$$\frac{\hat{E}_{2s}}{\hat{I}_{2s}} = \frac{s \cdot \hat{E}_1}{\hat{I}_2} = r_2 + j \cdot x_2 \quad (1.15)$$

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 (1.20). 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 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.



Σχήμα 1.20: Ισοδύναμο κύκλωμα πολυφασικού κινητήρα επαγωγής [1]

1.4.1 Ανάλυση Ισοδύναμου Κυκλώματος

Από το κύκλωμα του σχήματος 1.20 μπορούν να υπολογισθούν το ρεύμα, η ενεργός και η άεργος ισχύς που απορροφούνται από τον κινητήρα σε δεδομένη ολίσθηση s . Επί πλέον μπορούν να καθορισθούν οι συνθήκες μηχανικής εξόδου.

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

$$P_{g1} = m_1 \cdot E_1 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2 \quad (1.16)$$

, όπου m_1 ο αριθμός των φάσεων του στάτη.

Η αντίστοιχη ροπή θα είναι τότε:

$$T = \frac{1}{\omega_s} \cdot m_1 \cdot E_1 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2 = \frac{P_s}{4\pi f} \cdot m_1 \cdot E_1 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2 \cdot N_m \quad (1.17)$$

, 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:

$$T = \frac{1}{\omega_s} \cdot P_{g1} \quad (1.18)$$

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

$$P_{g1} = m_1 \cdot I_2^2 \cdot \frac{r_s}{s} \quad (1.19)$$

$$T = \frac{1}{\omega_s} \cdot m_1 \cdot I_2^2 \cdot \frac{r_s}{s} \quad (1.20)$$

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

$$P = (1-s) \cdot \omega_s \cdot T = (1-s) \cdot P_{g1} \quad (1.21)$$

, 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 ολισθήσεως είναι γι' αυτό:

$$P_{g2} = s \cdot P_{g1} \quad (1.22)$$

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 :

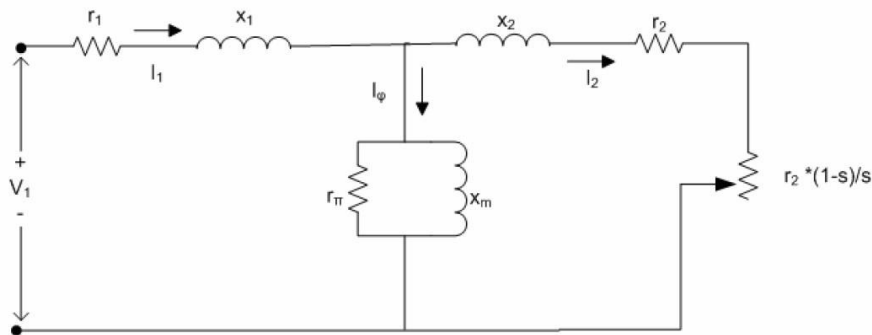
$$\text{Απώλειες χαλκού δρομέα} = s \cdot P_{g1} = s \cdot \omega_s \cdot T \quad (1.23)$$

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

Αντικατάσταση της εξίσωσης 1.19 στην εξίσωση 1.21 δίνει για την εσωτερική μηχανική ισχύ:

$$P = m_1 \cdot I_2^2 \cdot r \cdot \frac{1-s}{s} \quad (1.24)$$

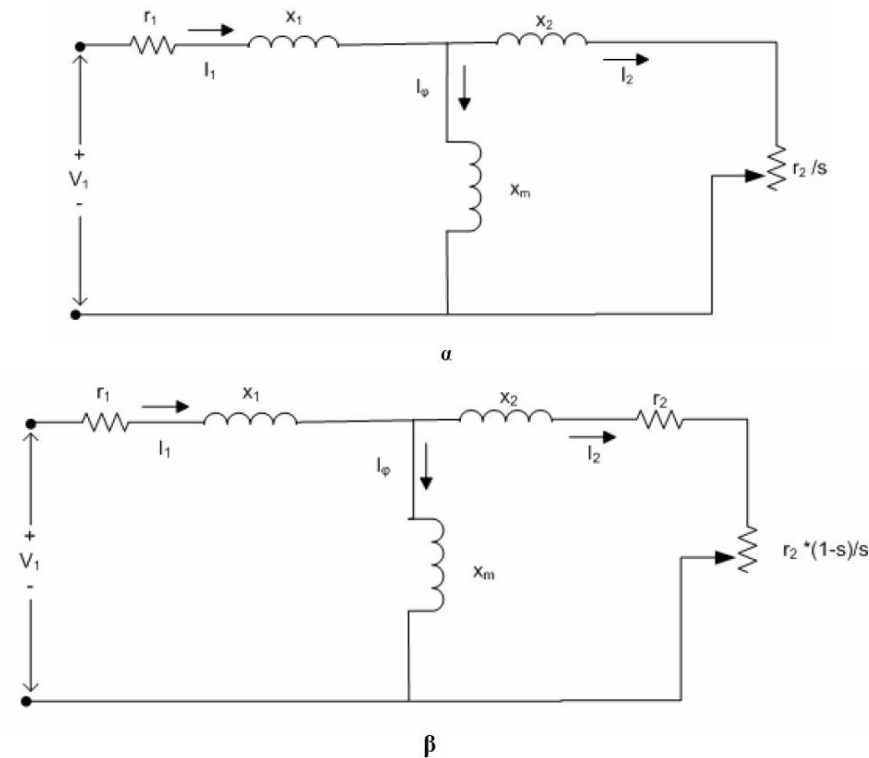
Όταν πρέπει να θεωρηθούν απόψεις ισχύος, το ισοδύναμο κύκλωμα σχεδιάζεται συχνά όπως το σχήμα 1.21. Η εσωτερική μηχανική ισχύς ανά φάση στάτη ισούται με την ισχύ που απορροφάται από την αντίσταση $r_2=(1-s)/s$.



Σχήμα 1.21: Ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα μηχανής επαγωγής για προσδιορισμό ισχύος [1]

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.

Μια απλούστευση του ισοδυνάμου κυκλώματος της μηχανής προκύπτει αν η παράλληλη αντίσταση r_π 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 το σχήμα 1.22α ή 1.22β 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. Τα τελευταία αυτά κυκλώματα θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα κεφάλαια.



Σχήμα 1.22: Απλουστευμένα ισοδύναμα κυκλώματα. Η απώλεια πυρήνα συντίθεται με τις απώλειες τριβής και ανεμισμού. [1]

1.4.2 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 ισοδύναμου κυκλώματος. Με την ανάλυση αυτή η τάση του στάτη V_1 στα κυκλώματα του σχήματος 1.22 αντικαθίσταται με την ισοδύναμη τάση V_{th} η οποία υπολογίζεται ως εξής :

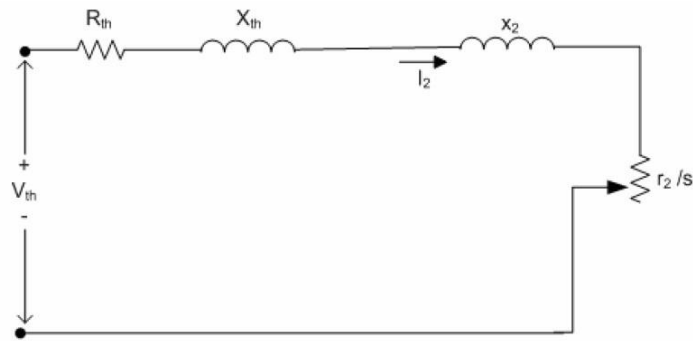
$$V_{th} = V_1 \cdot \frac{j \cdot x_m}{r_1 + j \cdot (x_1 + x_m)} \quad (1.25)$$

Οι σύνθετες αντιστάσεις αντικαθίστανται με τις ισοδύναμες αντιστάσεις :

$$Z_{th} = (r_1 + j \cdot x_1) // x_m \Rightarrow$$

$$Z_{th} = R_{th} + j \cdot X_{th} \quad (1.26)$$

Έτσι προκύπτει το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 1.23 :



Σχήμα 1.23: Απλοποιημένο κατά Thevenin ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής επαγωγής [1]

Από το παραπάνω σχήμα μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί το ρεύμα I_2 το οποίο όταν αντικατασταθεί στην εξίσωση ροπής 1.20 δίνει την έκφραση της ροπής μέσω του ισοδυνάμου κυκλώματος.

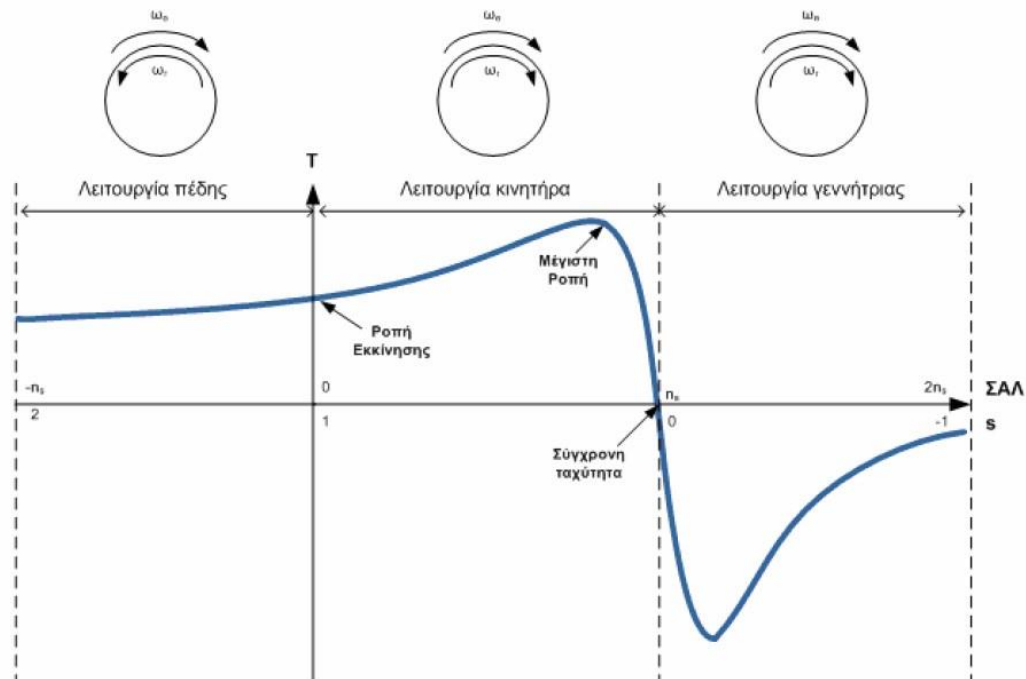
$$I_2 = \frac{V_{th}}{Z_{th} + Z_2} = \frac{V_{th}}{\left(R_{th} + \frac{r_2}{s}\right) + j \cdot (X_{th} + X_2)} \quad (1.27)$$

$$I_2^2 = \frac{V_{th}^2}{\left(R_{th} + \frac{r_2}{s}\right)^2 + (X_{th} + x_2)^2}$$

$$\Rightarrow T = m_1 \cdot \frac{p}{2} \cdot \frac{r_2}{s} \cdot \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{V_{th}^2}{\left(R_{th} + \frac{r_2}{s}\right)^2 + (X_{th} + x_2)^2} \quad (1.28)$$

Από την εξίσωση 1.24 μπορεί να χαραχθεί η καμπύλη ροπής – ολισθήσεως που φαίνεται στο σχήμα 1.24. Στο σχήμα 1.24 διακρίνονται οι τρεις περιοχές λειτουργίας της επαγωγικής μηχανής. Ανάλογα με την ολίσθηση η μηχανή συμπεριφέρεται ως κινητήρας, ως γεννήτρια ή βρίσκεται σε κατάσταση πέδησης.

Η πρώτη περιοχή λειτουργίας που διακρίνεται είναι η λειτουργία πέδησης η οποία υφίσταται για τιμές ολισθήσεως $1 < s < 2$. Η μηχανή εισέρχεται στην περιοχή αυτή όταν κατά την διάρκεια λειτουργίας της ως κινητήρας (επόμενη περίπτωση) 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 στη ήδη υπάρχουσα ροπή (μηχανική) του δρομέα, γεγονός που οδηγεί στην πέδηση της μηχανής. Αν μόλις εξισωθούν οι δύο ροπές αποσυνδεθεί η τροφοδοσία τότε γίνεται αποτελεσματική πέδηση του κινητήρα.



Σχήμα 1.24: Καμπύλη Ροπής- Στροφών [T-ns] και Ροπής-Ολισθήσεως [T-s] [1]

Η δεύτερη περιοχή λειτουργίας είναι η κανονική περιοχή λειτουργίας της μηχανής ως κινητήρα. $0 < s < 1$. 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 ημιγραμμικώς μέχρι τη μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής. Σε αυτή την περιοχή λειτουργίας η πώση τάσεως στο στάτη είναι χαμηλή και η ροή διακένου παραμένει περίπου σταθερή. Πέραν της ροπής ανατροπής η ηλεκτρομαγνητική ροπή μειώνεται με την αύξηση της ολισθήσεως και για $s=1$ βρίσκεται η ροπή εκκινήσεως. Αντικατάσταση του s στην εξίσωση της ροπής (1.28) δίνει τη ροπή εκκίνησης.

$$T_{ΕΚΚ} = m_1 \cdot \frac{p}{2} \cdot r_2 \cdot \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{V_{th}^2}{(R_{th} + r_2)^2 + (X_{th} + x_2)^2} \quad (1.29)$$

Η μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής προκύπτει αν από την εξίσωση της ροπής (1.28) παρατηρηθεί ότι η ροπή γίνεται μέγιστη όταν η προσδιόμενη 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:

$$\frac{r_2}{s_{maxT}} = \sqrt{R_{th} + (X_{th} + x_2)^2} \quad (1.30)$$

Η μέγιστη ροπή τότε είναι:

$$T_{max} = m_1 \cdot \frac{p}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{V_1^2}{R_{th} + \sqrt{R_{th} + (X_{th} + x_2)^2}} \quad (1.31)$$

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 γεννήτρια. 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 σύμφωνα με την εξίσωση:

$$P_{εσσ} = (1 - s) \cdot P_g \quad (1.32)$$

, όπου η ροπή λαμβάνεται θετική αλλά η ταχύτητα αρνητική έτσι αν η εσωτερική ισχύς είναι αρνητική τότε και η ισχύς διακένου θα είναι αρνητική.

1.4.3 Κατάταξη Κινητήρων Επαγωγής

Λόγω τις 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. [2],[3]

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 αντίστοιχων 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:

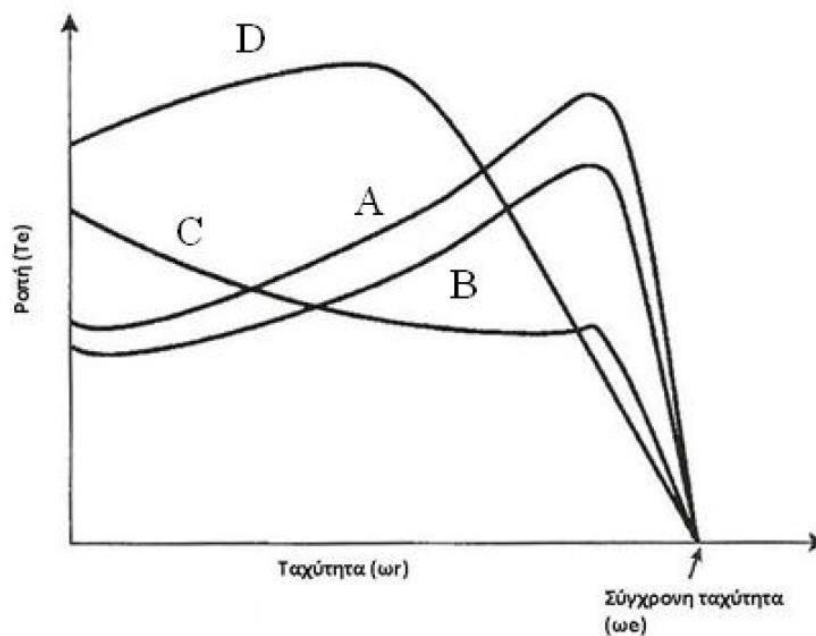
Οι κινητήρες κλάσεως C είναι κινητήρες με υψηλή ροπή εκκινήσεως, χαμηλό ρεύμα εκκινήσεως. Αυτός ο σχεδιασμός χρησιμοποιεί δρομέα διπλού κλωβού με αντίσταση μεγαλύτερη από αυτή των κινητήρων της κλάσης B. Το αποτέλεσμα είναι υψηλότερη ροπή εκκινήσεως με χαμηλότερα ρεύματα εκκινήσεως αλλά κατά το μάλλον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

Κατασκευαστική κλάση D:

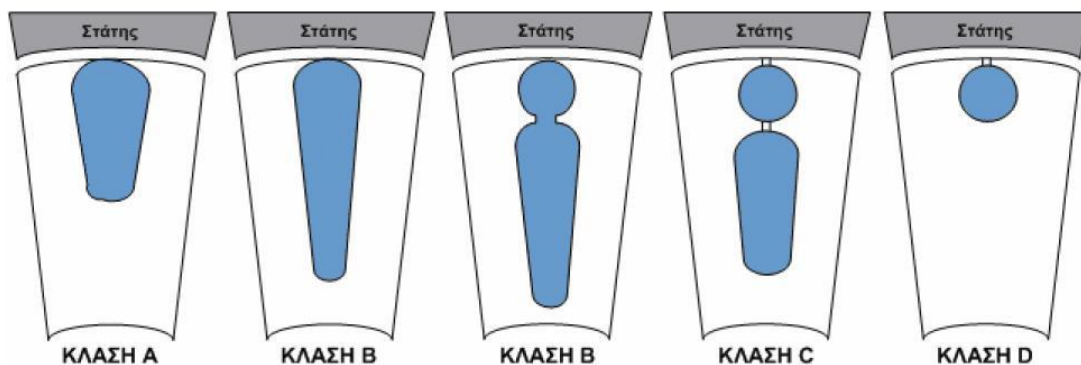
Οι κινητήρες της κλάσεως D διαθέτουν μεγάλη αντίσταση δρομέα, οπότε η ροπή ανατροπής εμφανίζεται σε κάποιο σημείο με μεγάλη ολίσθηση, ενώ η ροπή εκκίνησής τους είναι αρκετά υψηλή (πάνω από το 275% της ονομαστικής ροπής). Παρουσιάζουν μικρό ρεύμα εκκίνησης, αλλά επίσης υψηλή ολίσθηση στη λειτουργία υπό 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 1.25* παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ροπής – στροφών των πιο πάνω κλάσεων κινητήρων, στο *σχήμα 1.26* φαίνονται οι διαφοροποιήσεις στον κλωβό του δρομέα για την επίτευξη των χαρακτηριστικών κάθε κλάσης και στον *πίνακα 1.2* φαίνονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά κάθε κλάσης.



Σχήμα 1.25: Χαρακτηριστικές Ροπής-Στροφών των κλάσεων A, B, C και D κατά NEMA. [3]



Σχήμα 1.26: Αύλακες δρομέα των διαφόρων κλάσεων. [3]

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

***Πίνακας 1.2:** Χαρακτηριστικά κινητήρων ανά κατασκευαστική κλάση*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η παρουσίαση των βασικών μεγεθών που λαμβάνονται υπόψιν κατά τη διαστασιολόγηση ενός ηλεκτρικού κινητήρα και τα βήματα που ακολουθούνται κατά την προκαταρκτική σχεδίαση. Συνοψίζονται επίσης οι βασικές αρχές της ανάλυσης κινητήρων με πεπερασμένα στοιχεία.

2.1 Κατασκευαστικά υλικά ηλεκτρικών μηχανών

Ο πυρήνας του στάτη ή του δρομέα κατασκευάζεται από σιδηρομαγνητικά υλικά, ώστε να μεταφέρεται η μαγνητική ροή στα κατάλληλα σημεία της μηχανής. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά παρουσιάζουν ιδιότητες οι οποίες είναι χρήσιμες αλλά και προβληματικές. Για το λόγο αυτό, οι κατασκευαστές ηλεκτρικών μηχανών πρέπει να μελετήσουν τις ιδιότητες και τα προβλήματα που παρουσιάζουν και να επιλέξουν τον κατάλληλο τύπο υλικού. Η μεταβλητότητα της μαγνητικής ροής στον πυρήνα σε συνδυασμό με το κόστος των επιμέρους υλικών καθορίζουν την επιλογή χρησιμοποίησης λαμαρίνας ή συμπαγούς σιδήρου.

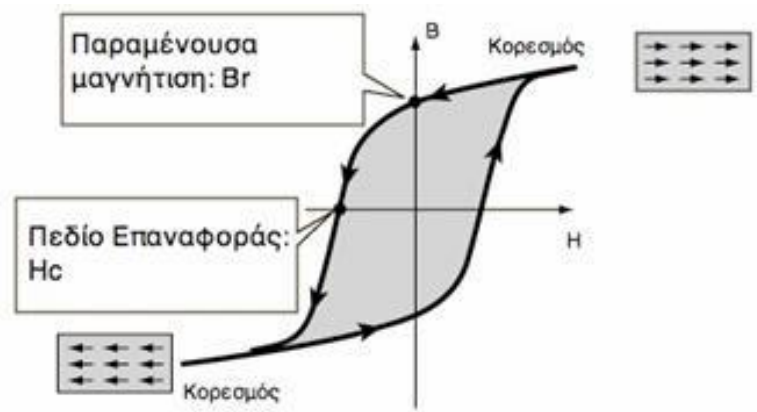
Τα υλικά κατασκευής του πυρήνα θα πρέπει να εμφανίζουν τις ακόλουθες μαγνητικές και ηλεκτρικές ιδιότητες:

- Υψηλή μαγνητική επιδεκτικότητα και διαπερατότητα, για να έχει χαμηλή μαγνητική αντίδραση το μαγνητικό κύκλωμα.
- Υψηλή μαγνητική επαγωγή κορεσμού, ώστε να διέρχεται περισσότερη μαγνητική ροή ανά μονάδα όγκου, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται ο όγκος και το βάρος της μηχανής.
- Μικρό εμβαδό βρόχου υστέρησης και μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα για μειωμένες ειδικές απώλειες καθώς έτσι επιτυγχάνεται υψηλή απόδοση και μικρή θερμοκρασιακή αύξηση κατά τη λειτουργία. Επίσης, μειώνονται οι απαιτήσεις απαγωγής θερμότητας και η μέθοδος ψύξης γίνεται απλούστερη και λιγότερο δαπανηρή. Συνεπώς η επιλογή υλικών χαμηλών απωλειών μειώνει το λειτουργικό κόστος της ηλεκτρικής μηχανής.

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά κατηγοριοποιούνται σε μαλακά και σκληρά. Στα μαλακά μαγνητικά υλικά η κανονική καμπύλη μαγνήτισης εμφανίζει μεγάλη κλίση, ενώ ο βρόχος υστέρησης έχει μικρό εμβαδόν. Εξαιτίας αυτού, οι απώλειες υστέρησης είναι μειωμένες. Επιπλέον, τα υλικά αυτά εμφανίζουν μικρή τιμή παραμένουστος μαγνητισμού και πολύ μεγάλη σχετική διαπερατότητα. Μερικά παραδείγματα μαλακών σιδηρομαγνητικών υλικών είναι ο μαλακός σίδηρος, ο πυριτιούχος χάλυβας, τα κράματα σιδήρου-νικελίου τύπου Permalloy, και άλλα. Χρησιμοποιούνται σε διατάξεις όπως μετασχηματιστές ισχύος, ηλεκτρικές γεννήτριες και κινητήρες, που υπόκεινται στην επίδραση χρονικά μεταβαλλόμενων μαγνητικών πεδίων. Από την άλλη, στην περίπτωση των σκληρών σιδηρομαγνητικών υλικών, η κανονική καμπύλη μαγνήτισης δεν εμφανίζει τόσο μεγάλη κλίση όσο των μαλακών υλικών, ενώ το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης είναι μεγάλο. Επιπλέον, εμφανίζουν μεγάλη τιμή παραμένουστος στα μαγνητισμού και χαμηλή σχετική διαπερατότητα. Ο βρόχος υστέρησης φαίνεται στο *Σχήμα 2.1*.

Στα σκληρά μαγνητικά υλικά η κανονική καμπύλη μαγνήτισης δεν ανεβαίνει απότομα ενώ το εμβαδό του βρόχου υστέρησης είναι μεγάλο, είναι επομένως προφανές ότι οι απώλειες υστέρησης στα υλικά αυτά είναι επίσης μεγάλες. Εμφανίζουν μεγάλο παραμένουστος μαγνητισμό και χαμηλή σχετική διαπερατότητα. Ένα τυπικό σκληρό μαγνητικό υλικό

είναι το κράμα Alnico. Τα σκληρά μαγνητικά υλικά είναι κατάλληλα για την κατασκευή μονίμων μαγνητών στους οποίους επιδιώκεται να έχουν μεγάλες τιμές τόσο για την παραμένουσα μαγνήτιση B_r τόσο και για το πεδίο αναφοράς H_c , ώστε να μην είναι εύκολη η απομαγνήτισή τους.



Σχήμα 2.1 Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικών υλικών. [8]

Όσον αφορά το συμπαγή σίδηρο, η προσθήκη μικρής ποσότητας πυριτίου βελτιώνει πολλές από τις ιδιότητές του: Η ηλεκτρική του αντίσταση αυξάνεται, η μαγνητική αντίσταση μειώνεται αισθητά και βελτιώνεται η σταθερότητα των μαγνητικών χαρακτηριστικών στο χρόνο. Η αύξηση της περιεκτικότητας πυριτίου περιορίζεται από το γεγονός ότι ο σίδηρος γίνεται εύθραυστος και υποβαθμίζεται η αντοχή του σε μηχανικές καταπονήσεις. Επιπλέον, σημειώνεται μικρή μείωση στην επαγωγή κόρου. Η παρασκευή κράματος σιδήρου-πυριτίου απαιτεί θερμικές και μηχανικές διεργασίες, με συνέπεια το βελτιωμένο υλικό να έχει αυξημένο κόστος.

Η λαμαρίνα (ελάσματα σιδηρομαγνητικού υλικού) χρησιμοποιείται όταν υπάρχει εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί δινορρέυματα. Η χρήση της περιορίζει τα επαγόμενα δινορρέυματα διότι μειώνεται η αγώγιμη διαδρομή του ρεύματος. Για αυτό το σκοπό η μία ή και οι δύο επιφάνειες του ελάσματος είναι καλυμμένες με μονωτικό υλικό και ο προσανατολισμός τους είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής. Η μονωτική επίστρωση προστατεύει επίσης το σίδηρο από την οξείδωση.

Υπάρχουν δύο τύποι ελασμάτων, με κατευθυνόμενους κόκκους ή χωρίς. Τα ελάσματα χωρίς κατευθυνόμενους κόκκους είναι ιστροπικά και χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις ηλεκτρικές μηχανές. Τυπικές τιμές ειδικών απωλειών σε μαγνητική επαγωγή 1.5 T και συχνότητα πεδίου 50 Hz, είναι 3 W/Kg και 4 W/Kg για ελάσματα πάχους 0.35 mm και 0.5 mm αντίστοιχα. Αντιθέτως, τα ελάσματα με κατευθυνόμενους κόκκους παρουσιάζουν μία κατεύθυνση στην οποία οι μαγνητικές ιδιότητες είναι βελτιωμένες και χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών και όταν απαντώνται υψηλές συχνότητες. Τυπικές τιμές απωλειών σε αυτή την περίπτωση είναι 1

W/Kg σε 1.5 T, 50 Hz, για έλασμα πάχους 0.35 mm.

Για ειδικές εφαρμογές και υψηλές συχνότητες υπάρχουν και ελάσματα από κράμα Σιδήρου - Κοβαλτίου με την ονομασία “Permendur”. Αυτά παρουσιάζουν υψηλή μαγνητική επιτρεπτότητα και πολύ υψηλό σημείο κορεσμού. Χρησιμοποιούνται επίσης κράματα Σιδήρου - Νικελίου, “permalloy”, τα οποία εμφανίζουν πολύ υψηλή επιτρεπτότητα και μικρή τιμή πεδίου επαναφοράς, ενώ η μαγνητική επαγωγή κορεσμού τους είναι πολύ χαμηλή [5].

2.2 Θεμελιώδεις σχέσεις προκαταρκτικής σχεδίασης

Στο πλαίσιο της προκαταρκτικής σχεδίασης λαμβάνονται υπόψιν τα βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης και πραγματοποιούνται τα ακόλουθα βήματα: [17]

- Προσδιορισμός της επιφάνειας του διακένου ώστε να εξασφαλίζεται η απαραίτητη ηλεκτρομαγνητική ροπή σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.
- Προσδιορισμός των διαμορφώσεων δρομέα και στάτη που επιτρέπουν τη δημιουργία κατάλληλου μαγνητικού πεδίου στο διάκενο.
- Έλεγχος των μαγνητικών και ηλεκτρικών ειδικών φορτίσεων.
- Εύρεση απωλειών σιδήρου και χαλκού και απαιτήσεων σε ψύξη.

Τα παραπάνω βήματα γίνονται με βάση ορισμένες τυπικές τιμές βασικών μαγνητικών, ηλεκτρικών και θερμικών μεγεθών. Παρακάτω παρουσιάζονται αυτά τα μεγέθη και οι βασικές σχέσεις υπολογισμού τους στην περίπτωση του τριφασικού κινητήρα.

2.2.1 Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης

Ειδική μαγνητική φόρτιση

Η ειδική μαγνητική φόρτιση, \bar{B} , συνδέει τον αριθμό πόλων P με τη μαγνητική ροή ανά πόλο Φ και είναι:

$$\bar{B} = \frac{P \cdot \Phi}{\pi \cdot L \cdot D} \quad (2.1)$$

, όπου D είναι η διάμετρος του διακένου και L το αξονικό μήκος του ενεργού μέρους της μηχανής.

Το μέγεθος αυτό λαμβάνει συνήθως τιμές από 0.5 T ως 0.6 T και το άνω όριο τίθεται από το φαινόμενο του κορεσμού του σιδηρομαγνητικού υλικού στα δόντια του στάτη. Η υψηλή μαγνητική φόρτιση σημαίνει αυξημένη δυνατότητα παραγωγής ροπής και ισχύος. Το αντίτιμο είναι αυξημένες απώλειες πυρήνα, ειδικά όταν τα δόντια του στάτη βρίσκονται σε κορεσμό.

Ειδική ηλεκτρική φόρτιση

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση, ac , προσδιορίζεται από την ενεργό τιμή των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο περιφέρειας του διακένου, σύμφωνα με τη σχέση :

$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_s \cdot I}{\pi \cdot D} \quad (2.2)$$

Τυπικές τιμές ηλεκτρικής φόρτισης σύγχρονων μηχανών είναι από 15000 AE/m ως 45000 AE/m. Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση καθορίζει από κοινού με την ειδική μαγνητική φόρτιση την ικανότητα παραγωγής ροπής μιας δεδομένης μηχανής. Όσο αφορά τις απώλειες, η ηλεκτρική φόρτιση συνδέεται με τις απώλειες χαλκού της μηχανής.

Τα δύο παραπάνω μεγέθη συνδέονται με τη λεγόμενη σχέση εξόδου της ηλεκτρικής μηχανής, η οποία δίνει μια εκτίμηση της ροπής ή της ισχύος εξόδου. Για την εύρεση αυτής της σχέσης λαμβάνεται υπόψιν ότι:

- Η ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης, e , δίνεται από τη σχέση:

$$e = 4.44 \cdot k_w \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi \quad (2.3)$$

, όπου k_w είναι ο συντελεστής τυλίγματος, f η ηλεκτρική συχνότητα, N_s ο συνολικός αριθμός των ελιγμάτων ανά φάση και Φ η θεμελιώδης μαγνητική ροή ανά πόλο.

- Η φαινόμενη ισχύς της μηχανής δίνεται από τη σχέση:

$$S = 3 \cdot e \cdot I \quad (2.4)$$

, όπου I είναι το φασικό ρεύμα.

- Η ηλεκτρική συχνότητα f συνδέεται με τη μηχανική ταχύτητα περιστροφής, n , με τη σχέση:

$$n = \frac{2 \cdot f}{P} \quad (2.5)$$

Ο συνδυασμός των παραπάνω σχέσεων δίνει την εξίσωση εξόδου της ηλεκτρικής σύγχρονης μηχανής:

$$S = 1.11 \cdot k_w \cdot \pi^2 \bar{B} \cdot ac \cdot D^2 \cdot L \cdot n \quad (2.6)$$

Όπως φαίνεται από αυτή τη σχέση, η ισχύς εξόδου της μηχανής είναι ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου του διακένου και ανάλογη του αξονικού μήκους του ενεργού μέρους του πυρήνα. Έτσι λοιπόν, κατά τη σχεδίαση ενός κινητήρα η μιας γεννήτριας πρέπει να προσδιοριστεί ο πιο συμφέρων συνδυασμός ειδικής ηλεκτρικής και μαγνητικής φόρτισης, διαστάσεων διακένου και ταχύτητας περιστροφής ώστε να ληφθεί η επιθυμητή ισχύς στην έξοδο χωρίς να θυσιάστούν άλλα χαρακτηριστικά της μηχανής, όπως για παράδειγμα η απόδοση, το κόστος κατασκευής και το συνολικό βάρος.

Το μέγεθος μιας μηχανής και η τιμή της ονομαστικής της ισχύος είναι παράγοντες καθοριστικής σημασίας για την απόδοση. Μια εκτίμηση παρέχεται με τον υπολογισμό της μεταβολής της ισχύος εξόδου και των απωλειών όταν οι διαστάσεις μιας μηχανής μεγαθύνονται κατά τον ίδιο λόγο, έστω x . Όπως αποδεικνύεται, για δεδομένη θερμοκρασιακή αύξηση η ισχύς εξόδου αυξάνεται με συντελεστή $x^{3.5}$ ενώ οι απώλειες αυξάνονται με συντελεστή x^2 [4]. Αμελώντας τις μηχανικές απώλειες, η απόδοση, η , υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out}+P_{loss}} \approx \frac{x^{3.5}}{x^{3.5}+K \cdot x^2} \approx \frac{1}{1+\frac{K}{x^{1.5}}} \quad (2.7)$$

Η εξίσωση (2.7) δείχνει ότι η απόδοση αυξάνει με αύξηση στις γραμμικές διαστάσεις. Αυτό δικαιολογεί εν μέρει γιατί κινητήρες με ισχύ μικρότερη του ενός kW έχουν απόδοση της τάξης του 60%, ενώ γεννήτριες μεγάλης ισχύος έχουν απόδοση πάνω από 97%.

Οριακή τάση διακένου

Αποτελεί βασικό μέγεθος της μηχανικής αντοχής της μηχανής και δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή των 10 tn/cm². Το μέγεθος αυτό ορίζεται ως η φυγόκεντρος δύναμη του δρομέα ανά μονάδα επιφανείας.

Η φυγόκεντρος δύναμη δίνεται από τη σχέση:

$$F = m \cdot \omega_{rm} \cdot R \quad (2.8)$$

, όπου m η μάζα του δρομέα, ω_{rm} η μηχανική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του και R η ακτίνα του.

Έτσι, είναι :

$$\text{Οριακή Τάση Διακένου} = \frac{m \cdot \omega_{rm}}{2 \cdot \pi \cdot L} \quad (2.9)$$

Πυκνότητα ρεύματος του τυλίγματος

Η πυκνότητα ρεύματος του τυλίγματος αποτελεί βασικό ηλεκτρικό μέγεθος της μηχανής και σχετίζεται με τη θερμική της ισορροπία καθώς προσδιορίζει το μέγεθος των ωμικών απωλειών στο τυλίγμα της μηχανής. Στη συνήθη περίπτωση οι θερμικές απώλειες ισχύος στην ονομαστική κατάσταση λειτουργίας κατά πρώτο λόγο απώλειες χαλκού δεύτερο λόγο απώλειες σιδήρου. Οι θερμικές απώλειες προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας της μηχανής η οποία, μπορεί να επιφέρει καταστροφή των υλικών που την αποτελούν αν ξεπεραστούν τα όρια θερμικής αντοχής τους. Επίσης, μπορεί να προκληθεί υποβιβασμός της μονωτικής ικανότητας των μονωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται.

Ένα εμπειρικό όριο πυκνότητας ρεύματος είναι τα 4 A/mm², πάνω από το οποίο υπάρχει ανάγκη για εξαναγκασμένη ψύξη ώστε να αυξηθεί η ικανότητα παροχής ισχύος της ηλεκτρικής μηχανής. Η εξαναγκασμένη ψύξη υλοποιείται με τεχνητό αερισμό ή και με κλειστό σύστημα κυκλοφορίας ψυκτικού υγρού σε περίπτωση μηχανών μεγάλης ισχύος.

Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος ψύξης που χρησιμοποιείται ανάλογα με την ισχύ της μηχανής ώστε να διασφαλίζεται η ασφάλεια της μόνωσης φαίνεται στον Πίνακα 2.1.

Ισχύς ηλεκτρικής μηχανής	Μέθοδος ψύξης
$P_m < H_p$	Φυσική ψύξη
$H_p < P_m < 10^3 H_p$	Εξαναγκασμένη ψύξη αέρα
$10^3 < P_m < 10^5 H_p$	Υδροψυκτα τυλίγματα
$10^5 H_p < P_m$	Κυκλοφορία υγρού υδρογόνου

Πίνακας 2.1: Απαιτήσεις ψύξης ηλεκτρικών μηχανών ανάλογα με την ισχύ τους.

2.2.2 Βήματα της προκαταρκτικής σχεδίασης

Προσδιορισμός της επιφάνειας διακένου

Ο προσδιορισμός της ελάχιστης επιφάνειας του διακένου γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την μέγιστη επιθυμητή ροπή διακένου. Θεωρείται ότι για την παραγωγή της μέγιστης ροπής η ηλεκτρική γωνία των πεδίων στάτη και δρομέα είναι 90 ηλεκτρικές μοίρες. Αρχικά υπολογίζεται η επαπτομενική πίεση διακένου ως εξής:

$$P_t = \frac{\int_c \overline{B_n \cdot B_t} dl}{\pi \cdot D \cdot \mu_o} \quad (2.10)$$

, όπου B_n και B_t είναι η ακτινική και επαπτομενική μαγνητική επαγωγή διακένου αντίστοιχα και το ολοκλήρωμα εκτείνεται κατά μήκος του μέσου του διακένου.

Αφού υπολογιστεί η επαπτομενική πίεση, χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση για την εύρεση του γινομένου $D^2 L$:

$$T_{el,max} = \frac{\pi \cdot P_t \cdot D^2 \cdot L}{2} \quad (2.11)$$

Αναλογία διαστάσεων D και L

Η διαστασιολόγηση του διακένου της ηλεκτρικής μηχανής εμπλέκει θέματα επίδοσης, απόδοσης και μηχανικής αντοχής. Όσο αφορά την επίδοση, η σχέση (2.6) υποδεικνύει ότι είναι προτιμητέες δισκοειδείς μηχανές καθώς η ισχύς της μηχανής αυξάνεται με το τετράγωνο της διαμέτρου του διακένου. Από την άλλη, η απόδοση της μηχανής δεν αυξάνεται κατ' ανάγκη όταν η αναλογία D/L είναι αυξημένη. Ο λόγος είναι ότι σε περίπτωση μεγάλης διαμέτρου διακένου σε σχέση με το μήκος της μηχανής, αυξάνεται το ποσοστό του τυλίγματος που βρίσκεται έξω από την ενεργή περιοχή του πυρήνα και κατά συνέπεια οι θερμικές απώλειες. Επίσης, μια μηχανή με πολύ μακρύ διάκενο έχει μεγάλη μάζα πυρήνα και αναμένεται να εμφανίζει αυξημένες απώλειες πυρήνα, επομένως δεν επιτυγχάνει τη βέλτιστη απόδοση.

Η μηχανική αντοχή του δρομέα και η διαστασιολόγηση του διακένου εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Σε μικρές ταχύτητες περιστροφής προτιμάται μεγάλος

λόγος D/L. Σε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής, η οριακή τάση διακένου περιορίζει τον δρομέα σε μικρή ακτίνα και πλέον η επιθυμητή ισχύς λαμβάνεται με αύξηση του αξονικού μήκους της μηχανής. Και σε αυτή την περίπτωση όμως, υπάρχει μηχανικό όριο στην μείωση του λόγου D/L, το οποίο συνίσταται στην ακαμψία του σώματος του δρομέα και την διατήρηση του διακένου.

Στη βιβλιογραφία προσδιορίζονται ορισμένες αναλογίες που πρέπει να έχει μια μηχανή ώστε να χαρακτηρίζεται από υψηλή επίδοση, απόδοση ή ένα ισορροπημένο συνδυασμό των δύο [7]. Συνήθως γίνεται λόγος για το λόγο του αξονικού μήκους της μηχανής, L και του μήκους ενός πόλου, τ. Το μήκος πόλου δίνεται από τη σχέση:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{P} \quad (2.12)$$

Στον πίνακα 2.2 παρατίθενται οι περιοχές τιμών του λόγου L/τ, η κάθε μια από τις οποίες παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά.

L/τ	Χαρακτηριστικό ηλεκτρικής μηχανής
1.0	Ισορροπημένη σχεδίαση
1.0 - 1.5	Υψηλός συντελεστής ισχύος
1.5	Υψηλή απόδοση
1.5 - 2.0	Ελάχιστο κόστος

Πίνακας 2.2 : Περιοχές λόγου τιμών L/τ.

Ωστόσο, σε μηχανές με μικρό αριθμό πόλων και σε κινητήρες μικρής ισχύος (της τάξης των kW) μπορεί να παρατηρηθούν τιμές του λόγου L/τ μέχρι και 0.6. Ο λόγος είναι ότι σε αυτές τις μηχανές, οι μεγάλες τιμές L/τ δίνουν μικρή διάμετρο με αποτέλεσμα να μην υπάρχει αρκετός χώρος για τις αύλακες του στάτη.

Πάχος διακένου

Αν και αναφέρεται τελευταίο, το πάχος του διακένου είναι πρωτεύουσας σημασίας για την επίτευξη των επιθυμητών χαρακτηριστικών λειτουργίας μιας ηλεκτρικής μηχανής. Γενική αρχή είναι ότι το διάκενο πρέπει να έχει το μικρότερο δυνατό πάχος, το οποίο καθορίζεται από την ακρίβεια κατασκευής και την δυνατότητα μηχανικής στήριξης δρομέα και στάτη.

2.3 Πεδιακή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Η προκαταρκτική σχεδίαση ενός κινητήρα παρέχει μια βασική άποψη της απαιτούμενης διαμόρφωσης του σχεδιαζόμενου κινητήρα. Συμπληρωματικά, η πεδιακή ανάλυση μπορεί να δώσει λεπτομερή ανάλυση του μαγνητικού πεδίου και να οδηγήσει στην επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών του κινητήρα που αναμένονται από την προκαταρκτική σχεδίαση ή στην διαπίστωση της ανάγκης για βελτίωσή τους. Η πεδιακή ανάλυση παρέχει την κατανομή του μαγνητικού πεδίου και μέσω αυτής, με κατάλληλη μετεπεξεργασία μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια μεγέθη όπως, ροπή και δύναμη, απώλειες, πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος, όπως επίσης να εντοπιστούν περιοχές πυρήνα που βρίσκονται σε κορεσμό.

2.3.1 Μαγνητοστατικά προβλήματα

Μαγνητοστατικά ονομάζονται τα προβλήματα στα οποία το μαγνητικό πεδίο είναι αμετάβλητο στο χρόνο. Σε αυτή την περίπτωση, η ένταση του μαγνητικού πεδίου (H) και η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου (B) ικανοποιούν :

$$\nabla \times H = J \quad (2.13)$$

και

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.14)$$

Ικανοποιείται επίσης η θεμελιώδης σχέση μεταξύ B και H για κάθε υλικό:

$$B = \mu \cdot H \quad (2.15)$$

Αν το υλικό είναι μη γραμμικό, όπως για παράδειγμα κορεσμένος σίδηρος ή μαγνήτες μ nico, τότε η επιτρεπτικότητα μ , είναι στην πραγματικότητα μία συνάρτηση του B :

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \quad (2.16)$$

Η εύρεση του μαγνητικού πεδίου σε κάθε σημείο του χώρου μπορεί να επιτευχθεί υπολογίζοντας το διανυσματικό δυναμικό. Η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου γράφεται σε συνάρτηση του διανυσματικού δυναμικού, A , ως εξής:

$$B = \nabla \times A \quad (2.17)$$

Αυτός ο ορισμός του B ικανοποιεί πάντα την εξίσωση 2.14. Τότε, η 2.13 γράφεται ως εξής:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = J \quad (2.18)$$

Για ένα γραμμικό ιστροπικό μέσο(και υποθέτοντας ότι $\nabla \cdot A = 0$), η εξίσωση αυτή καταλήγει:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J \quad (2.19)$$

Στη γενική περίπτωση, το διανυσματικό δυναμικό είναι ένα διάνυσμα τριών

συνιστώσων. Σε δύο διαστάσεις όμως, οι δύο από αυτές τις τρεις συνιστώσες είναι μηδενικές, και μεταβάλλεται μόνο η κατακόρυφη συνιστώσα.

Το πλεονέκτημα της χρήσης του διανυσματικού δυναμικού είναι ότι όλες οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται στο μαγνητοστατικό πεδίο συνδυάζονται σε μία εξίσωση. Εάν είναι γνωστό το A , τα B και H προκύπτουν από διαφορίση του A . Η εξίσωση (2.18) έχει τη μορφή μιας ελλειπτικής μερικής διαφορικής εξίσωσης, για την επίλυση της οποίας έχει αναπτυχθεί μεγάλος αριθμός εργαλείων.

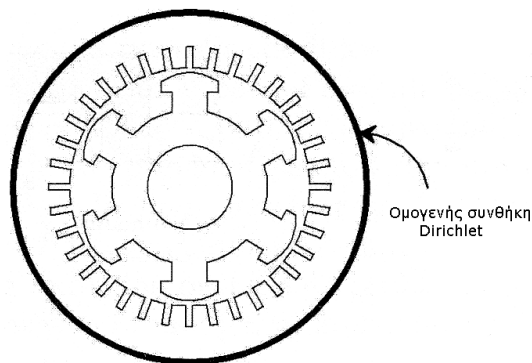
Στην περίπτωση ύπαρξης μαγνητικού πεδίου αρμονικά μεταβαλλόμενου, μπορούν να επαχθούν δινορρεύματα σε υλικά με μη μηδενική αγωγιμότητα και τότε θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλες εξισώσεις του Maxwell αναφορικά με την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου.

2.3.2 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

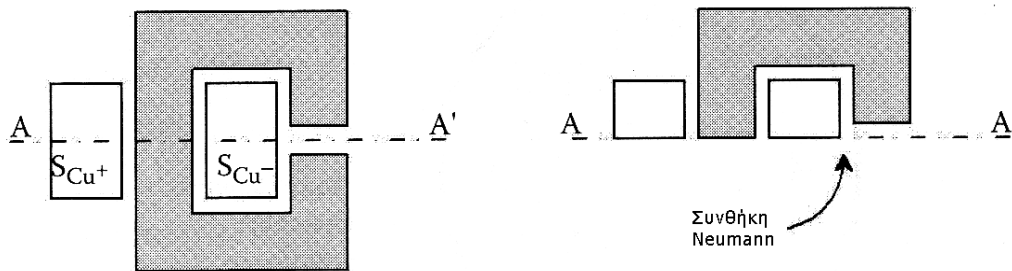
Η συνθήκη αυτή τίθεται στα όρια του προβλήματος όπου το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό A έχει σταθερή τιμή. Η ροή εφάπτεται του ορίου αυτού και δεν το διαπερνά. Συνήθως χρησιμοποιείται η ομογενοποιημένη συνθήκη Dirichlet στα εξωτερικά όρια του προβλήματος η οποία θέτει το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό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



Σχήμα 2.2: Ομογενής συνθήκη Dirichlet κατά μήκος της περιφέρειας σύγχρονης μηχανής [15]

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 περίπτωση διεπιφάνειας με υλικό πολύ μεγάλης επιτρεπτότητας.



Σχήμα 2.3: Μείωση της επιφάνειας ανάλυσης με χρήση οριακής συνθήκης Neumann [15]

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:

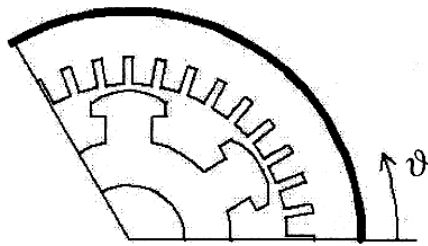
$$\frac{\partial A}{\partial n} + c_1 A = c_2 \quad (2.20)$$

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

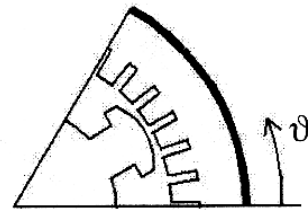
Περιοδική και Αντιπεριοδική Οριακή συνθήκη

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.[15]



Άρτια περιοδικότητα



Περιπτή περιοδικότητα

Σχήμα 2.4: Μείωση της επιφάνειας ανάλυσης με χρήση περιοδικής συνθήκης [15]

2.3.3 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Αν και οι συνθήκες ενός μαγνητικού προβλήματος μπορούν να εκφραστούν υπό τη μορφή μιας διαφορικής εξίσωσης, με ορισμένες οριακές συνθήκες, ωστόσο είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί μια αναλυτική λύση, παρά μόνο για προβλήματα πολύ απλής γεωμετρίας. Αυτή τη δυσκολία έρχεται να ξεπεράσει η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, χωρίζοντας το πρόβλημα σε ένα μεγάλο αριθμό περιοχών και αντίστοιχων υποπροβλημάτων που όμως αναφέρονται σε απλή γεωμετρία και είναι εύκολη η επίλυσή τους. Αν η αρχική περιοχή τεμαχιστεί σε αρκετό αριθμό τέτοιων υποπεριοχών, το υπολογιζόμενο δυναμικό προσεγγίζει αρκετά καλά την ακριβή του τιμή.

Το πλεονέκτημα της διαίρεσης της περιοχής του προβλήματος σε ένα μεγάλο αριθμό μικρών στοιχείων είναι ότι το πρόβλημα μετασχηματίζεται από ένα μικρό αλλά δύσκολο στην επίλυση πρόβλημα, σε ένα μεγάλο αλλά σχετικά εύκολο στην επίλυση. Το πρόβλημα αυτό παίρνει τη μορφή ενός προβλήματος γραμμικής άλγεβρας με πολλές χιλιάδες αγνώστων συνήθως, και υπάρχουν αλγόριθμοι που επιτρέπουν την επίλυσή του σε σύντομο χρόνο.

2.3.4 Το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων femm

Το ελεύθερο λογισμικό femm ανήκει στην κατηγορία προγραμμάτων επίλυσης πεπερασμένων στοιχείων και επιλύει δισδιάστατα και μαγνητοστατικά προβλήματα, όπως επίσης προβλήματα όπου τα μαγνητικά μεγέθη μεταβάλλονται με μια συγκεκριμένη συχνότητα. Ειδικότερα, το πρόγραμμα αυτό διακρίτοποιεί την περιοχή του προβλήματος χρησιμοποιώντας τριγωνικά στοιχεία. Σε κάθε στοιχείο, η λύση προσεγγίζεται με γραμμική παρεμβολή των τιμών του δυναμικού στις κορυφές του τριγώνου. Το πρόβλημα γραμμικής άλγεβρας σχηματίζεται με ελαχιστοποίηση του μέτρου του σφάλματος ανάμεσα στην πραγματική διαφορική εξίσωση και την προσεγγιστική διαφορική εξίσωση.

Η διαδικασία επίλυσης ενός μαγνητικού προβλήματος από το femm έχει τα παρακάτω στάδια:

1. Σχεδίαση της γεωμετρίας, ορισμός των οριακών συνθηκών και των υλικών.
2. Πλεγματοποίηση του προβλήματος με επιθυμητό αριθμό τριγωνικών στοιχείων.
3. Επίλυση του προβλήματος γραμμικής άλγεβρας και εύρεσης του διανυσματικού

δυναμικού.

4. Απεικόνιση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

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, ξεκινάει η διαδικασία τα βελτιστοποίησης.

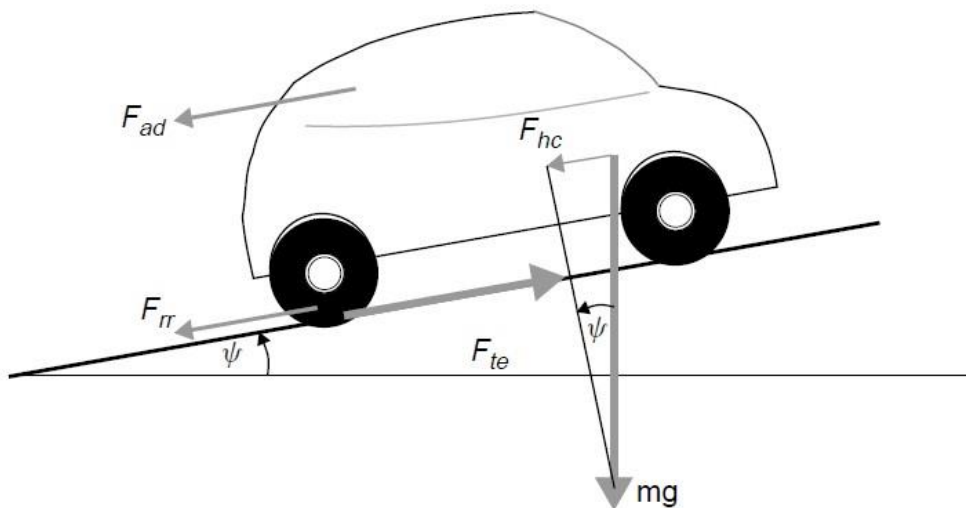
3.1 Προδιαγραφές ηλεκτρικού κινητήρα

Απαραίτητη προϋπόθεση για τη μοντελοποίηση του ηλεκτρικού οχήματος, αποτελεί η εξαγωγή μιας μαθηματικής σχέσης που περιλαμβάνει τις βασικές μηχανικές δυνάμεις που ασκούνται στο όχημα κατά τη λειτουργία του. Η ανάλυση των βασικών δυνάμεων που ασκούνται στο όχημα, πραγματοποιείται στην ενότητα που ακολουθεί.

3.1.1. Μοντελοποίηση των βασικών δυνάμεων που ασκούνται στο όχημα

Θεωρούμε ότι το ηλεκτρικό όχημα έχει μάζα m , ταχύτητα v και κινείται σε κεκλιμένο επίπεδο με κλίση ψ μοίρες. Ο ηλεκτρικός κινητήρας παρέχει τη δύναμη που κινεί το όχημα προς τα εμπρός, και η οποία ονομάζεται δύναμη έλξης (tractive effort).

Οι βασικές δυνάμεις που ασκούνται στο όχημα είναι σημειωμένες στο απλουστευμένο σχήμα 3.1 [10]:



Σχήμα 3.1: Βασικές μηχανικές δυνάμεις που ασκούνται σε ένα όχημα.[10]

Όπου :

- F_{rr} η αντίσταση κύλισης (τριβή με το έδαφος).
- F_{ad} η αντίσταση του αέρα (αεροδυναμικές τριβές).
- F_{hc} η συνιστώσα της δύναμης του βάρους που αντιτίθεται στην κίνηση του οχήματος, λόγω ανηφορικής κλίσης.
- F_{te} η δύναμη έλξης.

Η δύναμη έλξης πρέπει να είναι τέτοια ώστε όχι μόνο να υπερνικά τις προαναφερθείσες δυνάμεις που αντιτίθενται στην κίνηση, αλλά και να επιταχύνει το όχημα όταν και όσο χρειάζεται .

Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικότερα οι προαναφερθείσες δυνάμεις και τα φυσικά φαινόμενα που τις προκαλούν.

Αντίσταση κύλισης

Η αντίσταση κύλισης οφείλεται στην τριβή που αναπτύσσεται ανάμεσα στα λάστιχα του οχήματος και του οδοστρώματος. Σε μοριακό επίπεδο, οφείλεται σε ηλεκτροστατικές δυνάμεις μεταξύ των μορίων των δύο υλικών. Μακροσκοπικά είναι ανάλογη του βάρους του οχήματος, και ανεξάρτητη από την ταχύτητα με την οποία αυτό κινείται. Υπολογίζεται από τη γνωστή σχέση:

$$F_{\text{rr}} = \mu_{\text{rr}} \cdot m \cdot g \quad (3.1)$$

όπου μ_{rr} ο συντελεστής τριβής ολίσθησης, ο οποίος εξαρτάται κυρίως από τον τύπο και την πίεση του ελαστικού, και από την τραχύτητα του οδοστρώματος. Τυπικές τιμές για το συντελεστή αυτό είναι από 0.015 έως 0.005 για σύγχρονα ελαστικά κατασκευασμένα για ηλεκτρικά οχήματα.

Αντίσταση του αέρα

Οφείλεται στην τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ του κινούμενου οχήματος και του αέρα που το περιβάλλει. Εξαρτάται από το σχήμα και ιδιαίτερα από την μετωπική επιφάνεια του οχήματος, καθώς και από τυχόν προεξοχές όπως καθρέπτες, αεραγωγοί αεροτομές κλπ. Προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$F_{\text{ad}} = - \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^2 \quad (3.2)$$

Όπου :

- ρ είναι η πυκνότητα του αέρα (τυπική τιμή 3.25 kg/m^3).
- A είναι η μετωπική επιφάνεια του οχήματος.
- v είναι η ταχύτητα του οχήματος.
- C_d είναι σταθερά που ονομάζεται συντελεστής οπισθέλκουσας δύναμης.

Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται σημαντικά από τον τύπο του οχήματος, και οι τυπικές τιμές για ένα συνηθισμένο αυτοκίνητο είναι από 0.3 έως 0.19. Οι χαμηλότερες τιμές επιτυγχάνονται για ηλεκτρικά οχήματα, καθώς αυτά προσφέρουν μεγαλύτερες ελευθερίες στην χωροθέτηση των επιμέρους συστημάτων κατά το σχεδιασμό, ενώ συνήθως δεν υπάρχει και ανάγκη για αεραγωγούς. Ο συντελεστής λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές σε οχήματα όπως λεωφορεία και μοτοσυκλέτες (κοντά στο 0.7).

Βάρος

Πρόκειται ουσιαστικά για την συνιστώσα του βάρους που είναι συγγραμική στην κίνηση του οχήματος όταν αυτό κινείται σε κεκλιμένο επίπεδο. Αναλύοντας την κατακόρυφη δύναμη του βάρους σε δύο κάθετες μεταξύ τους συνιστώσες, προκύπτει εύκολα:

$$F_{\text{hc}} = m \cdot g \sin(\psi) \quad (3.3)$$

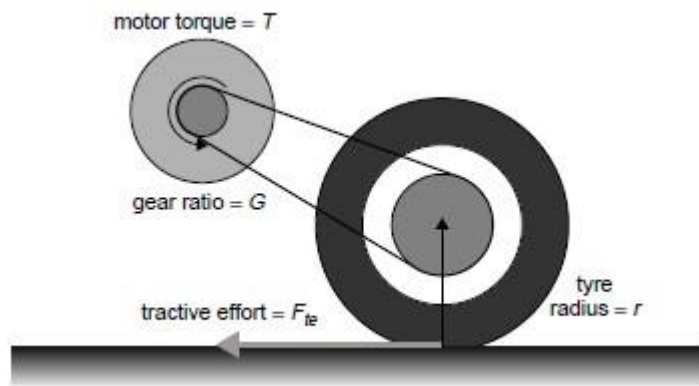
Δύναμη Επιτάχυνσης

Όπως γνωρίζουμε από το 2^ο νόμο του Νεύτωνα, για να αποκτήσει το όχημα γραμμική επιτάχυνση a , θα πρέπει να ασκηθεί σε αυτό δύναμη:

$$F_{la} = m \cdot a \quad (3.4)$$

Για να προσδιορίσουμε όμως τη δύναμη επιτάχυνσης με μεγαλύτερη ακρίβεια, χρειάζεται να λάβουμε υπόψη και τη δύναμη που απαιτείται για την περιστροφή των στρεφόμενων μερών του οχήματος. Χρειάζεται επομένως να θεωρήσουμε δυνάμεις τόσο για την γραμμική όσο και για τη γωνιακή επιτάχυνση.

Στο σχήμα 3.2 γίνεται εμφανής ο τρόπος με τον οποίο η ροπή που παράγεται από τον κινητήρα, μετατρέπεται σε δύναμη έλξης που κινεί το όχημα.



Σχήμα 3.2: Σχέση μεταξύ ροπής κινητήρα και δύναμης στους τροχούς του οχήματος.[10]

Θεωρούμε ότι το σύστημα μετάδοσης έχει μόνο ένα σταθερό λόγο ταχυτήτων G , παραδοχή η οποία ισχύει στην περίπτωση των ηλεκτρικών οχημάτων

Η ροπή στον άξονα του τροχού θα είναι εξ ορισμού:

$$T_a = F_{te} \cdot r \quad (3.5)$$

,όπου r είναι η ακτίνα του τροχού.

Ο λόγος G μεταξύ ταχυτήτων κινητήρα και οχήματος αντιστρέφεται για τις αντίστοιχες ροπές. Θα ισχύει επομένως:

$$\frac{T}{T_a} = \frac{1}{G} \quad (3.6)$$

,από όπου προκύπτει τελικά μια έκφραση της δύναμης έλξης συναρτήσει της ροπής του κινητήρα:

$$F_{te} = \frac{G}{r} \cdot T \quad (3.7)$$

Γνωρίζουμε επιπλέον ότι η ταχύτητα του οχήματος και η γωνιακή ταχύτητα του άξονα του τροχού συνδέονται με τη σχέση:

$$\omega_{\alpha} = \frac{v}{r} \quad (3.8)$$

Επομένως, η γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα θα ισούται με:

$$\omega = G \cdot \frac{v}{r} \quad (3.9)$$

και η αντίστοιχη γωνιακή επιτάχυνση θα ισούται με:

$$\dot{\omega} = G \cdot \frac{\alpha}{r} \quad (3.10)$$

Από τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα για την περιστροφική κίνηση θα ισχύει τότε:

$$T = I \cdot G \cdot \frac{\alpha}{r} \quad (3.11)$$

, όπου I είναι η ροπή αδράνειας του δρομέα της μηχανής.

Συνδυάζοντας την παραπάνω εξίσωση με τη σχέση (3.5), εκφράζουμε τη δύναμη που απαιτείται να ασκηθεί στους τροχούς του οχήματος προκειμένου να επιτευχθεί επιτάχυνση α :

$$F_{\omega\alpha} = I \cdot \left(\frac{G}{r}\right)^2 \cdot \alpha \quad (3.12)$$

Μέχρι τώρα είχαμε θεωρήσει ότι το σύστημα μετάδοσης του οχήματος έχει απόδοση 100%. Πράγματι, το σύστημα μετάδοσης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι συνήθως εξαιρετικά απλό σε σύγκριση με αυτό των συμβατικών οχημάτων, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται πολύ υψηλές αποδόσεις. Παρ'όλα αυτά, είναι πιο σωστό να ξαναγράψουμε την παραπάνω εξίσωση, συμπεριλαμβάνοντας και έναν συντελεστή απόδοσης του συστήματος μετάδοσης η_g , ο οποίος θα αυξάνει ελαφρώς τη δύναμη που απαιτείται για την πρόωση του οχήματος.

Προκύπτει τότε η σχέση:

$$F_{\omega\alpha} = I \cdot \frac{1}{\eta_g} \left(\frac{G}{r}\right)^2 \cdot \alpha \quad (3.13)$$

Συνολική Δύναμη Έλξης

Τελικά η συνισταμένη δύναμη που ασκείται στο όχημα κατά την κίνηση του, προκύπτει ως το διανυσματικό άθροισμα:

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{la} + F_{\omega\alpha} \quad (3.14)$$

Όπου:

- F_{rr} είναι η αντίσταση κύλισης, που προκύπτει από τη σχέση (3.1)
- F_{ad} είναι η αντίσταση του αέρα, που προκύπτει από τη σχέση (3.2)
- F_{hc} είναι η συνιστώσα του βάρους που εμφανίζεται όταν το όχημα κινείται σε κεκλιμένο επίπεδο, και προκύπτει από τη σχέση (3.3)
- F_{la} είναι η δύναμη της γραμμικής επιτάχυνσης του οχήματος, και προκύπτει από τη

σχέση (3.4)

- $F_{\omega a}$ είναι η δύναμη της γωνιακής επιτάχυνσης του κινητήρα, και προκύπτει από τη σχέση (3.13)

Επισημαίνουμε ότι οι δυνάμεις επιτάχυνσης F_{Ia} και $F_{\omega a}$, θα έχουν αρνητικό πρόσημο όταν το όχημα επιβραδύνει, ενώ η δύναμη του βάρους F_{hc} θα είναι επίσης αρνητική όταν το όχημα κινείται σε κατηφορικό δρόμο.

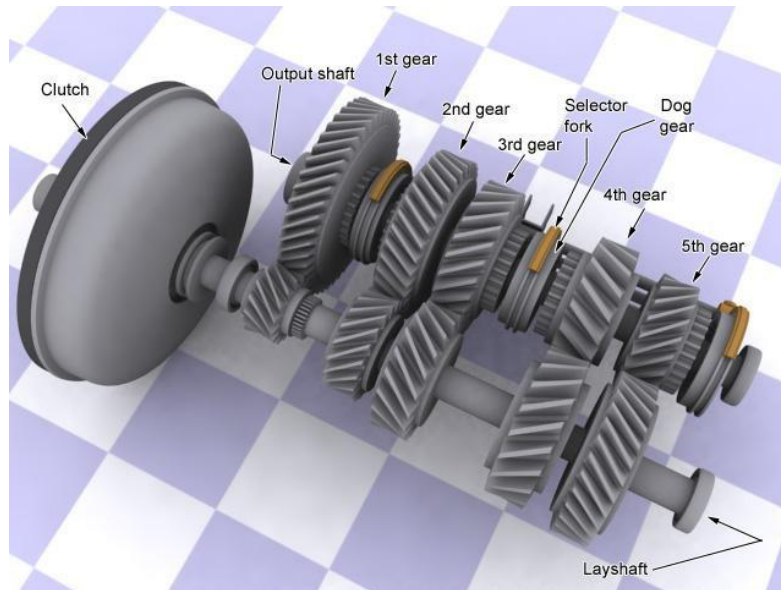
3.1.2 Σύστημα μετάδοσης

Σύστημα Μετάδοσης – Μηχανές Εσωτερικής καύσης

Το σύστημα μετάδοσης αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα υποσυστήματα για όλα τα οχήματα που λειτουργούν με κινητήρα εσωτερικής καύσης. Με τον όρο αυτό αναφερόμαστε συνήθως στο κιβώτιο ταχυτήτων (gear box), όμως το σύστημα μετάδοσης περιλαμβάνει και άλλα μηχανικά μέρη όπως ο συμπλέκτης και το διαφορικό. Ως σύστημα αποσκοπεί στην αποδοτική μετάδοση της ισχύος από τον άξονα της μηχανής στους τροχούς. Για να επιτευχθεί αυτό είναι αναγκαία η δυνατότητα απεξάρτησης της ταχύτητας των τροχών από αυτή του άξονα.

Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης έχουν το μειονέκτημα να λειτουργούν αποδοτικά μόνο σε σχετικά υψηλές στροφές, γεγονός που δημιουργεί προβλήματα σε περιπτώσεις που το όχημα εκκινεί ή κινείται αργά. Το σύστημα μετάδοσης αναλαμβάνει τότε να μειώσει την υψηλή ταχύτητα της μηχανής, αυξάνοντας ταυτόχρονα τη ροπή, καθώς η ισχύς παραμένει αναλλοίωτη. Έτσι επιτυγχάνεται χαμηλότερη ταχύτητα στους τροχούς, και ο κινητήρας συνεχίζει να λειτουργεί βέλτιστα.

Στο σχήμα 3.3 φαίνεται ένα τυπικό κιβώτιο 5 ταχυτήτων:



Σχήμα 3.3: Τυπικό κιβώτιο 5 ταχυτήτων για βενζινοκίνητο όχημα. [8]

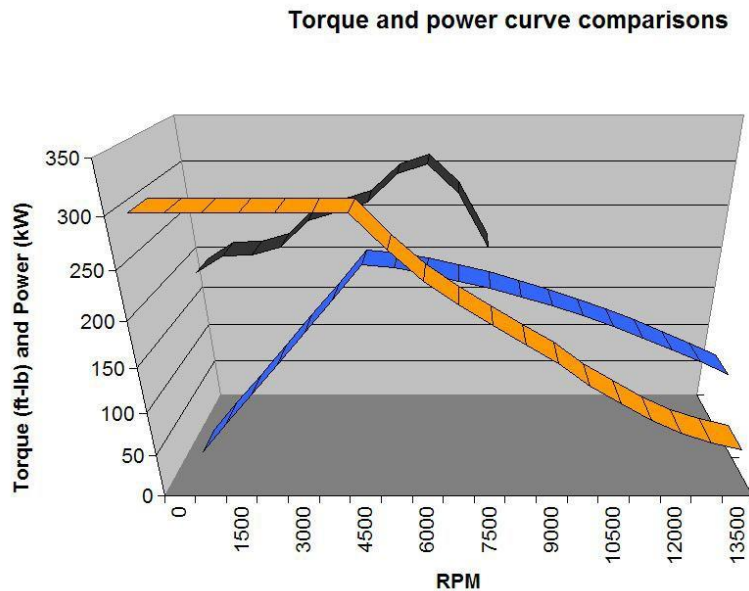
Στην εικόνα είναι ευδιάκριτα τα γρανάζια που εμπλέκονται μεταξύ τους για κάθε μια από τις 5 ταχύτητες. Για κάθε ταχύτητα επιτυγχάνεται η επιθυμητή σχέση μετάδοσης από τη σχετική διαφορά μεγέθους των εμπλεκόμενων γραναζιών.

Σύστημα Μετάδοσης – Ηλεκτρικά Οχήματα

Το σύστημα μετάδοσης αποτελεί ένα σύνθετο υποσύστημα στα σύγχρονα βενζινοκίνητα οχήματα, γεγονός που εισάγει αναπόφευκτα μηχανικές απώλειες. Επιπλέον η πολυπλοκότητα του αυξάνει το κόστος κατασκευής, μειώνει την αξιοπιστία του και απαιτεί πρόσθετα κόστη συντήρησης.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των ηλεκτρικών οχημάτων είναι το γεγονός ότι το σύστημα μετάδοσης είναι σαφώς απλούστερο. Αυτό οφείλεται στην ικανότητα των ηλεκτρικών μηχανών να παρέχουν μέγιστη ροπή ήδη από τις πολύ χαμηλές στροφές (σε αντίθεση με της μηχανές εσωτερικής καύσης) , καθώς και να διατηρούν υψηλή ροπή για μεγάλο εύρος στροφών.

Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζονται σε κοινό γράφημα οι χαρακτηριστικές ροπής ταχύτητας για ένα τυπικό ηλεκτρικό (κίτρινο χρώμα) και ένα βενζινοκίνητο (μαύρο χρώμα) όχημα.



Σχήμα 3.4: Χαρακτηριστικές ροπής και ισχύος για ηλεκτροκίνητο, και βενζινοκίνητο όχημα. [10]

Το παραπάνω σχήμα μας βοηθά να επιβεβαιώσουμε και εποπτικά τη δυνατότητα για άμεση παραγωγή ροπής, και διατήρηση της σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων, που παρουσιάζει ο ηλεκτρικός κινητήρας σε σύγκριση με τη μηχανή εσωτερικής καύσης.

Ένα τυπικό σύστημα μετάδοσης ηλεκτρικού οχήματος διαθέτει συνήθως μόνο μία σχέση μετάδοσης. Μια άλλη σχεδιαστική επιλογή είναι η τοποθέτηση ηλεκτρικού κινητήρα τοπολογίας εξωτερικού δρομέα απευθείας πάνω στον τροχό.(π.χ. Volvo ReCharge concept car, Πυρφόρος Ε.Μ.Π.) Με τον τρόπο αυτό παρακάμπτεται εντελώς το σύστημα μετάδοσης, αποφεύγονται οι αντίστοιχες απώλειες και καθίσταται ευκολότερος ο έλεγχος των τροχών.

3.1.3 Εξαγωγή προδιαγραφών ηλεκτρικού κινητήρα

Ως ταχύτητα βάσης του κινητήρα ορίζουμε την ταχύτητα εκείνη, μέχρι την οποία η μηχανή είναι σε θέση να αποδίδει την ονομαστική της ροπή. Στο σημείο αυτό, η τάση ακροδεκτών ισούται με τη μέγιστη τάση που μπορεί να παρέχει ο inverter, ενώ το ρεύμα λαμβάνει επίσης την ονομαστική του τιμή.

Αν η οριακή αυτή ταχύτητα ξεπεραστεί, τότε μπαίνουμε στην περιοχή σταθερής ισχύος. Στην περιοχή αυτή επενεργεί η λειτουργία εξασθένησης πεδίου (field weakening), και η ροπή απομειώνεται, καθώς οι στροφές αυξάνουν, προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η ισχύς εξόδου.

Στη συνέχεια θα καθοριστεί η ταχύτητα βάσης για τη μηχανή της εφαρμογής μας , αξιοποιώντας τα δεδομένα που προκύπτουν από τους ευρωπαϊκούς κύκλους οδήγησης.

Σύμφωνα με τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν πιο πάνω, ένα μικρό όχημα πόλης αναπτύσσει τυπικά μια μέγιστη ταχύτητα $v = 50 \text{ km/h}$ δηλαδή

$$v = 13.9 \text{ m/s} \quad (3.15)$$

Χρησιμοποιώντας αυτή την ταχύτητα ως βάση, και δεδομένου ότι η ακτίνα του τροχού σε ένα τυπικό όχημα πόλης είναι περίπου $r = 0.3\text{m}$, υπολογίζουμε την αντίστοιχη γωνιακή ταχύτητα στον άξονα του τροχού από τη σχέση (3.8) :

$$\omega_{\alpha} = \frac{v}{r} \rightarrow \omega_{\alpha} = 46.3 \text{ rad/s} \quad (3.16)$$

Για να υπολογίσουμε την γωνιακή ταχύτητα βάσης του κινητήρα, χρειάζεται να ορίσουμε το λόγο G του συστήματος μετάδοσης. Το κιβώτιο ταχυτήτων ενός βενζινοκίνητου οχήματος αντικαθίσταται από μία σταθερή σχέση υποβιβασμού της ταχύτητας του κινητήρα. Οι τιμές του λόγου G , σε ηλεκτρικά οχήματα του εμπορίου είναι 8.5:1 για το Tesla Model S (μεγάλο sedan), 7.8:1 για το Nissan Leaf (μεσαίας κατηγορίας) και 6.9:1 για το Peugeot iOn (μικρό αυτοκίνητο πόλης).

Προκειμένου να αναδείξουμε την ικανότητα λειτουργίας της μηχανής σε μεγάλο εύρος στροφών, επιθυμούμε η ταχύτητα βάσης, να είναι σχετικά χαμηλή (κοντά στις 2000 Σ.Α.Λ.). Με αυτό το δεδομένο, μια εύλογη επιλογή είναι να ορίσουμε στην εφαρμογή μας

λόγο :

$$G = 4.52 : 1 \quad (3.17)$$

Με τον τρόπο αυτό η γωνιακή ταχύτητα βάσης υπολογίζεται από τη σχέση (3.9):

$$\omega = G \cdot \omega_a \rightarrow \omega = 209.44 \text{ rad/s} \quad (3.18)$$

και εκφράζοντας τη γωνιακή ταχύτητα σε στροφές ανά λεπτό (Σ.Α.Λ.) μέσω της γνωστής σχέσης:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60} \quad (3.19)$$

προκύπτει τελικά ταχύτητα βάσης:

$$n_b = 2000 \text{ Σ.Α.Λ.} \quad (3.20)$$

Μέχρι την ταχύτητα αυτή, ο κινητήρας αποδίδει σταθερά την ονομαστική του ροπή. Για να καθορίσουμε την απαιτούμενη ροπή του οχήματος της εφαρμογής, συγκρίνουμε τις ροπές ορισμένων πραγματικών οχημάτων που κυκλοφορούν ή πρόκειται να κυκλοφορήσουν σύντομα στην αγορά. Παρατηρούμε ότι η ονομαστική ροπή κυμαίνεται σε τιμές μεγαλύτερες των 200 Nm για αυτοκίνητα μεσαίας κατηγορίας (280 Nm για το Nissan Leaf, 245 Nm για το Ford Focus Electric), ενώ σε πιο μικρά οχήματα η απαιτούμενη ροπή μειώνεται αισθητά (180 Nm στα Peugeot iOn και Mitsubishi i-MiEv).

Το όχημα που επιλέγεται είναι το Ford Transit και φαίνεται στο Σχήμα 3.5 [22]:



Σχήμα 3.5: Το όχημα της εφαρμογής, Ford Transit [22]

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη που μας ενδιαφέρουν για την εξαγωγή των προδιαγραφών φαίνονται στον Πίνακα 3.1:

Χαρακτηριστικό μέγεθος	Τιμή
Τύπος οχήματος	Μίνι Βάν μεταφοράς προσωπικού
Απόβαρο	2200 kG
Ωφέλιμο φορτίο	Φορτίο 350 kG + 14 άτομα 75kG έκαστο = 1400 kG
Διαστάσεις οχήματος	Υψηλή απόδοση
Εμβαδόν μετωπική επιφάνειας	Ενεργό εμβαδόν χωρίς καθρέπτες/τροχούς 4,84 m ²
Διαστάσεις ελαστικών	195/65/R15
Ενδεικτικό βάρος ηλεκτρικού κινητηρίου συστήματος	500 kG
Εκτίμηση απώλειας βάρους εξ αιτίας αφαίρεσης υφιστάμενου συστήματος κίνησης	300 kG

Πίνακας 3.1 : Χαρακτηριστικά μεγέθη του οχήματος της εφαρμογής

Επιλέγουμε τελικά να ορίσουμε ως ονομαστική ροπή :

$$T_{nom} = 220 \text{ Nm} \quad (3.21)$$

Έχοντας ορίσει την ονομαστική ροπή και την ταχύτητα βάσης, προκύπτει εύκολα η ονομαστική ισχύς εξόδου του κινητήρα, από τη βασική σχέση:

$$P_n = T_n \cdot \omega_n = 220 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot 209.44 \text{ rad/s} \rightarrow$$

$$P_n = 46 \text{ kW} \quad (3.22)$$

Τα ονομαστικά χαρακτηριστικά που προέκυψαν για τη μηχανή, θα χρησιμοποιηθούν ακολούθως ως δεδομένα, κατά την προκαταρκτική σχεδίαση, και τη βασική διαστασιολόγηση της μηχανής

3.2 Προκαταρκτική σχεδίαση μηχανής

Προκειμένου να διαστασιολογήσουμε μια ηλεκτρική μηχανή απαιτείται η διεξαγωγή μιας προκαταρκτικής σχεδίασης, η οποία αποτελείται γενικά από τα ακόλουθα βήματα:

- Διαστασιολόγηση διακένου
- Προσδιορισμό των διαμορφώσεων δρομέα και στάτη, δηλαδή γεωμετρίας της διέγερσης και τύπου τυλίγματος, που εξασφαλίζουν τη δημιουργία κατάλληλου μαγνητικού πεδίου διακένου.
- Έλεγχο ειδικών μαγνητικών και ηλεκτρικών φορτίσεων.
- Εύρεση απωλειών σιδήρου και χαλκού.

3.2.1 Διαστασιολόγηση διακένου

Άξονα για την προκαταρκτική σχεδίαση του κινητήρα αποτελεί η απαίτηση για συγκεκριμένες τιμές μαγνητικής επαγωγής σε κάθε περιοχή του μαγνητικού κυκλώματος. Η ειδική μαγνητική φόρτιση περιορίζεται λόγω του κορεσμού του μαγνητικού υλικού (σίδηρος) και των απωλειών πυρήνα. Στον πίνακα 3.2 ορίζονται οι τιμές για μηχανές επαγωγής.

Μαγνητική Ροή B (T)	
Διάκενο	0,7-0,90 (μέγιστη τιμή)
Τμήμα επιστροφής της ροής στο στάτη	1,4-1,7
Δόντι στάτη	1,8-1,9
Δόντι δρομέα	1,8-1,9
Τμήμα επιστροφής της ροής στο δρομέα	1,0-1,6

Πίνακας 3.2: Επιτρεπόμενες τιμές μαγνητικής ροής στο μαγνητικό κύκλωμα ασύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών

Για τη σχεδίαση επιλέγονται οι ακόλουθες τιμές:

Στο δόντι του στάτη : $B_{\text{st}} = 1.8 \text{ T}$

Στο δόντι του δρομέα : $B_{\text{tr}} = 1.9 \text{ T}$

Στο σώμα του στάτη : $B_{\text{sc}} = 1.7 \text{ T}$

Στο διάκενο : $B_{\text{g}} = 0.6 \text{ T}$

Η διαστασιολόγηση του διακένου περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της επιφάνειας διακένου που θα εξασφαλίσει την απαραίτητη ηλεκτρομαγνητική ροπή, σε μόνιμη και μεταβατική κατάσταση λειτουργίας της μηχανής.

Η ροπή διακένου T_e θα υπολογισθεί με βάση τη μέση επαπτομενική πίεση των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο και την επιφάνεια του διακένου A , σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις (όπου D είναι η διάμετρος του διακένου και L το ενεργό μήκος της μηχανής):

$$F_t = P_t \cdot A \quad (3.23)$$

$$T_e = \frac{1}{2} \cdot D \cdot F_t \quad (3.24)$$

$$T_e = \frac{\pi}{2} \cdot D^2 \cdot L \cdot P_t \quad (3.25)$$

Η μέση μαγνητική δύναμη στο διάκενο υπολογίζεται απ' την ακόλουθη σχέση:

$$F_t = L \cdot \oint_c B_n \cdot H_t dl = \frac{L}{\mu_o} \cdot \oint_c B_n \cdot B_t dl \quad (3.26)$$

Εφόσον η επιφάνεια διακένου είναι $A = \pi \cdot D \cdot L$, η μέση πίεση των επαπτομενικών δυνάμεων στο διάκενο εκφράζεται ως εξής:

$$P_t = \frac{L}{D \cdot \mu_o \cdot \pi} \cdot \oint_C \bar{B}_n \cdot \bar{B}_t dl \quad (3.27)$$

,όπου \bar{B}_n , \bar{B}_t η ακτινική και η εφαπτομενική συνιστώσα της μέσης μαγνητικής φόρτισης αντίστοιχα.

Θεωρώντας τη μέση μαγνητική φόρτιση $\bar{B} = 0.6 \text{ T}$, και αναλύοντας τη στις επιμέρους συνιστώσες της προκύπτει :

$$\bar{B}_n = \bar{B} \cdot \sin \theta, \bar{B}_t = \bar{B} \cdot \cos \theta \quad (3.28)$$

Αρα αντικαθιστώντας στην (3.27) προκύπτει τελικά :

$$P_t = \frac{\sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \pi \cdot D \cdot B^2}{D \cdot \pi \cdot \mu_o} = \frac{\sin(2\theta) \cdot B^2}{2 \cdot \mu_o} \quad (3.29)$$

Επιστρέφοντας στη σχέση (3.25) παίρνουμε τώρα :

$$D^2 \cdot L = \frac{2}{\pi \cdot P_t} \cdot T_e \quad (3.30)$$

, όπου D, η διάμετρος του διακένου σε cm και L, το μήκος του διακένου κατά τον άξονα του κινητήρα σε cm.

Επιλογή Κατάλληλου Συνδυασμού L,D

Διάμετρος D

Οι τιμές που λαμβάνουν οι βασικές διαστάσεις μιας ηλεκτρικής μηχανής υπόκεινται σε διάφορους περιορισμούς. Όσον αφορά τη διάμετρο D, η τιμή της καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την επίδοση της μηχανής καθώς η ροπή μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο του D, όπως είδαμε πιο πάνω. Αυτό σημαίνει ότι μια μηχανή με μεγάλες απαιτήσεις ροπής θα πρέπει να έχει σχετικά μεγάλο D.

Όμως η αύξηση του D πάνω από ένα όριο , μπορεί να οδηγήσει σε θερμικά προβλήματα (απώλειες) , καθώς μεγάλο μέρος των τυλιγμάτων θα βρίσκεται εκτός της ενεργούς περιοχής του πυρήνα. Επιπλέον, μια μηχανή με μεγάλο D αναμένεται να παρουσιάζει αυξημένη μάζα πυρήνα, άρα και μεγάλες απώλειες πυρήνα , ενώ τέλος υπάρχει και ο μηχανικός περιορισμός για το D ο οποίος οφείλεται στις μεγάλες φυγόκεντρες δυνάμεις που ασκούνται στις δισκοειδείς μηχανές κατά την περιστροφή του δρομέα.

Στην περίπτωση μας, η ανάγκη για μεγάλες ταχύτητες περιστροφής (εώς και 7000 ΣΑΛ) θα μας οδηγήσει σε ένα σχετικά αυστηρό περιορισμό για το D, όμως ο περιορισμός αυτός δεν είναι τελικά τόσο αυστηρός λόγω της σχετικά μικρής ισχύος που έχει ο κινητήρας της εφαρμογής μας.

Ενεργό μήκος L

Όσον αφορά το ενεργό μήκος L, η αύξηση του αυξάνει επίσης τις απώλειες πυρήνα

λόγω της αυξημένης μάζας πυρήνα, ενώ υπάρχει και εδώ μηχανικός περιορισμός, για λόγους διατήρησης του διακένου, καθώς στις εξαιρετικά διαμήκεις μηχανές είναι δυνατό να έρθουν σε φυσική επαφή ο δρομέας και ο στάτης και να προκληθούν φθορές στον εξοπλισμό.

Σημειώνεται επίσης ότι η συνεισφορά του L στην ικανότητα ροπής της μηχανής είναι λιγότερο καθοριστική, καθώς η σχέση που συνδέει τη ροπή με το L είναι όπως είδαμε γραμμική.

Οι τιμές του λόγου λ , αξονικού μήκους της μηχανής L προς το μήκος ενός πόλου T_p , δίνονται στον ακόλουθο πίνακα ανάλογα τους πόλους του κινητήρα:

p	2	4	6	8
λ	0.6-1.0	1.2-1.8	1.6-2.2	2.0-3.0

Πίνακας 3.3: L/T_p ανάλογα με το πλήθος πόλων του κινητήρα.

Μετά από δοκιμές που εξασφαλίζουν την απαιτούμενη ροπή επιλέχθηκε $\lambda=L/T_p=0.61$, δηλαδή:

$$L = 0.48 \cdot D \quad (3.31)$$

και επιλέγεται το ζεύγος τιμών:

$$L_g = 13 \text{ cm}, D = 27 \text{ cm} \quad (3.32)$$

Παρατηρείται πως με το συνδυασμό αυτό προκύπτει μια σχετικά δισκοειδής μηχανή, η οποία όμως επιτρέπει την περαιτέρω διαμόρφωση και βελτιστοποίηση των γεωμετρικών της χαρακτηριστικών, όπως θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Πλάτος διακένου

Το πλάτος του διακένου, λαμβάνει γενικά όσο το δυνατό μικρότερες τιμές, αν και όσο μικραίνει το διάκενο, τόσο μεγαλώνει η απαίτηση για στιβαρές εδράσεις στη μηχανή.

Ένα μηχανικό όριο κατασκευής είναι τα 0.25mm για μηχανές πολύ μικρής ισχύος, ενώ στις πολύ μεγάλες μηχανές της τάξης των MW, το πλάτος διακένου μπορεί να φτάσει το 1 cm.

Στη δική μας περίπτωση, και δεδομένου ότι τυπική τιμή για μηχανές των μερικών δεκάδων kW είναι το 1mm, επιλέγουμε:

$$g = 1 \text{ mm} \quad (3.33)$$

3.2.2 Παραμετροποιημένη σχεδίαση

Η διαστασιολόγηση του κινητήρα υπήρξε βασικό αντικείμενο μελέτης με σκοπό την

εύρεση της βέλτιστης τοπολογίας. Ο κινητήρας χρειάστηκε να σχεδιαστεί αρκετές φορές για διάφορες τιμές των γεωμετρικών παραμέτρων, πριν επιλεγθούν οι καταλληλότερες.

Για το λόγο αυτό, οι διαστάσεις του κινητήρα είναι παραμετροποιημένες με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξαρτώνται δυναμικά από κάποιες βασικές διαστάσεις, όπως είναι η διάμετρος του μέσου διακένου, το αξονικό μήκος της μηχανής, το πλάτος του διακένου και το πλήθος αυλάκων στάτη και δρομέα. Αυτό σημαίνει ότι μεταβάλλοντας αυτές τις σχεδιαστικές παραμέτρους, ο κινητήρας σχεδιάζεται εκ νέου προσαρμόζοντας και τις υπόλοιπες διαστάσεις με σκοπό να πληρούνται συνεχώς οι επιθυμητές προδιαγραφές. Η παραμετροποιημένη σχεδίαση στάθηκε ιδιαίτερα χρήσιμη για τη διαδικασία επιλογής των βέλτιστων γεωμετρικών παραμέτρων του κινητήρα.

3.2.3 Σχεδίαση στάτη

Το πλήθος των αυλάκων του στάτη Q δίνεται από τη σχέση: $Q=m \cdot p \cdot q$, όπου m είναι το πλήθος των φάσεων ($m=3$), p είναι το πλήθος των πόλων και q το πλήθος αυλάκων ανά πόλο και φάση. Λόγω των απαιτήσεων ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα, η μηχανή θα είναι αναγκαστικά τετραπολική. Έπειτα από δοκιμές επιλέχθηκαν $q=3$ αυλάκια ανά πόλο και φάση. Η τιμή αυτή επιτρέπει την επίτευξη της επιθυμητής ροπής χωρίς η πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες του στάτη να ξεπερνά τα επιτρεπτά όρια.

Η μέση ροή ανά πόλο θεωρώντας $\bar{B} = 0,6 T$ είναι:

$$\Phi = \bar{B} \cdot \frac{\pi \cdot D}{p} \cdot L = 16.54 mWb \quad (3.34)$$

Στη συνέχεια γίνεται μια εκτίμηση του επιπέδου της τάσεως που παρέχεται από το μετατροπέα στους ακροδέκτες του κινητήρα. Θεωρώντας ένα τυπικό τριφασικό αντιστροφέα PWM, με συντελεστή διαμόρφωσης πλάτους $m_a=0.8$, η τιμή της φασικής RMS τάσης που παράγεται στην έξοδο του αντιστροφέα, για δεδομένη dc τάση τροφοδοσίας $V_{dc}=550$, δίνεται από τη σχέση[11]:

$$E = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot m_a \cdot V_{dc} \quad (3.35)$$

Σημειώνεται ότι η dc τάση τροφοδοσίας δεν πρέπει να λαμβάνει πολύ μεγάλες τιμές, σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, για λόγους ασφαλείας (π.χ. ανάφλεξη των μπαταριών σε περίπτωση ατυχήματος).

Προκύπτει τελικά για συνδεσμολογία αστέρα, ότι η RMS τάση στα άκρα των πηνίων κάθε φάσης θα είναι :

$$E = 155 V \quad (3.36)$$

Έτσι, οι σπείρες των πηνίων κάθε φάσης δίνονται απο τη σχέση:

$$N = \frac{E}{4.44 \Phi f} = 31.66 \quad (3.37)$$

, επομένως το πλήθος των αγωγών ανά αύλακα είναι:

$$n = \frac{N}{\frac{p}{2}q} = 5.28 \sim 6 \quad (3.38)$$

,έπειτα απο δοκιμές όμως εκλέγεται $n=7$ σπείρες ανά αύλακα, οπότε τελικά οι τιμές που προκύπτουν είναι οι ακόλουθες:

$$N=42, \Phi=12.47\text{mWb και } \bar{B}=0.6\text{T} \quad (3.39)$$

Γνωρίζοντας την ονομαστική ισχύ της μηχανής (45 kW), και θεωρώντας ένα συντελεστή ισχύος $\cos\varphi = 0.9$ επαγωγικό, και συνολική απόδοση περίπου 95% υπολογίζουμε το ονομαστικό ρεύμα της μηχανής ως εξής :

$$I_N = \frac{Pel}{3 E n \cos\varphi} = 115.7 \text{ A} \quad (3.40)$$

Οπότε η μαγνητεγερτική δύναμη δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$ME\Delta = I_{rms} N = 4860 \text{ A}\cdot\text{ε} \quad (3.41)$$

Η παραπάνω $ME\Delta$ αφορά μια φάση της μηχανής. Προκειμένου να υπολογίσουμε το εμβαδό μιας αύλακας υπολογίζουμε τον αριθμό αυλάκων ανά φάση, ως εξής:

$$q P = \frac{Q}{m} = 12 \text{ αυλάκες / φάση} \quad (3.42)$$

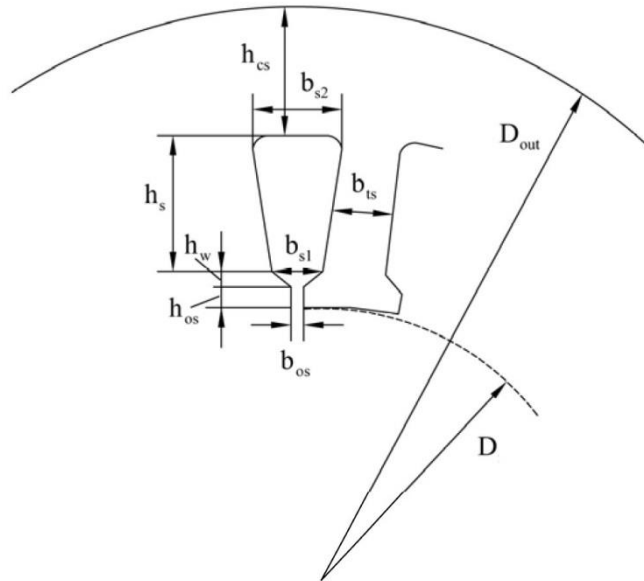
Η αναγκαία διατομή αύλακος που θα δημιουργήσει την παραπάνω $ME\Delta$ υπολογίζεται με κριτήριο την μέγιστη πυκνότητα ρεύματος, η οποία ισούται με $\mathbf{J=4 A/mm^2}$. Συνεπώς, η ελάχιστη ενεργός διατομή υπολογίζεται ως εξής:

$$A_{cu} = \frac{ME\Delta}{J qP} = 101.25 \text{ mm}^2 \quad (3.43)$$

Θεωρώντας συντελεστή αξιοποίησης της αύλακας ίσο με 0.6, (οι μέγιστες τιμές του συντελεστή είναι 0.7 για μεγάλες μηχανές) η διατομή αύλακας θα πρέπει να είναι τουλάχιστον:

$$A_{slot} = \frac{A_{cu}}{0.6} = 168.75 \text{ mm}^2 \quad (3.44)$$

Για τη σχεδίαση του στάτη χρησιμοποιούνται τραπεζοειδή ημίκλειστα αυλάκια, όπως φαίνεται στο *σχήμα 3.7*. Τα τραπεζοειδή αυλάκια εξασφαλίζουν το σταθερό πλάτος των δοντιών απαραίτητο για την ομαλή φόρτισή τους. Τα δόντια δηλαδή είναι παραλληλόγραμμα.



Σχήμα 3.6: Γεωμετρία αυλάκων στάτη. [6]

Στο Σχήμα 3.6 φαίνεται η γεωμετρία των αυλάκων του στάτη. Από τις διάφορες διαστάσεις άλλες επιλέγονται από τυπικές τιμές και άλλες προσδιορίζονται από εμπειρικούς τύπους ή αναλυτικές σχέσεις.

Το ύψος της αύλακας στάτη h_s δίνεται από τη σχέση:

$$h_s = K \cdot \frac{\pi \cdot D}{Q} \cdot \left(1 - \frac{B_g}{B_{ts}}\right) \quad (3.45)$$

, όπου K ο λόγος του ύψους προς το πλάτος της αύλακας h_s / b_s .

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία[7] αυτός περιορίζεται μεταξύ 3 και 6. Γενικά οι μικρότερες τιμές αντιστοιχούν σε μικρότερες μηχανές, ωστόσο για τη διατήρηση της μαγνητικής επαγωγής στο σώμα του στάτη κάτω από το 1.7 T, επιλέγουμε $K=3$.

Έτσι, προκύπτει : **$h_s=22 \text{ mm}$** .

Το ύψος h_{os} του ανοίγματος της αύλακας και το ύψος της σφηνοειδούς περιοχής h_w ορίζονται ως ποσοστά του μήκους δοντιού του στάτη.

Η εξωτερική ακτίνα του στάτη ορίζεται επίσης παραμετρικά σε σχέση με το πλήθος των αυλάκων ανά πόλο και φάση και το ύψος δοντιών του στάτη, με σκοπό να αποφευχθεί ο κορεσμός του σιδήρου.

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

$$h_{cs} = \frac{a_i}{2} \cdot \left(\frac{\pi \cdot D}{p}\right) \cdot \frac{B_g}{B_{cs}} \quad (3.46)$$

, όπου $\alpha_4=0.75$ συντελεστής σχήματος της ροής.

Προκύπτει : $h_{cs} = 28.95 \text{ mm}$

Ωστόσο το μέγεθος αυτό είναι σχετικά μικρό και οδηγεί σε αυξημένη τιμή μαγνητικής επαγωγής στο σώμα του στάτη. Οπότε για την αρχική σχεδίαση επιλέγεται ύψος τμήματος επιστροφής $h_{cs} = 30.75 \text{ mm}$.

Το πολικό βήμα είναι $\tau = \frac{\pi D}{p}$. Το βήμα κάθε αύλακας είναι επομένως $\tau_s = \frac{\tau}{3q}$. Θεωρώντας πως όλη η ροή διακένου περνά από τα δόντια του στάτη ισχύει:

$$B_g \cdot \tau_s \cdot L \simeq B_{ts} \cdot b_{ts} \cdot L \cdot K_{Fe} \quad (3.47)$$

, όπου $K_{Fe} \sim 0.96$ ο συντελεστής πληρότητας της λαμαρίνας.

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

$$b_{ts} = \frac{B_g \cdot \tau_s}{B_{ts} \cdot K_{Fe}} = \frac{B_g \cdot \tau}{B_{ts} \cdot K_{Fe} \cdot 3q} = \frac{B_g \cdot \pi \cdot D}{3q \cdot p \cdot K_{Fe}} \quad (3.48)$$

και προκύπτει : $b_{ts} = 4.62 \text{ mm}$

Ωστόσο το πλάτος αυτό είναι πολύ μικρό και οδηγεί σε πολύ αυξημένη τιμή μαγνητικής επαγωγής στο δόντι του στάτη. Οπότε για την αρχική σχεδίαση επιλέγεται πλάτος δοντιού στάτη ίσο με $b_{ts} = 8.5 \text{ mm}$.

3.2.4 Σχεδίαση δρομέα

Η σχεδίαση ενός δρομέα κλωβού για την ασύγχρονη μηχανή της εφαρμογής μας είναι μια περίπλοκη διαδικασία. Έχουμε υποθέσει για τη λειτουργία της μηχανής πως η στρεφόμενη ΜΕΔ, που παράγεται από το πεδίο του στάτη διανέμεται ημιτονικά στο χωρό και η ΜΕΔ του δρομέα, λόγω των επαγόμενων ρευμάτων, επίσης.

Παρόλα αυτά, η κατανομή της μαγνητικής ροής στο διάκενο περιέχει ένα σύνολο αρμονικών, που οφείλονται στον πεπερασμένο αριθμό αυλάκων στάτη που φιλοξενούν τα τυλίγματα (winding harmonics) και στο γεγονός ότι το διάκενο δεν είναι ομαλό, καθώς παρεμβάλλονται τα ανοίγματα των αυλάκων του δρομέα και του στάτη (slot harmonics).

Ο δρομέας κλωβού αντιδρά στις αρμονικές αυτές όπως και με τη θεμελιώδη συνιστώσα της ροής, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια παρασιτική χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας για κάθε μία αρμονική. Έτσι, η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας της μηχανής δεν είναι ομαλή, αλλά περιέχει βυθίσεις και ανυψώσεις για μεγάλη ολίσθηση. Αυτό μπορεί να επιφέρει το 'κλείδωμα' του κινητήρα και την αποτυχία εκκίνησης, τη σταθερή λειτουργία (crawling) σε κάποια υποσύγχρονη ταχύτητα ή τον υπερβολικό θόρυβο κατά την επιτάχυνση του κινητήρα μέχρι την ονομαστική του ταχύτητα.

Για την αποφυγή των αρμονικών που οφείλονται στις αύλακες του στάτη και του δρομέα, με τα αποτελέσματα τους που προαναφέρθηκαν, είναι απαραίτητη η λήψη συγκεκριμένων μέτρων κατά τη σχεδίαση της μηχανής[6]:

- Ο αριθμός των αυλάκων του δρομέα δε θα πρέπει σε καμία περίπτωση να είναι ίσος

με τον αριθμό των αυλάκων του στάτη, αλλά μεγαλύτερος ή μικρότερος. Ικανοποιητική λειτουργία επιτυγχάνεται όταν οι αύλακες του δρομέα είναι 15 με 30% περισσότερες ή λιγότερες από τις αύλακες του στάτη.

- Για να αποφεύγονται η ανυψώσεις ροπής η διαφορά μεταξύ αυλάκων στάτη και δρομέα δεν πρέπει να είναι ίση με p , $2p$ ή $5p$, όπου p ο αριθμός των πόλων της μηχανής.
- Για να αποφεύγεται το 'κλείδωμα' του κινητήρα (magnetic locking) η διαφορά μεταξύ αυλάκων στάτη και δρομέα δεν πρέπει να είναι ίση με $3p$ ή πολλαπλάσια του $3p$, για τριφασικό κινητήρα.
- Για να αποφεύγεται ο θόρυβος και οι ταλαντώσεις η διαφορά μεταξύ αυλάκων στάτη και δρομέα δεν πρέπει να είναι ίση με 1 , 2 , $(p+1)$ ή $(p+2)$.

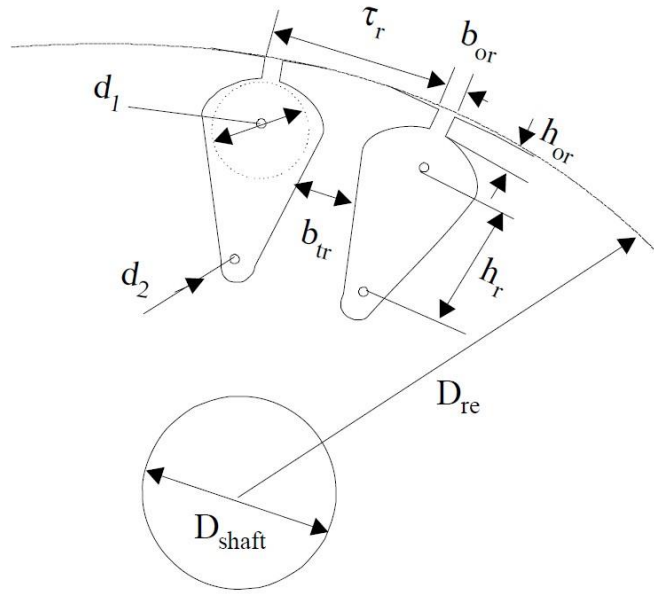
Συνοψίζοντας, η διαφορά των αυλάκων στάτη (S_s) και δρομέα (S_r) δεν πρέπει να είναι ίση με:

$$S_s - S_r = 0, \pm p, \pm 2p, \pm 3p, \pm 5p, \pm 1, \pm 2, \pm (p+1), \pm (p+2)$$

Για το λόγο αυτό, και με δεδομένο ότι οι αύλακες του στάτη είναι 36, επιλέγεται κατά την αρχική σχεδίαση ο δρομέας κλωβού της μηχανής να έχει 26 αύλακες, αριθμός επιτρεπτός, σύμφωνα και με τα παραπάνω.

Μία άλλη μέθοδος που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση των παραπάνω φαινομένων είναι η χρήση επικλινών ράβδων στο δρομέα (rotor skewing), η οποία όμως αυξάνει το κόστος κατασκευής του δρομέα και δεν κρίθηκε σκόπιμη στη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Στο Σχήμα 3.7 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 3.7 : Γεωμετρία αυλάκων δρομέα [6]

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.

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

$$I_b = K_I \cdot \frac{2 \cdot 3 \cdot N \cdot k_w}{Q_r} \cdot I_N \quad (3.49)$$

, όπου K_I ο συντελεστής που δείχνει τη σχέση των μαγνητεργετικών 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 $I_b = 644 \text{ A}$.

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

Η επιφάνεια της αύλακας του δρομέα θα είναι τότε :

$$A_b = \frac{I_b}{J_b} = 161 \text{ mm}^2 \quad (3.50)$$

Το βήμα της αύλακας του δρομέα είναι:

$$\tau_r = \frac{\pi \cdot (D - 2 \cdot g)}{Q_r} \quad (3.51)$$

Το πλάτος του δοντιού του δρομέα είναι:

$$b_{tr} = \frac{B_g}{K_{Fe} \cdot B_{tr}} \cdot \tau_r \quad (3.52)$$

και προκύπτει : $b_{tr} = 10.5 \text{ mm}$

3.2.5 Τελική Γεωμετρία

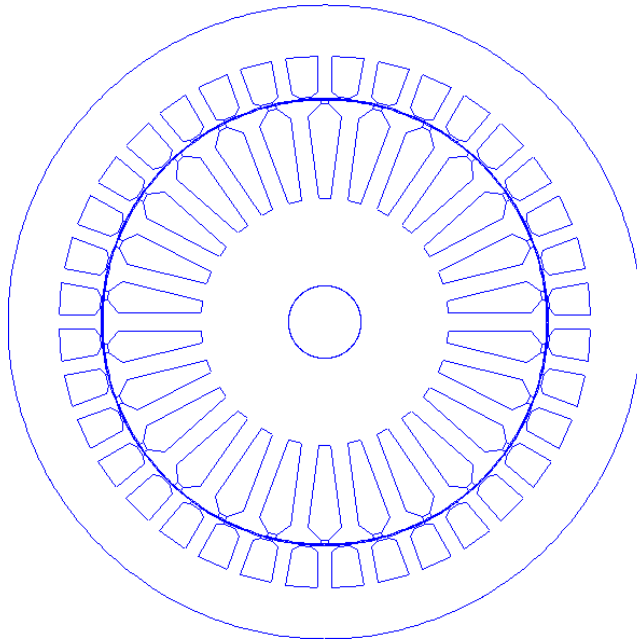
Συγκεντρώνοντας τα στοιχεία της προκαταρκτικής μελέτης και της διαστατικής ανάλυσης που προηγήθηκαν μπορεί να σχεδιαστεί η γεωμετρία του κινητήρα με ακρίβεια.

Οι βασικές διαστάσεις της μηχανής, όπως φαίνονται και στα σχήματα 3.6 και 3.7 , παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 3.4, ενώ φαίνονται και οι συσχετισμοί με τα μεγέθη της παραμετροποιημένης διαδικασίας σχεδίασης, το βήμα αύλακος στάτη και δρομέα.

Μέγεθος	Σύμβολο	Τιμή	Σχέση παραμετροποίησης
Αριθμός πόλων	P	4	-
Αύλακες ανά φάση ανά πόλο	Q	3	-
Διάμετρος Διακένου	D	269 mm	-
Ενεργό μήκος	L	130 mm	-
Μήκος Διακένου	L _g	1 mm	-
Αριθμός αυλάκων στάτη	Q	36	$p \cdot 3 \cdot q$
Βήμα αύλακας στάτη	T _s	10 μοίρες	$360/Q$
Πάχος δοντιού στάτη	B _{ts}	8.5 mm	$0.35 \cdot \tau_s$
Ύψος δοντιού στάτη	H _s	22 mm	-
Σώμα επιστροφής στάτη	H _{cs}	30.75 mm	$1.4 \cdot h_s$
Εξωτερική διάμετρος	D _{out}	384 mm	$D + l_g + h_s + h_{os} + h_{ws} + h_{cs}$
Άνοιγμα αύλακας στάτη	B _{os}	7.15 mm	$0.3 \cdot \tau_s$
Ύψος ανοίγματος αύλακας	H _{os}	1.1 mm	$0.05 \cdot h_s$
Ύψος σφηνοειδούς περιοχής πεδήλου	H _{ws}	2.64 mm	$0.12 \cdot h_s$
Αριθμός αυλάκων δρομέα	Q _r	26	-
Βήμα αύλακας δρομέα	T _r	13.85 μοίρες	$360/Q_r$
Πάχος δοντιού δρομέα	B _{tr}	10.55 mm	$0.35 \cdot \tau_r$
Ύψος δοντιού δρομέα	H _r	50 mm	-
Διάμετρος άξονα	D _{shaft}	44 mm	-
Άνοιγμα αύλακας δρομέα	B _{or}	5.1 mm	$0.16 \cdot \tau_r$
Ύψος ανοίγματος αύλακας	H _{or}	2.5 mm	$0.05 \cdot h_r$
Ύψος σφηνοειδούς περιοχής πεδήλου	H _{wr}	7 mm	$0.14 \cdot h_r$

Πίνακας 3.4: Βασικές διαστάσεις της μηχανής και μεγέθη της παραμετροποιημένης διαδικασίας σχεδίασης

Η τελική γεωμετρία παρουσιάζεται στο σχήμα 3.8 :



Σχήμα 3.8: Γεωμετρία ηλεκτρικής μηχανής ως αποτέλεσμα της λεπτομερούς προκαταρκτικής σχεδίασης.

Παρατηρείται ότι τα δόντια του στάτη είναι πολύ λεπτά σε σχέση με τα πλάτος των αυλάκων. Αυτό αναμένεται να οδηγήσει σε αυξημένη μαγνητική επαγωγή στα δόντια του στάτη και χαμηλή πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα. 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 1.7 T, το οποίο αποτέλεσε σχεδιαστική απαίτηση.

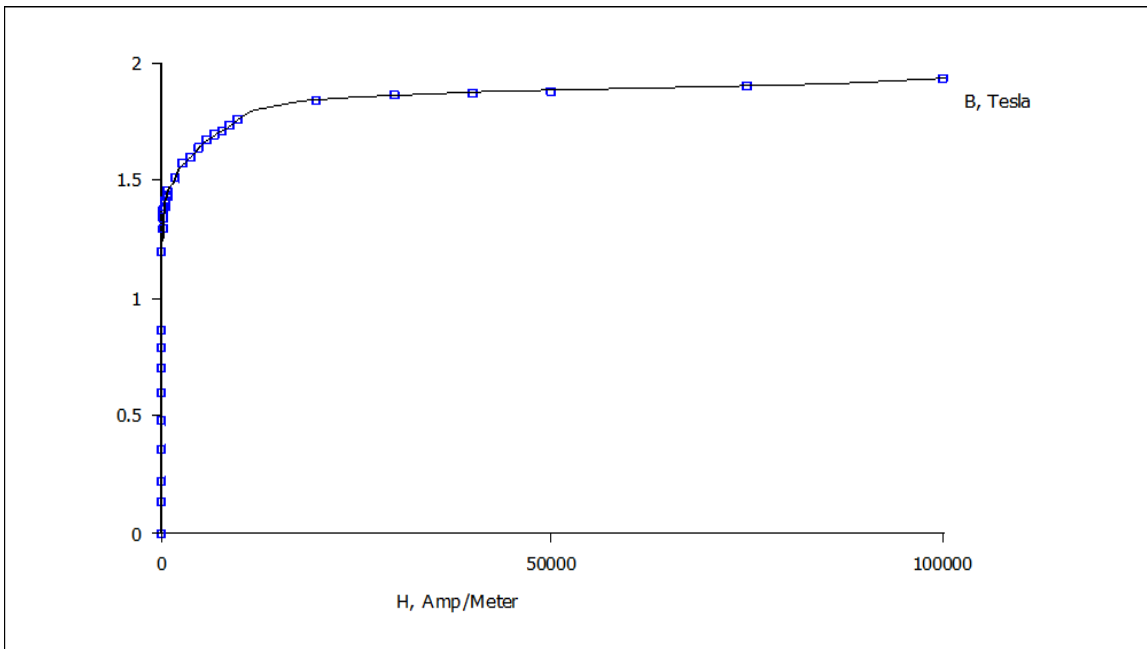
Σχετικά με το δρομέα, η σχέση αγωγιμότητας / σιδηρομαγνητικού υλικού στον πυρήνα φαίνεται να είναι σχετικά ικανοποιητική, με την έννοια ότι το εμβαδό των αυλάκων είναι σχεδόν το διπλάσιο από αυτό των δοντιών. Ίσως είναι απαραίτητη η αύξηση του πλάτους των δοντιών, ώστε να περιοριστεί η ένταση της μαγνητικής επαγωγής κάτω από 1.9 T. Από την άλλη πλευρά όμως, οι αύλακες είναι αρκετά βαθιές πράγμα το οποίο αναμένεται να προκαλέσει σημαντικές σκεδάσεις.

3.2.6 Υλικά κατασκευής

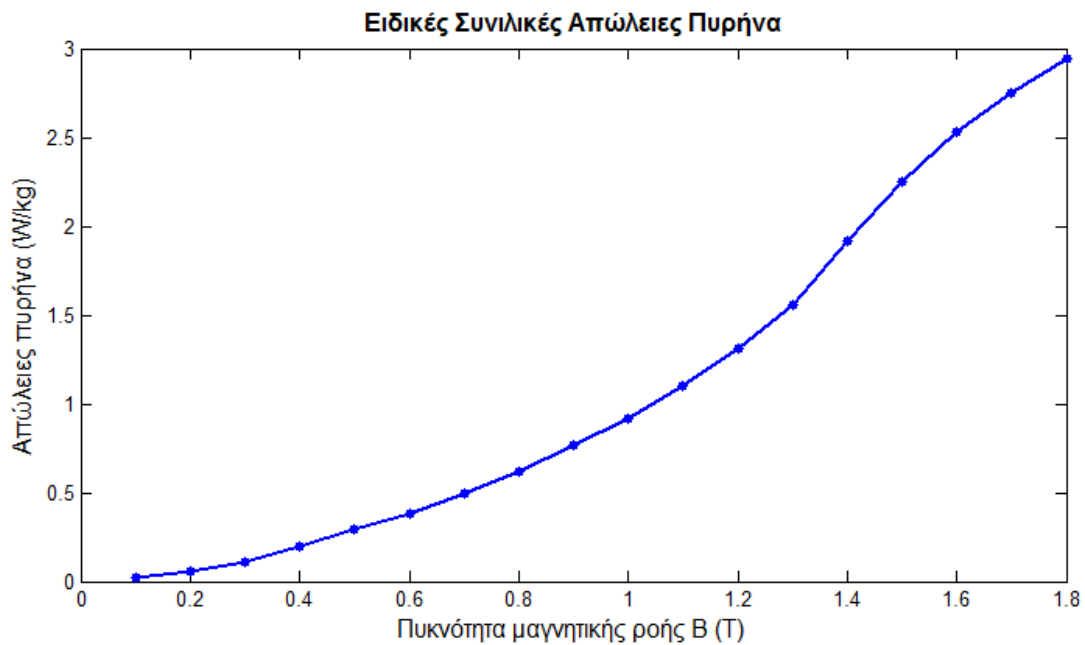
Στις αύλακες του δρομέα μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε χαλκός είτε αλουμίνιο. Ο χαλκός έναντι του αλουμινίου έχει μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα προσφέροντας υψηλότερη απόδοση (μικρότερες ωμικές απώλειες) και μικρότερο βάρος και όγκο κατασκευής. Μιας και τα παλαιότερα προβλήματα κατασκευής του χαλκού έχουν πια ξεπεραστεί επιλέγεται χαλκός[12],[13].

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 3.9: Μαγνητική πόλωση μαγνητικής λαμαρίνας M235-35A.



Σχήμα 3.10: Ειδικές συνολικές απώλειες πυρήνα μαγνητικής λαμαρίνας M235-35A στα 50 Hz.

3.3 Απώλειες Μηχανής

Στην ενότητα αυτή, μελετώνται οι βασικές πηγές απωλειών των ηλεκτρικών μηχανών. Οι δύο βασικές κατηγορίες απωλειών είναι οι **απώλειες χαλκού**, και οι **απώλειες πυρήνα**. Οι απώλειες πυρήνα με τη σειρά τους διακρίνονται σε απώλειες **υστέρησης** και **δινορρευμάτων**. Δευτερεύοντα ρόλο διαδραματίζουν οι **μηχανικές απώλειες**, οι οποίες διακρίνονται κυρίως σε **απώλειες λόγω τριβών στις εδράσεις**, και **απώλειες ανεμισμού**. Τέλος, ενά μικρό μέρος των απωλειών, αφορά τις **διαφεύγουσες απώλειες** οι οποίες σχετίζονται με τις ανώτερες αρμονικές της μηχανής.

3.3.1 Απώλειες χαλκού

Πρόκειται για τις ωμικές απώλειες που προκαλούνται απ' την διέλευση ρεύματος απ' τα πηνία της μηχανής. Όπως προκύπτει από το νόμο του Ohm, οι απώλειες χαλκού είναι ευθέως ανάλογες της συνολικής αντίστασης ανά φάση και ανάλογες του τετραγώνου της ενεργού τιμής του ρεύματος που διαρρέει τα πηνία κάθε φάσης. Για μια τριφασική μηχανή, οι απώλειες δίνονται από τη σχέση:

$$P_{cu} = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad (3.53)$$

Η ύπαρξη αρμονικών συνιστωσών στο φασικό ρεύμα προκαλεί επιπλέον απώλειες χαλκού ανώτερης τάξης. Είναι επομένως σημαντικό, η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος να είναι περιορισμένη, ώστε να περιορίζονται και οι αντίστοιχες απώλειες χαλκού.

3.3.2 Απώλειες πυρήνα

Όταν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό βρίσκεται μέσα σε χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, εμφανίζει τις λεγόμενες απώλειες πυρήνα υπό μορφή θερμότητας. Υπάρχουν δύο βασικοί μηχανισμοί μετατροπής της ενέργειας του πεδίου σε θερμότητα, οπότε προκύπτουν τα αντίστοιχα είδη απωλειών πυρήνα: απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων. Παρακάτω περιγράφονται οι μηχανισμοί αυτοί και ορισμένοι τρόποι μοντελοποίησής τους για την εκτίμηση των συνολικών απωλειών πυρήνα στις ηλεκτρικές μηχανές.

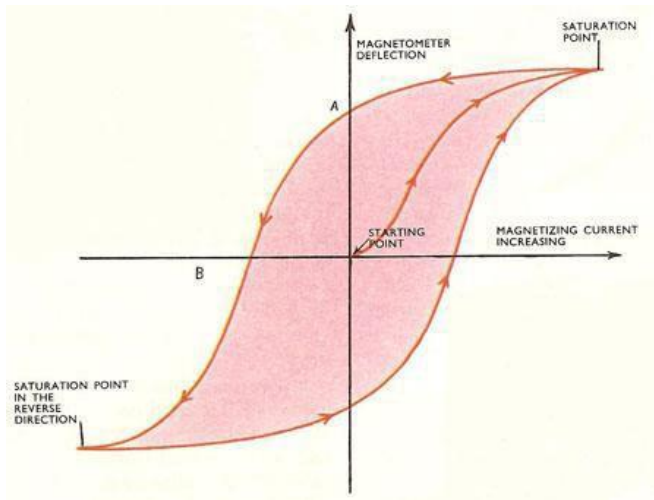
Απώλειες υστέρησης

Όταν η πυκνότητα μαγνητικής ροής σε ένα μέσο μεταβάλλεται τότε απορροφάται ή αποδίδεται ενέργεια από το μέσο αυτό. Η ενέργεια αυτή δίνεται από το ολοκλήρωμα:

$$w = \int_{B_1}^{B_2} H dB \quad (J/m^3) \quad (3.54)$$

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά τείνουν να διατηρήσουν τη μαγνητική ροή στο σώμα τους έπειτα από την επιβολή μαγνητικού πεδίου, ακόμα και μετά την αφαίρεσή του. Για το λόγο αυτό οι καμπύλες μαγνήτισης και απομαγνήτισης διαφέρουν, σχηματίζοντας τελικά τον βρόχο

υστέρησης όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11:



Σχήμα 3.11: Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού. [9]

Υπολογίζοντας το παραπάνω ολοκλήρωμα για ένα πλήρη κύκλο μαγνήτισης και απομαγνήτισης προκύπτει ότι το υλικό απορροφά περισσότερη ενέργεια απ' όση αποδίδει. Η ενεργειακή διαφορά μετατρέπεται σε θερμότητα και ισούται με το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης. Αυτή η ενέργεια που χάνεται σε κάθε κύκλο ονομάζεται απώλεια υστέρησης και συμβαίνει σε όλο τον όγκο του υλικού, με συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας και τη μείωση της απόδοσης, είτε πρόκειται για μετασχηματιστή είτε για ηλεκτρική μηχανή.

Θεωρώντας ότι η μαγνητική ροή μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με συχνότητα f , και αγνοώντας την ύπαρξη μικρότερων βρόχων, οι απώλειες υστέρησης δίνονται από την ακόλουθη εμπειρική σχέση [14] :

$$p_h = k_h \cdot f \cdot B_m^x \quad (W/m^3) \quad (3.55)$$

Όπου:

- k_h σταθερά που εξαρτάται από τη δομή του υλικού
- x η σταθερά του Steinmetz, η οποία συνήθως λαμβάνει την τιμή 2.

Η παραπάνω μοντελοποίηση των απωλειών υστέρησης προϋποθέτει ότι η μαγνητική ροή μεταβάλλεται ως προς το μέτρο, αλλά διατηρεί σταθερή διεύθυνση. Η θεώρηση αυτή είναι βάσιμη στους μετασχηματιστές, στο μεγαλύτερο μέρος του πυρήνα τους. Όμως στις ηλεκτρικές μηχανές η διεύθυνση της μαγνητικής ροής αλλάζει, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται επιπλέον απώλεια υστερήσεως λόγω περιστροφής.

Απώλειες δινορρευμάτων

Η χρονική μεταβολή της μαγνητικής ροής επάγει ηλεκτρικό πεδίο στο σώμα του πυρήνα, σύμφωνα με το νόμο του Faraday. Λόγω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των σιδηρομαγνητικών υλικών, εμφανίζονται ρεύματα στο σώμα του πυρήνα, που ονομάζονται

δινορρέυματα και ρέουν κυκλικά σε επίπεδο κάθετο προς τη διεύθυνση της μαγνητικής ροής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας, λόγω φαινομένου Joule, και τη μετατροπή της σε ανεπιθύμητη θερμότητα.

Θεωρώντας μια απλουστευμένη περίπτωση όπου η μαγνητική ροή μεταβάλλεται ημιτονοειδώς, και μόνο κατά μέτρο, η ειδική απώλεια λόγω δινορρευμάτων, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$p_e = k_e \cdot B^2 \cdot f^2 \quad (W/m^3) \quad (3.56)$$

, όπου k_e σταθερά που εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού, και f η συχνότητα μεταβολής του μαγνητικού πεδίου.

Παρατηρούμε ότι η απώλεια από δινορρέυματα εξαρτάται πολύ από τη συχνότητα καθώς είναι ανάλογη προς το τετράγωνο αυτής. Είναι επίσης ανάλογη προς το τετράγωνο του πάχους του ελάσματος και το τετράγωνο της πυκνότητας της ροής, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογη της ειδικής αντίστασης του υλικού.

Όπως και στις απώλειες υστέρησης, οι απώλειες δινορρευμάτων μοντελοποιούνται ικανοποιητικά από την παραπάνω σχέση, όταν υπολογίζονται απώλειες μετασηματιστή. Στην περίπτωση στρεφόμενης μηχανής όμως, προστίθεται ένας ακόμη όρος περιστροφής, στις απώλειες, ο οποίος οφείλεται στη μεταβολή της διεύθυνσης της μαγνητικής επαγωγής.

3.3.3 Μοντελοποίηση απωλειών

Ωμικές απώλειες

Ο υπολογισμός των απωλειών χαλκού του στάτη γίνεται μέσω μιας διαδικασίας που δημιουργήθηκε στο MATLAB. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζει τη σχέση 3.57 για τον υπολογισμό της αντίστασης του χαλκού:

$$R_s = \frac{\rho l}{S_{wire}} \quad (3.57)$$

Όπου: ρ η ειδική αντίσταση του χαλκού,

l το συνολικό μήκος των αγωγών χαλκού,

S_{wire} η διατομή ενός αγωγού χαλκού

Οπότε οι απώλειες χαλκού του στάτη, είναι :

$$P_{Cu\text{Stator}} = 3 \cdot I^2_{rms} \cdot R \quad (3.58)$$

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

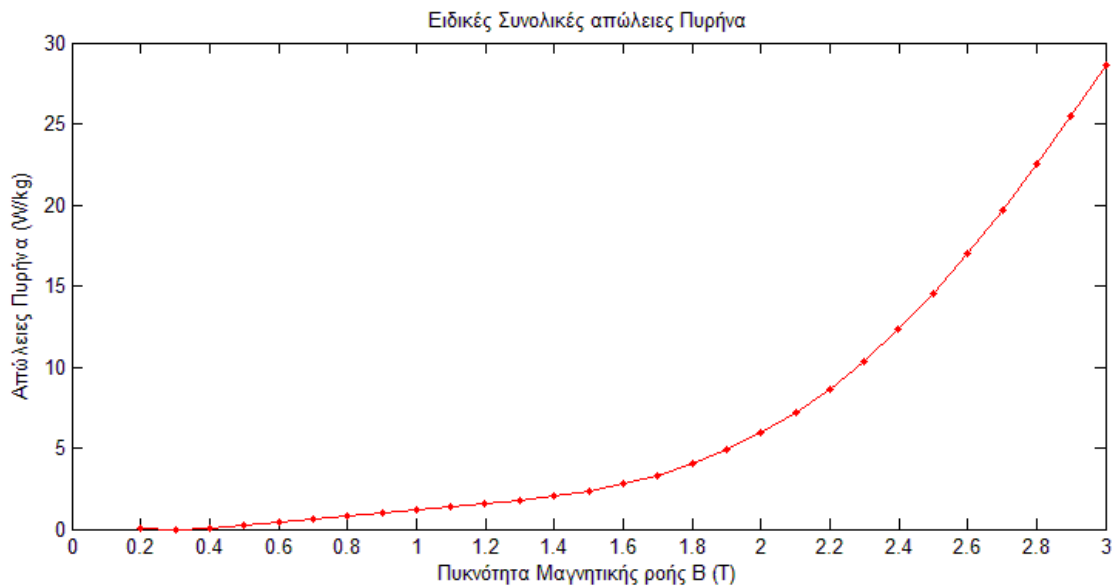
Απώλειες πυρήνα

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 δίνονται από τον 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 από την καμπύλη ειδικών απωλειών (Σχήμα 3.11) να υπολογίσουμε τις απώλειες σιδήρου σε κάθε στοιχείο ξεχωριστά. Αθροίζοντας τις επιμέρους απώλειες, προκύπτει μια προσέγγιση των συνολικών απωλειών στάτη και δρομέα.

Οι απώλειες πυρήνα οφείλονται στην υστέρηση και τα δινορρέυματα. Και τα δυο αυτά φαινόμενα έχουν έντονη εξάρτηση από τη συχνότητα. Συγκεκριμένα, όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα των πεδίων, τόσο σημαντικότερες είναι και οι απώλειες που προκύπτουν.

Η καμπύλη ειδικών απωλειών του σιδήρου που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις φαίνεται στο Σχήμα 3.12 για συχνότητα 66.7 Hz.



Σχήμα 3.12: Ειδικές συνολικές απώλειες πυρήνα μαγνητικής λαμαρίνας M235-35A στα 66.7 Hz.

Για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα δημιουργήθηκε διαδικασία στο πρόγραμμα MATLAB η οποία για κάθε στοιχείο του πλέγματος αποθήκευε το μέτρο της πυκνότητας της μαγνητικής ροής στο σημείο αυτό και μέσω ενός πολωνύμου 5^{ου} βαθμού το οποίο προσέγγιζε την καμπύλη απωλειών πυρήνα συναρτήσεως της μαγνητικής επαγωγής που φαίνεται στο Σχήμα 3.13 υπολόγιζε τις απώλειες σε W/Kg του συγκεκριμένου σημείου. Ακολούθως γινόταν άθροιση των απωλειών και πολλαπλασιασμός με τη μάζα του πυρήνα:

$$P_{Fe} = \sum_{i=0}^{numofelm} S_i \cdot P_{\epsilon_{\delta,i}} \cdot L \cdot \rho \quad (3.59)$$

Όπου:

- $P_{\epsilon_{\delta,i}}$ είναι 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 είναι το εμβαδό του στοιχείου i , σε mm^2
- L είναι το ενεργό μήκος της μηχανής
- ρ είναι η πυκνότητα του υλικού, σε kg/mm^3 .

Οι απώλειες πυρήνα του δρομέα είναι αμελητέες διότι η συχνότητα των πεδίων εκεί είναι μικρότερη του 1Hz. . [8], [9]

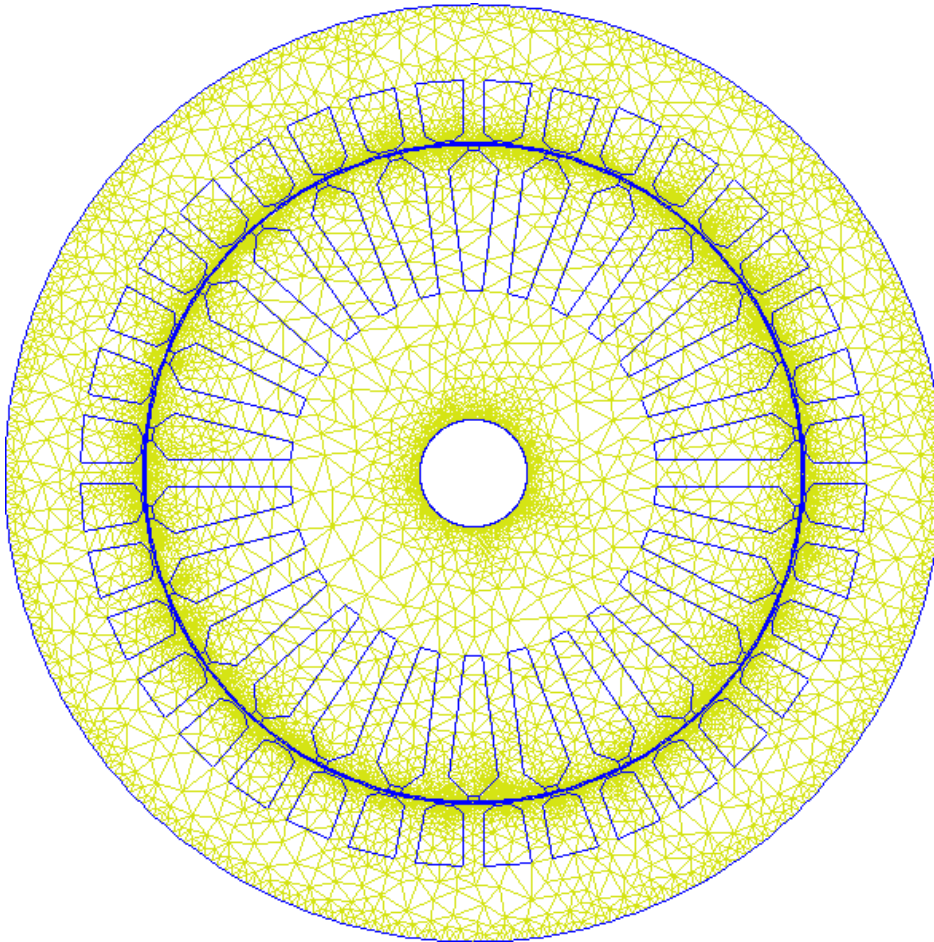
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

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. Σχεδιάζεται επίσης ένας κινητήρας συγκεντρωμένου τυλίγματος και συγκρίνονται με κριτήριο την παραγόμενη ροπή, την κυμάτωσή της, την κατανομή του πεδίου στο διάκενο και τις απώλειες. Γίνεται ανάλυση ευαισθησίας των γεωμετρικών παραμέτρων με σκοπό να γίνει σχεδίαση που θα προσεγγίζει κατά το δυνατόν τις προδιαγραφές που τέθηκαν στο κεφάλαιο 3.

4.1 Εισαγωγή του κινητήρα στο πρόγραμμα FEMM

Ο κινητήρας σχεδιάζεται στο πρόγραμμα femm και επιλέγεται πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που θεωρείται κατάλληλο για την ανάλυση όπως φαίνεται στο σχήμα. Το πλέγμα στο διάκενο και τις λεπτομέρειες της γεωμετρίας που επιζητείται μεγαλύτερη ακρίβεια είναι πιο πυκνό από ότι στο σώμα του δρομέα και του στάτη και αποτελείται συνολικά από 40340 στοιχεία .



Σχήμα 4.1: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων,

4.1.1 Σύγκριση τοπολογιών συγκεντρωμένου και διανεμημένου τυλίγματος

Με δεδομένο του αριθμού των πόλων ($P = 4$) της μηχανής καταλήγουμε σε δύο υποψήφιες τοπολογίες τυλίγματος, αυτή του απλού διανεμημένου τυλίγματος μονής στρώσης με $Q = 36$ αύλακες στο στάτη ($q=3$), που σχεδιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, και του συγκεντρωμένου τυλίγματος διπλής στρώσης με $Q = 6$ αύλακες στο στάτη.

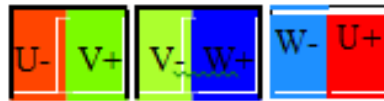
Στα σχήματα 4.1 και 4.2 φαίνονται οι κατανομές των ζωνών φάσης στα αυλάκια, για τις

δύο διαμορφώσεις του στάτη [16] .



Σχήμα 4.1: Διαμόρφωση διανεμημένου τυλίγματος απλής στρώσης με $Q = 36$ αύλακες.[16]

Στο πρώτο σχήμα σχεδιάστηκε στάτης που διαθέτει $Q = 36$ αύλακες και απλό διανεμημένο τύλιγμα μονής στρώσης με $q = 3$ αυλάκια ανά πόλο και φάση. Η επιλογή αυτή έγινε ώστε να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η κυμάτωση της παραγόμενης ροπής και οι αρμονικές συνιστώσες. Το παραπάνω μοτίβο επαναλαμβάνεται δύο φορές για να προκύψει το συνολικό τύλιγμα της μηχανής.

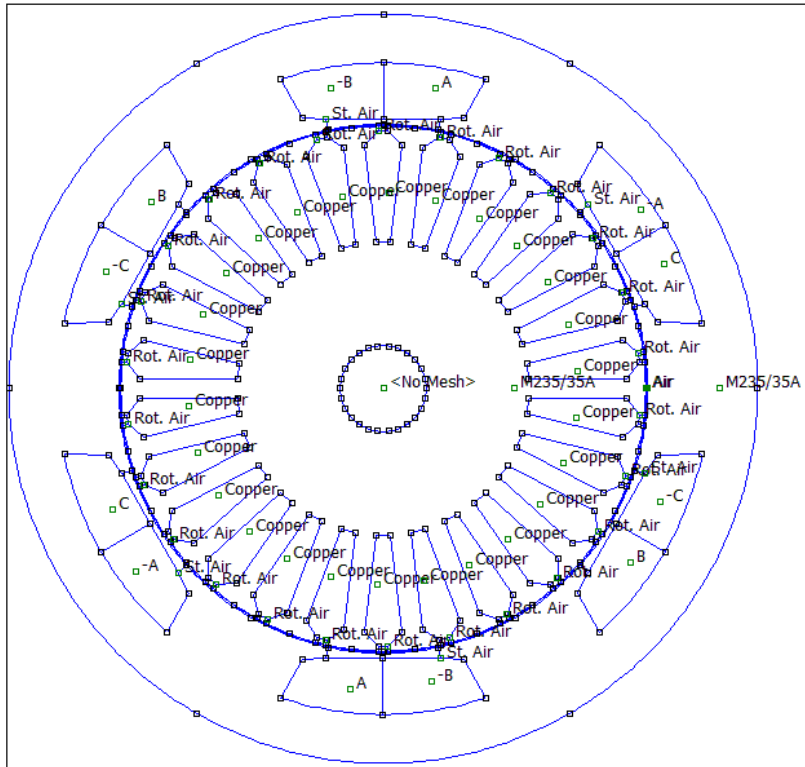


Σχήμα 4.2: Διαμόρφωση συγκεντρωμένου τυλίγματος διπλής στρώσης με $Q = 6$ αύλακες [16]

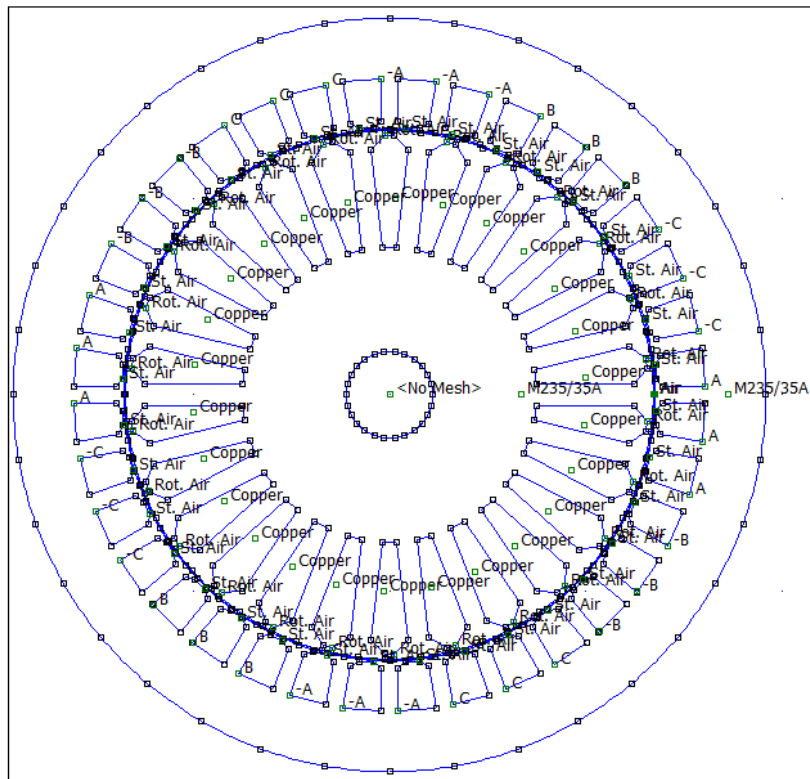
Στο δεύτερο σχήμα, έχουμε την υλοποίηση της μηχανής με 6 αύλακες στο στάτη και συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης. Το τύλιγμα παρουσιάζει συμμετρία, και το παραπάνω μοτίβο επαναλαμβάνεται δύο φορές, προκειμένου να συμπληρωθούν οι αύλακες, και να ολοκληρωθεί το τύλιγμα της μηχανής.

Προκειμένου να γίνει η οριστική επιλογή του τυλίγματος της μηχανής, πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων FEMM, δύο διαφορετικές σχεδιάσεις μοντέλων, μία για κάθε επιλογή τυλίγματος. Στα δύο μοντέλα, ο δρομέας της μηχανής είναι ίδιος, ενώ στο στάτη, φαίνονται οι κατανομές των ζωνών φάσης των παραπάνω σχημάτων στις δύο διαστάσεις.

Στα σχήματα 4.3 και 4.4 παρουσιάζονται τα δύο διαφορετικά μοντέλα προς προσομοίωση:



Σχήμα 4.3: Μοντέλο συγκεντρωμένου τυλίγματος.



Σχήμα 4.4: Μοντέλο διανεμημένου τυλίγματος

Από την προκαταρκτική σχεδίαση της μηχανής διανεμημένου τυλίγματος, έχει προκύψει εμβαδό αύλακας:

$$A_{\text{αυλ}} = 416 \text{ mm}^2 \quad (4.1)$$

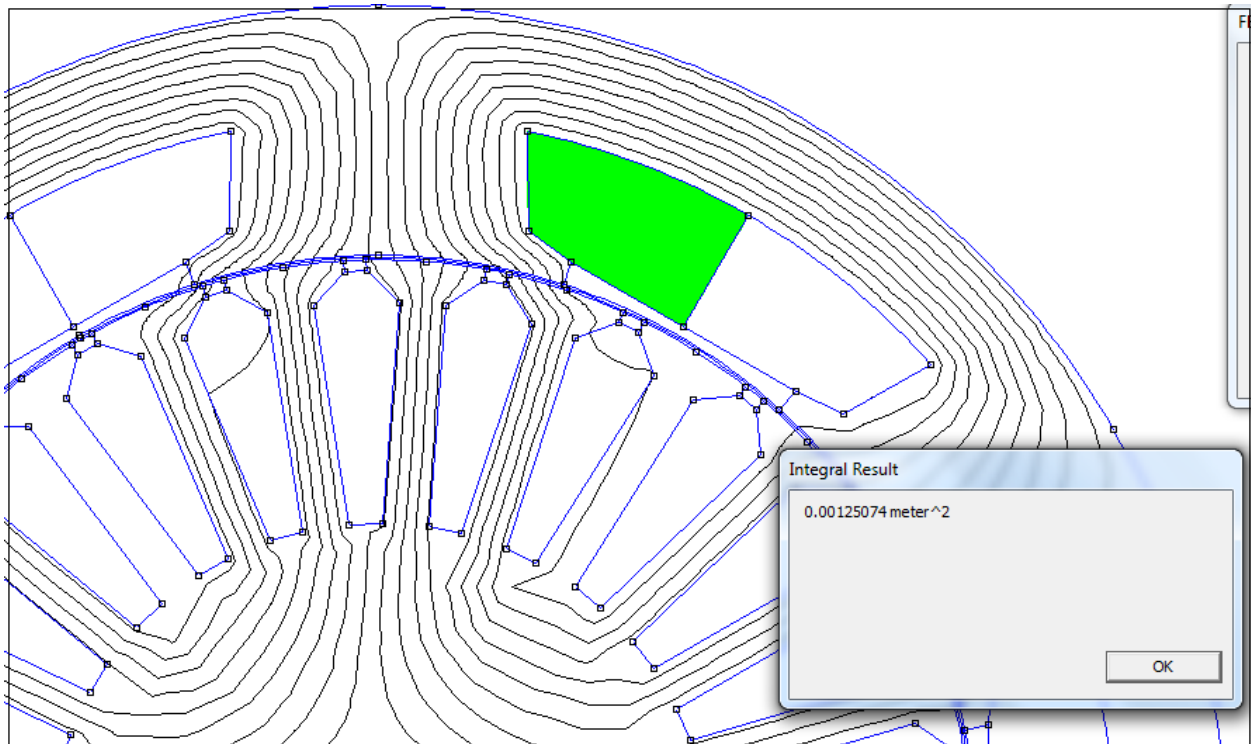
Αυτό σημαίνει ότι για $Q = 36$ αύλακες, το συνολικό εμβαδό που απαιτείται, για τις αυλακώσεις της μηχανής θα είναι:

$$A_{\text{συν}} = Q \cdot A_{\text{αυλ}} = 14,976 \text{ mm}^2 \quad (4.2)$$

Πρέπει οι δύο προς σύγκριση γεωμετρίες να έχουν ίδιο συνολικό εμβαδό για αυλακώσεις. Επομένως, το μοντέλο συγκεντρωμένου τυλίγματος, πρέπει να διαστασιοποιηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε το εμβαδό μιας στρώσης αύλακας να είναι:

$$A_{\text{αυλ,con}} = \frac{A_{\text{συν}}}{2 \cdot 6} = 1,248 \text{ mm}^2 \quad (4.3)$$

Στο Σχήμα 4.5, φαίνεται το εμβαδό μιας στρώσης αύλακας, όπως αυτό υπολογίστηκε στο post-processing του προγράμματος Femm. Παρατηρούμε ότι, η αύλακα έχει πράγματι το ζητούμενο εμβαδό, για τη γεωμετρία συγκεντρωμένου τυλίγματος.



Σχήμα 4.5: Εμβαδόν αύλακας μοντέλου συγκεντρωμένου τυλίγματος

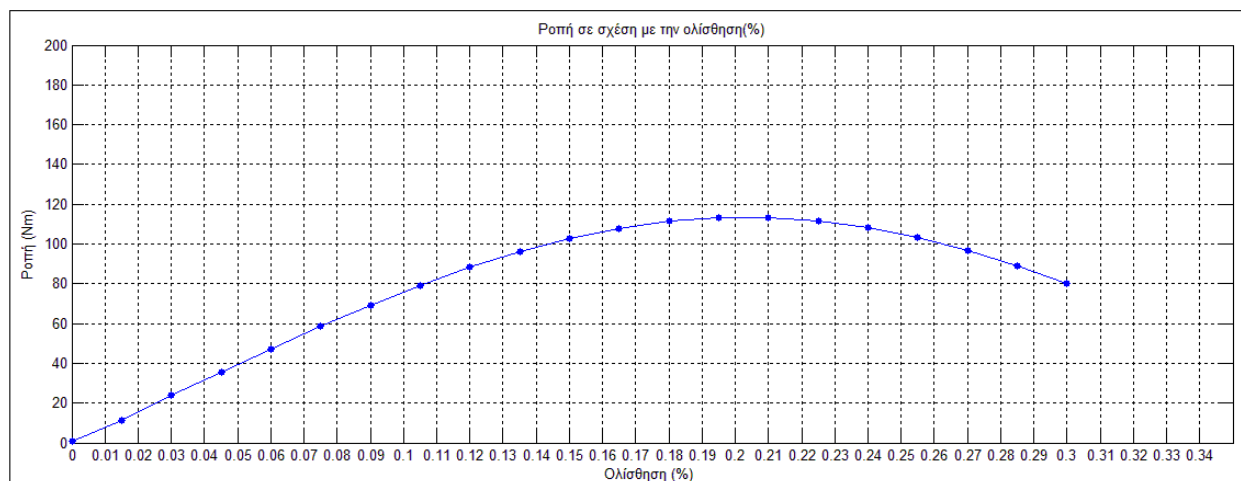
Στη συνέχεια πραγματοποιούνται μια σειρά από δοκιμές, μέσω του προγράμματος FEMM, ώστε να συγκριθούν οι δύο τοπολογίες και να επιλεγεί η καταλληλότερη για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Χαρακτηριστική Ροπής-Ολίσθησης

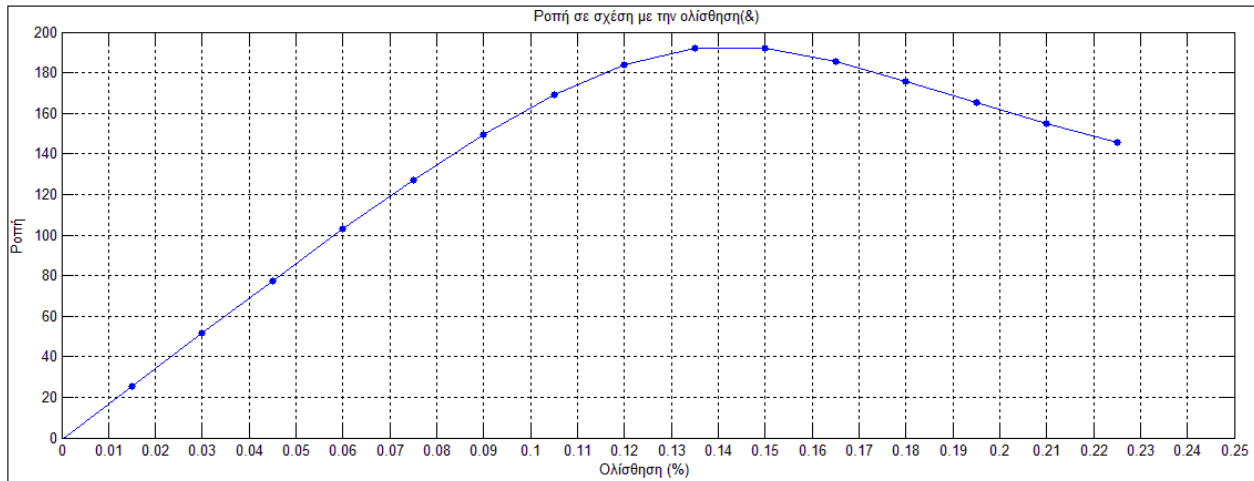
Όπως έχει εξηγηθεί στην παράγραφο 3.1, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων στο FEMM λύνει μαγνητοστατικά και αρμονικά προβλήματα μόνο. Στην περίπτωση σύγχρονων μηχανών, η ανάλυση είναι εύκολη διότι στο δρομέα υπάρχει ένα σταθερό ως προς αυτόν πεδίο. Επομένως η μηχανή μπορεί να αναλυθεί θεωρώντας πλαίσιο αναφοράς το δρομέα και τροφοδοτώντας με ρεύματα το στάτη. Με τον τρόπο αυτό το πεδίου 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 του δημιουργούνται τα επαγόμενα ρεύματα στο δρομέα της μηχανής.

Για να επιλεγεί η συχνότητα αυτή αξίζει να γίνει μια διερεύνηση με κριτήριο την παραγόμενη ροπή. Μεταβάλλεται η συχνότητα του προβλήματος με μεταβλητό βήμα και μετράται η ροπή, ώστε να παραχθεί η καμπύλη των Σχήματος 4.6 και 4.7, για τα μοντέλα συγκεντρωμένου και διανεμημένου τυλίγματος αντίστοιχα.



Σχήμα 4.6: Χαρακτηριστική ροπής-ολίσθησης μοντέλου συγκεντρωμένου τυλίγματος



Σχήμα 4.7: Χαρακτηριστική ροπής-ολίσθησης μοντέλου διανεμημένου τυλίγματος

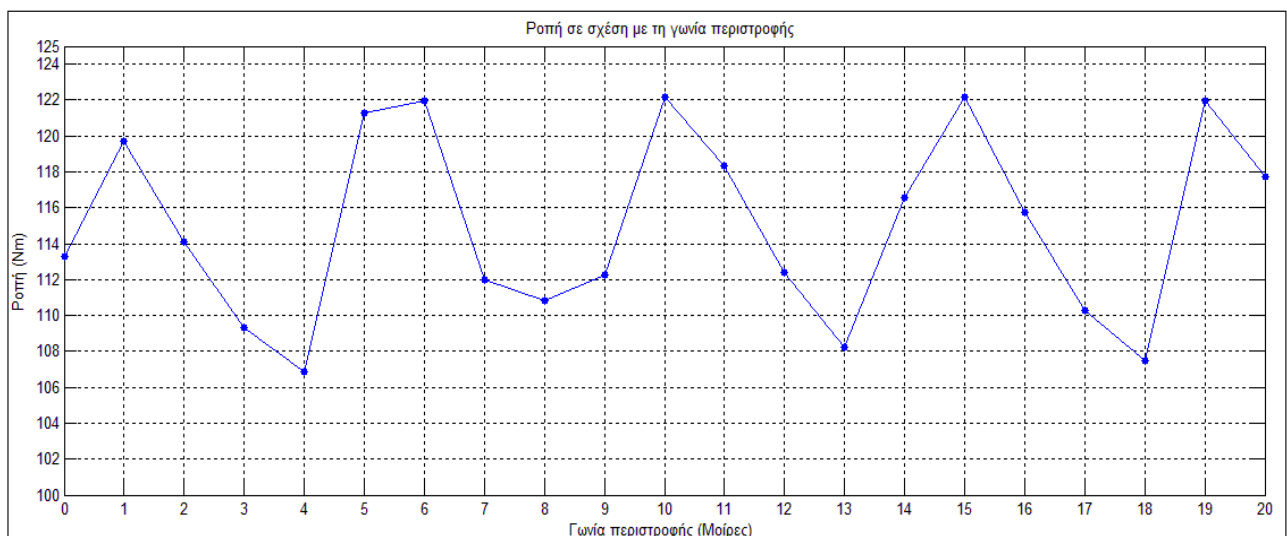
Συγκρίνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται πως το μοντέλο διανεμημένου τυλίγματος σαφέστατα υπερτερεί του συγκεντρωμένου ως προς την παραγόμενη ροπή. Η διαφορά οφείλεται πιθανότατα στο χειρότερο συντελεστή τυλίγματος που διαθέτει η τοπολογία του συγκεντρωμένου τυλίγματος ($K_w = 0.866$) σε σχέση με τον μοναδιαίο συντελεστή του διανεμημένου.

Χαρακτηριστική Ροπής-Γωνίας δ°

Προκειμένου να εξάγουμε τη χαρακτηριστική T- δ , περιστρέψαμε επαναληπτικά το δρομέα της μηχανής, με κατάλληλο βήμα, διατηρώντας σταθερό το πεδίο του στάτη. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε στιγμιότυπο στο οποίο η φάση Α παρουσιάζει μέγιστο.

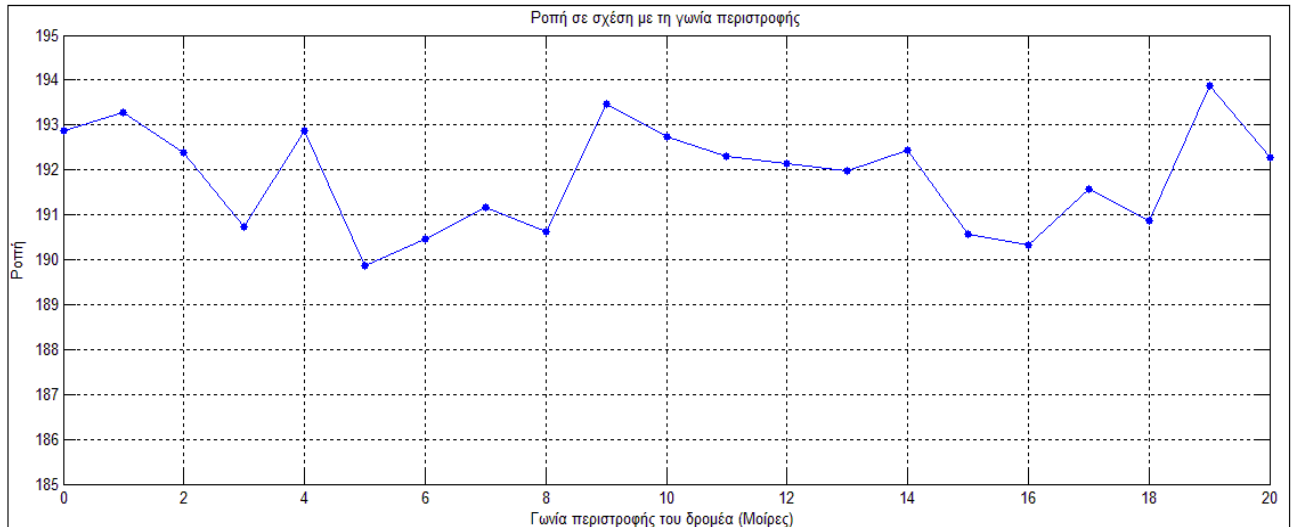
Καθώς ο δρομέας αλλάζει θέση σε σχέση με το στάτη, μεταβάλλεται η γεωμετρία του μαγνητικού κυκλώματος με αποτέλεσμα να επικρατούν διαφορετικές αρμονικές χώρου που μεταβάλλουν την παραγόμενη ροπή.

Στα Σχήματα 4.8 και 4.9 φαίνονται οι καμπύλες για τα μοντέλα συγκεντρωμένου και διανεμημένου τυλίγματος αντίστοιχα.



Σχήμα 4.8: Ροπή σε σχέση με τη γωνία περιστροφής του δρομέα μοντέλου

συγκεντρωμένου τυλίγματος



Σχήμα 4.9: Ροπή σε σχέση με τη γωνία περιστροφής του δρομέα μοντέλου διανεμημένου τυλίγματος

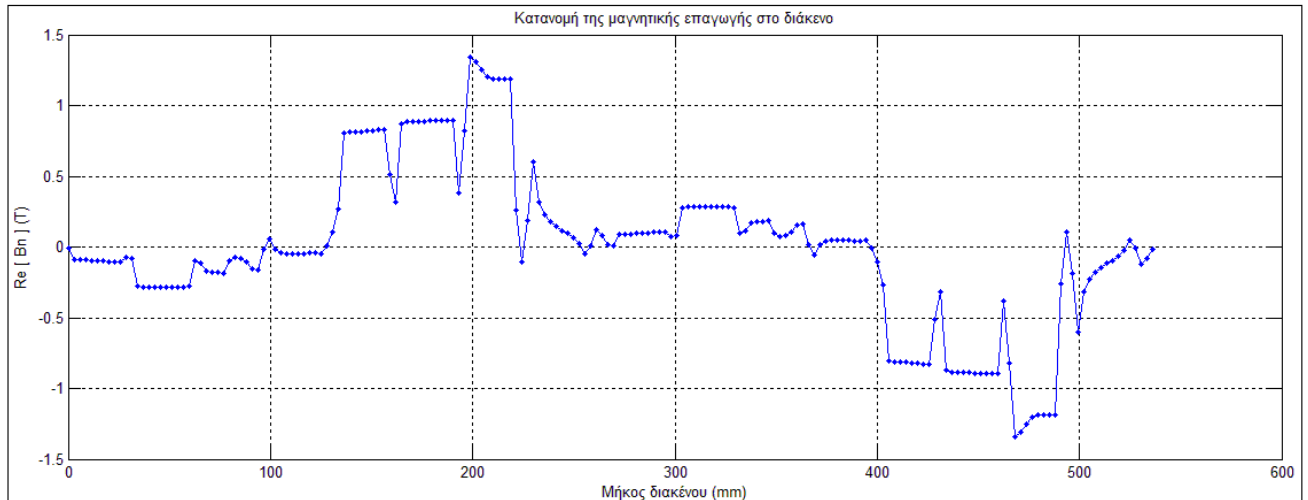
Για το μοντέλο συγκεντρωμένου τυλίγματος η μέση ροπή είναι 115 Nm, με ελάχιστη τιμή τα 106.9Nm και μέγιστη τα 122.2 Nm, οπότε υπολογίζεται η κυμάτωση της ροπής που παρουσιάζει και προκύπτει περίπου 13.3%.

Για το μοντέλο διανεμημένου τυλίγματος η μέση ροπή είναι 191.85Nm, με ελάχιστη τιμή τα 189.9Nm και μέγιστη τα 193.86 Nm, οπότε υπολογίζεται η κυμάτωση της ροπής που παρουσιάζει και προκύπτει περίπου 2.1%.

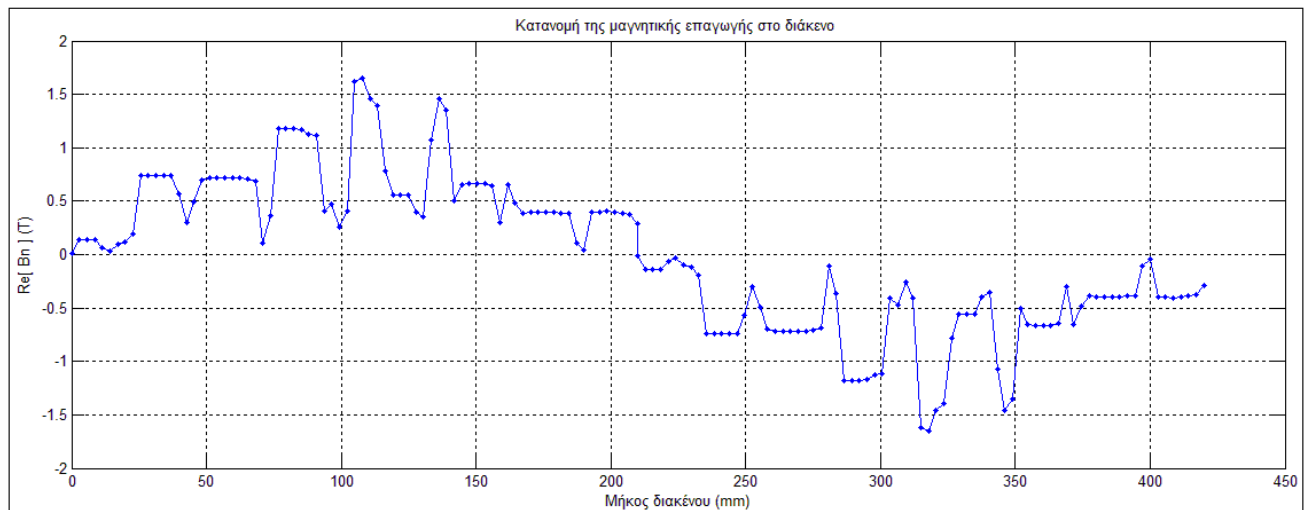
Παρατηρείται ότι η κυμάτωση ροπής για το μοντέλο συγκεντρωμένου τυλίγματος είναι σχετικά μεγάλη. Για τη μείωση της κυμάτωσης, απαιτείται κατάλληλος συνδυασμός πόλων και αυλάκων. Αυτό επιτυγχάνεται εύκολα σε μηχανές με μεγάλο αριθμό πόλων, όμως για τη μηχανή της εφαρμογής μας ($P = 4$) οι δυνατοί συνδυασμοί συγκεντρωμένου τυλίγματος είναι αρκετά περιορισμένοι. Αντιθέτως, στο μοντέλο διανεμημένου τυλίγματος η κυμάτωση της ροπής είναι πολύ ικανοποιητική.

Κατανομή του πεδίου στο διάκενο

Στα σχήματα 4.10 και 4.11 φαίνεται το πραγματικό μέρος της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο για τα μοντέλα συγκεντρωμένου και διανεμημένου τυλίγματος αντίστοιχα. Παρατηρείται έντονο αρμονικό περιεχόμενο και στις δύο περιπτώσεις, λόγω της διαμόρφωσης των αυλάκων του στάτη και του δρομέα.

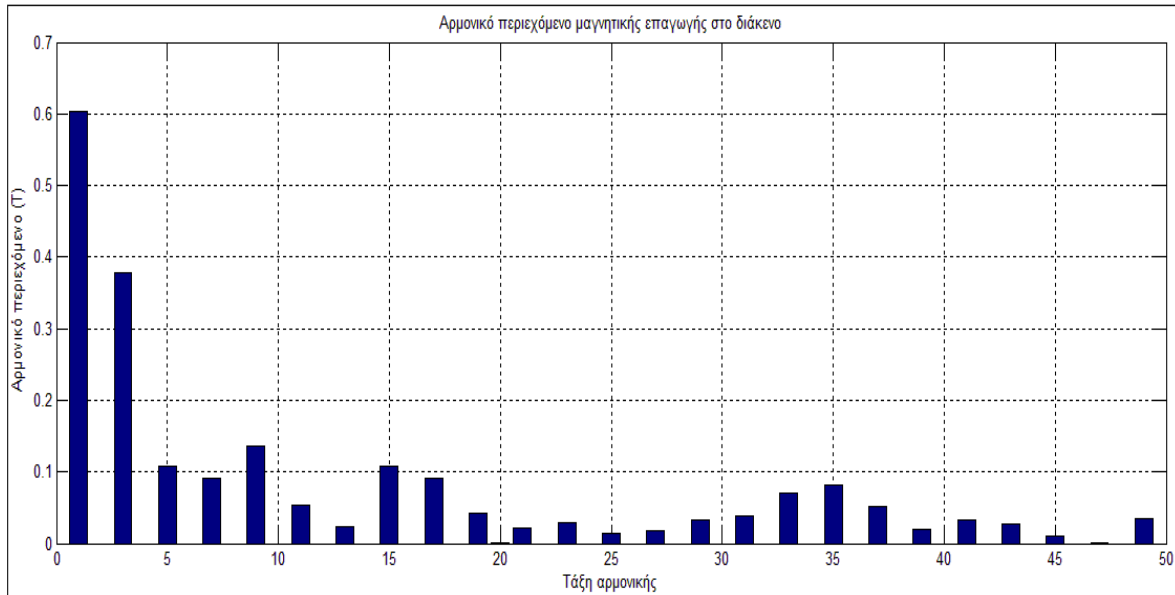


Σχήμα 4.10: Πυκνότητα μαγνητικής ροής κατά μήκος του διακένου στο μοντέλο συγκεντρωμένου τυλίγματος

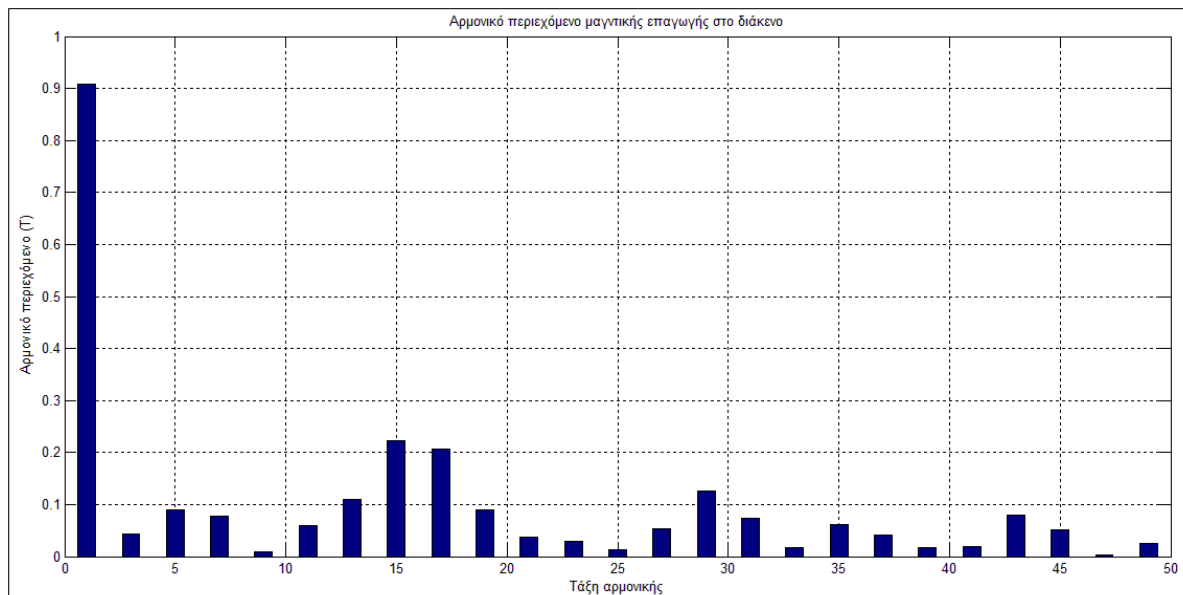


Σχήμα 4.11: Πυκνότητα μαγνητικής ροής κατά μήκος του διακένου στο μοντέλο διανεμημένου τυλίγματος

Αναλύοντας τις παραπάνω κυματομορφές κατά Fourier προκύπτει το αρμονικό περιεχόμενο και η συμμετοχή κάθε αρμονικής. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα σχήματα 4.12 και 4.13 καθώς και στους πίνακες 4.1 και 4.2.



Σχήμα 4.12: Αρμονικό περιεχόμενο μαγνητικής επαγωγής στο μοντέλο συγκεντρωμένου τυλίγματος



Σχήμα 4.13: Αρμονικό περιεχόμενο μαγνητικής επαγωγής στο μοντέλο διανεμημένου τυλίγματος

Τάξη αρμονικής	% συμμετοχή
3	62.6
5	18.1
7	15.2
9	22.5
11	8.9
13	4
15	18.1
17	15.1

Πίνακας 4.1: Συμμετοχή αρμονικών στο μοντέλο συγκεντρωμένου τυλίγματος

Τάξη αρμονικής	% συμμετοχή
3	4.7
5	9.9
7	8.6
9	0.98
11	6.6
13	12
15	24.4
17	22.8

Πίνακας 4.2: Συμμετοχή αρμονικών στο μοντέλο διανεμημένου τυλίγματος

Στο μοντέλο συγκεντρωμένου τυλίγματος προέκυψε συνολική αρμονική παραμόρφωση 80.9%, ενώ στο μοντέλο διανεμημένου τυλίγματος 47.5%.

Παρατηρείται ότι η κατανομή του πεδίου στο διάκενο της μηχανής συγκεντρωμένου τυλίγματος παρουσιάζει εντονότατη παραμόρφωση και απέχει πολύ από την επιθυμητή ημιτονική, ενώ στο μοντέλο διανεμημένου τυλίγματος η κατανομή των τυλιγμάτων σε περισσότερα αυλάκια ($q=3$) βελτιώνει αισθητά την κατανομή της μαγνητικής επαγωγής, με αποτέλεσμα την αυξημένη ποιότητα ροπής και επαγόμενης αντι-ΗΕΔ, ως προς το αρμονικό τους περιεχόμενο.

Απώλειες

Για τα δύο μοντέλα, υπολογίστηκαν οι απώλειες χαλκού και σιδήρου, κατά την ονομαστική λειτουργία της μηχανής. Και τα δύο μοντέλα έδωσαν θετικά αποτελέσματα, καθώς οι συνολικές απώλειες δεν ξεπέρασαν το 5% της ονομαστικής ισχύος της μηχανής (χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν οι μηχανικές και οι διαφεύγουσες απώλειες).

Το μοντέλο συγκεντρωμένου τυλίγματος παρουσιάζει, όπως αναμενόταν[19], σχετικά μικρότερες απώλειες χαλκού, χάρη στα κοντύτερα άκρα τυλίγματος που επιτυγχάνονται με αυτή τη διαμόρφωση. Τα αποτελέσματα φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα 4.3:

	Συγκεντρωμένο τύλιγμα	Διανεμημένο τύλιγμα
Απώλειες χαλκού	413.2W (0.9%)	968.5 W (1.88%)
Απώλειες σιδήρου	152.1 W (0.33%)	146.1 W (0.25%)
Συνολικές απώλειες	565.3 W (1.23%)	114.6 W (2.43%)

Πίνακας 4.3: Απώλειες για τα μοντέλα συγκεντρωμένου και διανεμημένου τυλίγματος

Παρατηρείται ότι οι συνολικές απώλειες είναι ελαφρώς μεγαλύτερες για το μοντέλο διανεμημένου τυλίγματος.

Συμπεράσματα

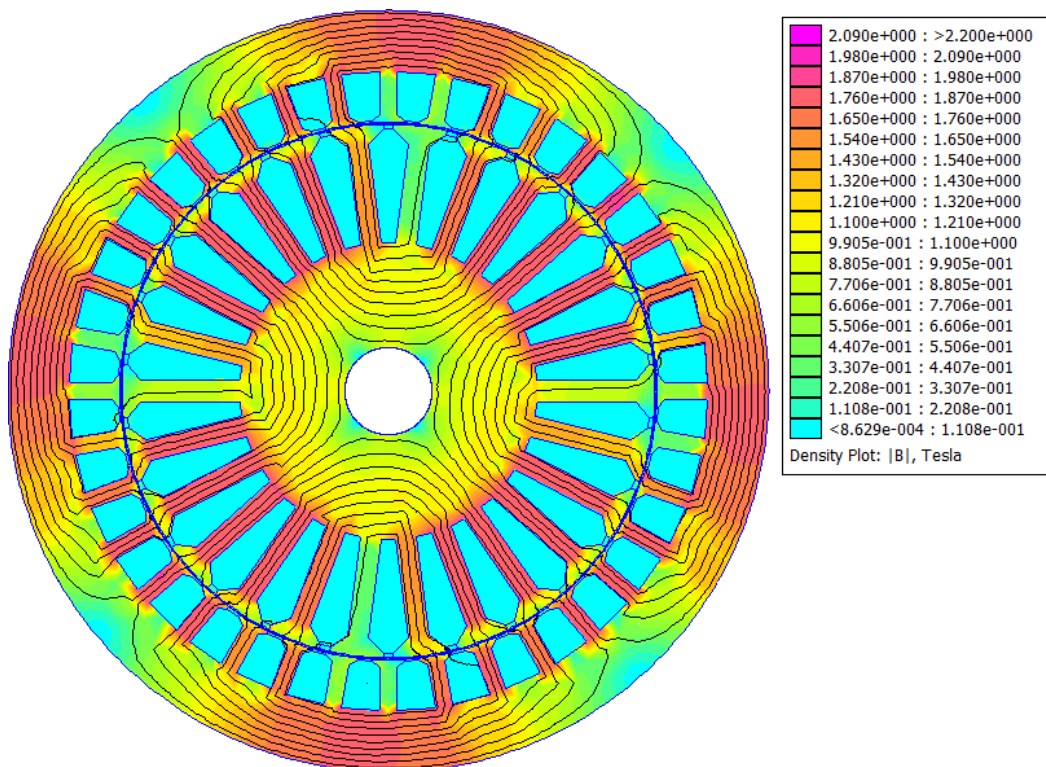
Ερμηνεύοντας τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων συμπεραίνεται πως η επιλογή του μοντέλου διανεμημένου τυλίγματος υπερτερεί έναντι του συγκεντρωμένου, για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Η παραγόμενη ροπή στο μοντέλο διανεμημένου τυλίγματος είναι σαφώς μεγαλύτερη και εντός των σχεδιαστικών ορίων, σε αντίθεση με το μοντέλο συγκεντρωμένου τυλίγματος. Επίσης, η κυμάτωση της ροπής και η αρμονική παραμόρφωση της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο της μηχανής είναι πολύ μικρότερες. Όσον αφορά τις απώλειες, το μοντέλο συγκεντρωμένου τυλίγματος υπερτερεί ελαφρώς, όχι όμως σε βαθμό που θα αποτελούσε σχεδιαστικό πλεονέκτημα.

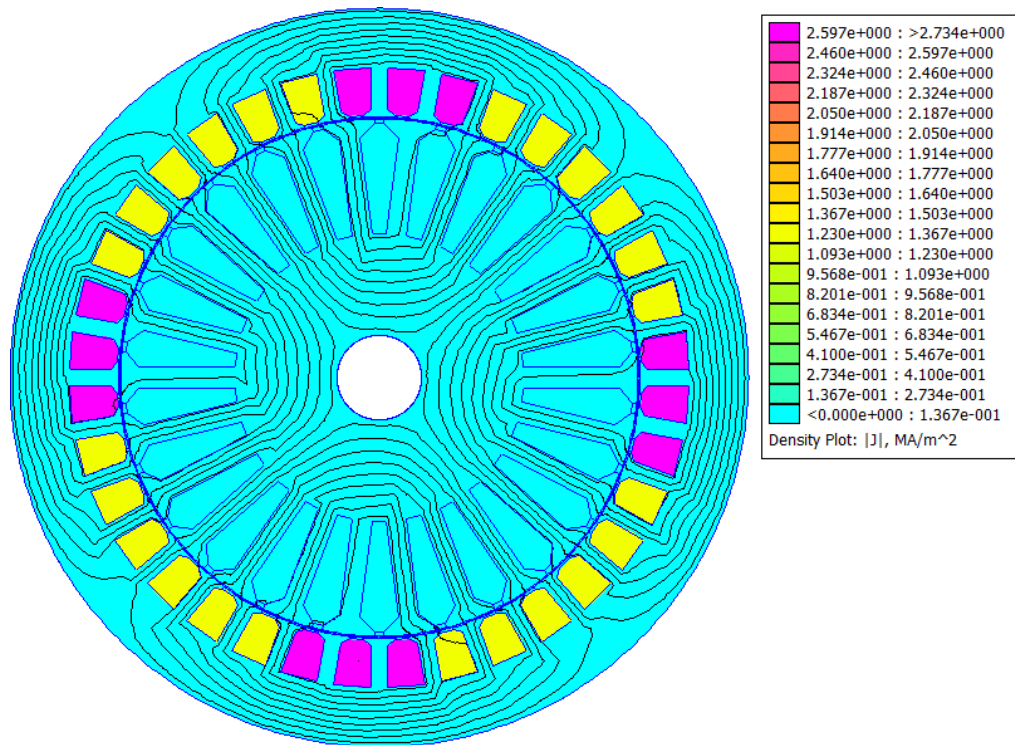
Γενικά, το συγκεντρωμένο τύλιγμα αναμένεται να παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον σε μηχανές με μεγαλύτερο αριθμό πόλων, όπου υπάρχει σχετική άνεση ως προς την επιλογή του πλήθους των αυλάκων του στάτη, ώστε να επιτυγχάνεται μείωση της κυμάτωσης της παραγόμενης ροπής και ημιτονική αντι-HEΔ.

4.1.2 Μαγνητοστατική ανάλυση

Αρχικά, η μηχανή διανεμημένου τυλίγματος που επιλέχθηκε προσομοιώνεται σε κενό φορτίο. Αυτό επιτυγχάνεται ορίζοντας μηδενική συχνότητα. Στο Σχήμα 4.14 φαίνεται η μαγνητική επαγωγή και η πυκνότητα ρευμάτων που προκύπτουν.



(α)



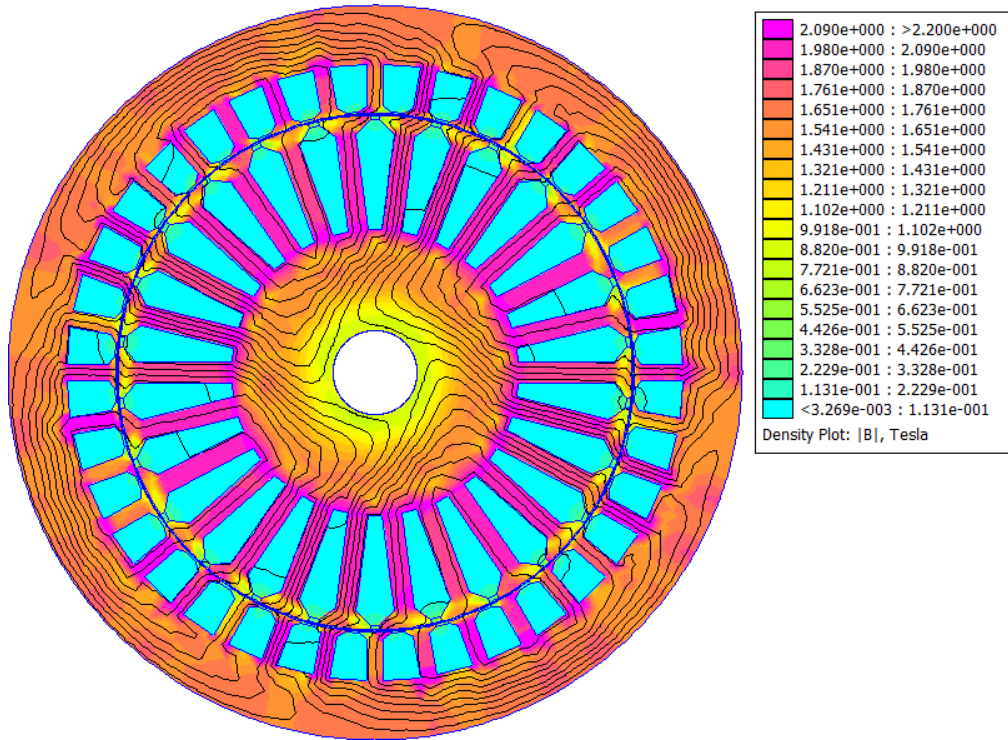
(β)

Σχήμα 4.14: Μέτρο μαγνητικής επαγωγής (α) και πυκνότητα ρεύματος (β) σε κενό φορτίο

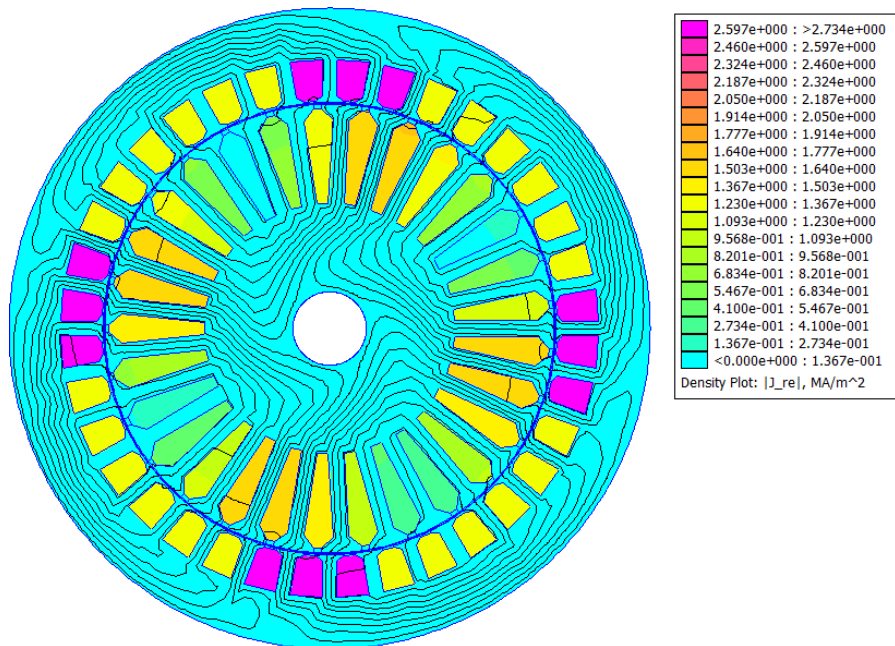
Οι ράβδοι του δρομέα δεν διαρρέονται από ρεύμα. Επομένως το παραγόμενο πεδίο οφείλεται μόνο στο τύλιγμα του στάτη.

4.1.3 Αρμονική ανάλυση

Η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής και τις πυκνότητας ρεύματος του κινητήρα στην ολίσθηση μέγιστης ροπής, όπως αυτή υπολογίστηκε στη διερεύνηση της παραγράφου 4.1.1, φαίνεται στα σχήματα 4.15 (α),(β) :



(α)



(β)

Σχήμα 4.15: Μέτρο μαγνητικής επαγωγής **(α)** και πυκνότητα ρεύματος **(β)** στην συχνότητα μέγιστης ροπής

Μελετώντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης γίνονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Ο σίδηρος του κινητήρα υπερφορτίζεται. Η μαγνητική επαγωγή στα δόντια του στάτη και του δρομέα λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες των επιθυμητών.
- Ο χαλκός στο στάτη υποχρησιμοποιείται. Λαμβάνοντας υπόψιν συντελεστή πληρότητας των αυλάκων του στάτη ίσο με 0,6 η πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες του στάτη 3.2 A/mm^2 , μικρότερη από τα 4 A/mm^2 που θεωρήθηκαν ανεκτά κατά το σχεδιασμό.

Για τους λόγους αυτούς πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας των γεωμετρικών παραμέτρων, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη αξιοποίηση των υλικών.

4.1.4 Απώλειες και απόδοση αρχικής σχεδίασης

Στην ονομαστική ολίσθηση της μηχανής υπολογίζονται οι απώλειες για τη σχεδίαση που πραγματοποιήθηκε, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.3 :

$$\text{Απώλειες χαλκού στάτη : } P_{\text{Cu}stator} = 896.6 \text{ W}$$

$$\text{Απώλειες χαλκού δρομέα : } P_{\text{Cu}rotor} = 71.9 \text{ W}$$

$$\text{Απώλειες σιδήρου : } P_{\text{Fe}} = 146.1 \text{ W}$$

Επίσης θεωρούνται μηχανικές απώλειες $P_{m,loss}$ τριβών, ανεμισμού και διαφεύγουσες, 2% της ισχύος εξόδου. Οπότε προκύπτει:

$$\text{Μηχανικές απώλειες : } P_{m,loss} = 920 \text{ W}$$

Έτσι, η απόδοση της μηχανής είναι :

$$\text{Efficiency} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{T \omega}{T \omega + P_{cstator} + P_{crotor} + P_{Fe} + P_{m,loss}}$$

Και προκύπτει :

$$n = 0.9526 \text{ ή } 95.26\%$$

Η απόδοση του κινητήρα που υπολογίστηκε θεωρείται εξαιρετικά ικανοποιητική.

4.2 Ανάλυση ευαισθησίας γεωμετρικών παραμέτρων για βελτιστοποίηση γεωμετρίας

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 : ο αριθμός αυλάκων του δρομέα (Q_r), το πλάτος (b_{ts} , b_{tr}) και το μήκος (h_s , h_r) των δοντιών του στάτη και του δρομέα, καθώς επίσης και το μήκος του σώματος επιστροφής στάτη (h_{cs}) και οι διαστάσεις του ανοίγματος των αυλάκων στάτη και δρομέα (b_{os} , b_{or}).

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.

Η ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων γίνεται με κύριο στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ροπής και την μείωση των φορτίσεων και απωλειών. Κατά την ανάλυση γίνεται έλεγχος παραμέτρων όπως η μαγνητική επαγωγή στα δόντια του στάτη και του δρομέα και η πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα, ώστε να διατηρούνται εντός των πλαισίων που έχουν τεθεί ήδη από την προκαταρκτική σχεδίαση του κινητήρα. Πιο συγκεκριμένα η πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη και του δρομέα διατηρείται κάτω από τα 4 A/mm^2 , η μέγιστη μαγνητική επαγωγή στο δόντι του στάτη κάτω από το 1.8 T , η μέγιστη μαγνητική επαγωγή στο σώμα του στάτη κάτω από 1.7 T , η μέγιστη μαγνητική επαγωγή στο δόντι του δρομέα κάτω από 1.9 T και η μέγιστη μαγνητική επαγωγή στο σώμα του δρομέα κάτω από τα 1.5 T . Υπολογίζονται επίσης οι απώλειες χαλκού και σιδήρου για να γίνει εκτίμηση της επίδρασης στην απόδοση της μηχανής. Επισημαίνεται ότι οι απώλειες χαλκού στάτη καθώς και οι λοιπές μηχανικές απώλειες θεωρούνται σταθερές και δε συνυπολογίζονται στις συνολικές απώλειες που παρουσιάζονται κατά τη βελτιστοποίηση.

4.2.1 Ανάλυση ευαισθησίας γεωμετρικών παραμέτρων δρομέα

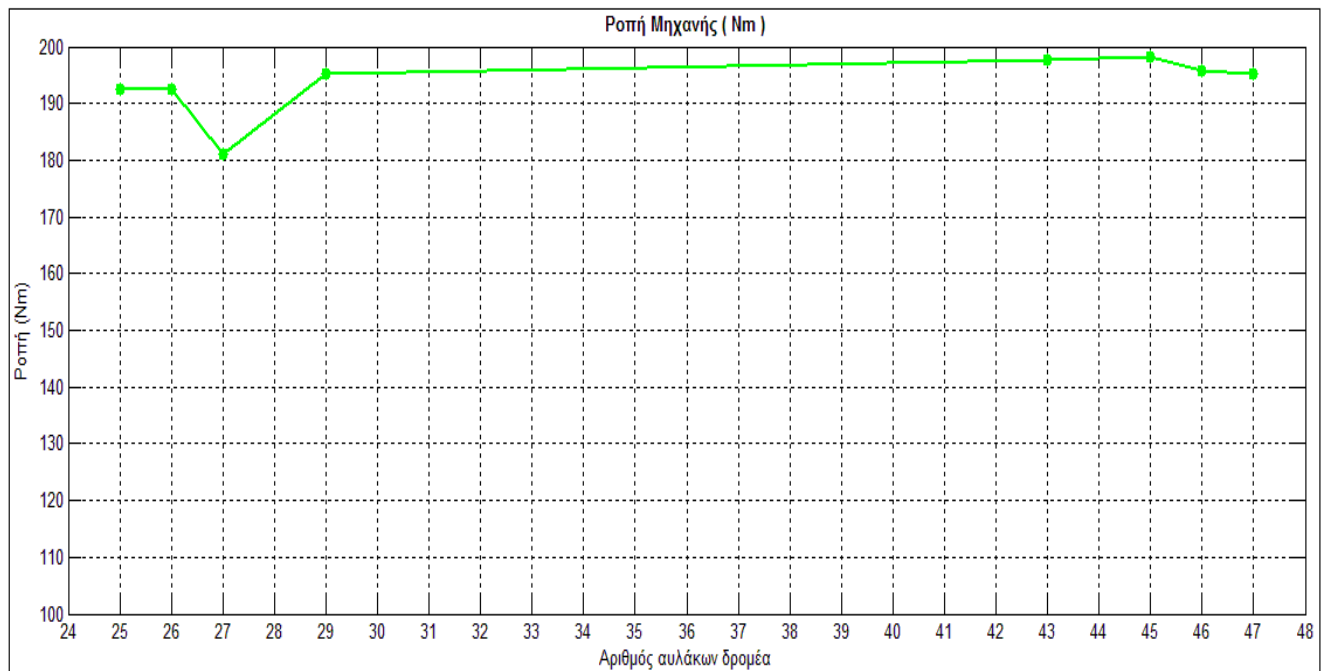
Αριθμός αυλάκων δρομέα

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.2.4, η επιλογή του αριθμού των αυλάκων του δρομέα απαιτεί μεγάλη προσοχή, καθώς οι αποδεκτοί συνδυασμοί αυλάκων δρομέα και στάτη είναι συγκεκριμένα.

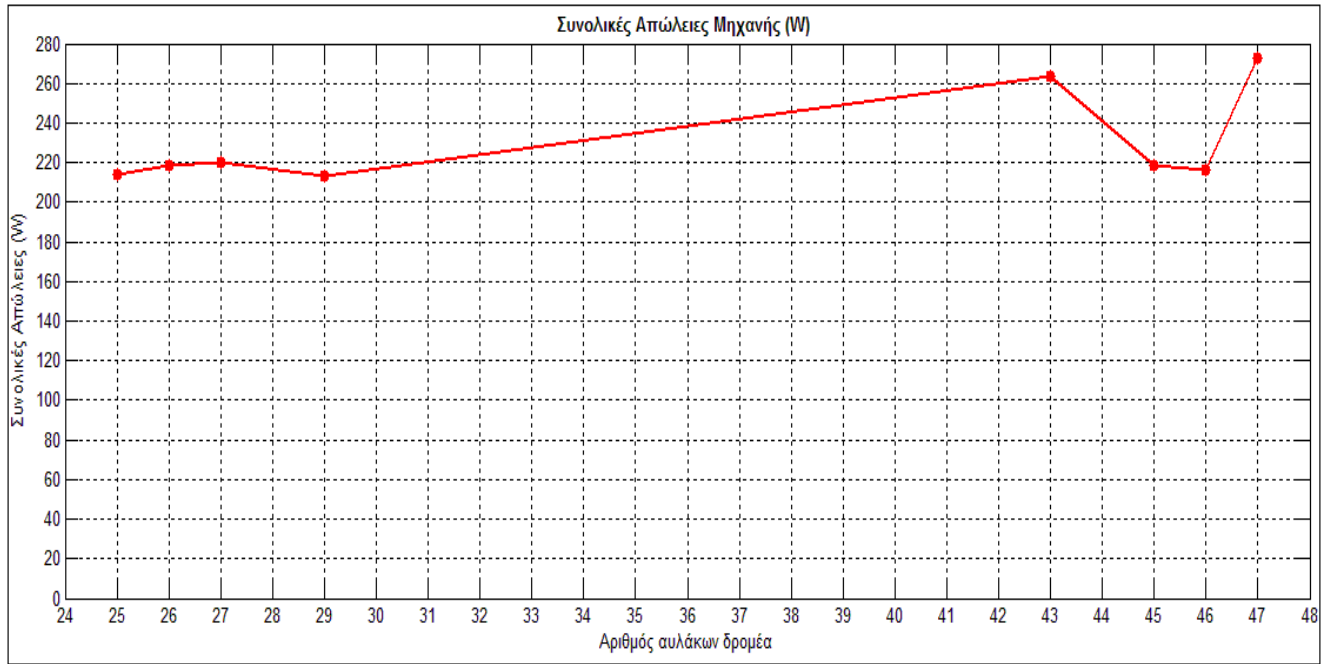
Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή οι επιτρεπτοί αριθμοί αυλάκων δρομέα είναι:

$$Q_r = 25, 26, 27, 29, 43, 45, 46, 47 \text{ αυλάκες}$$

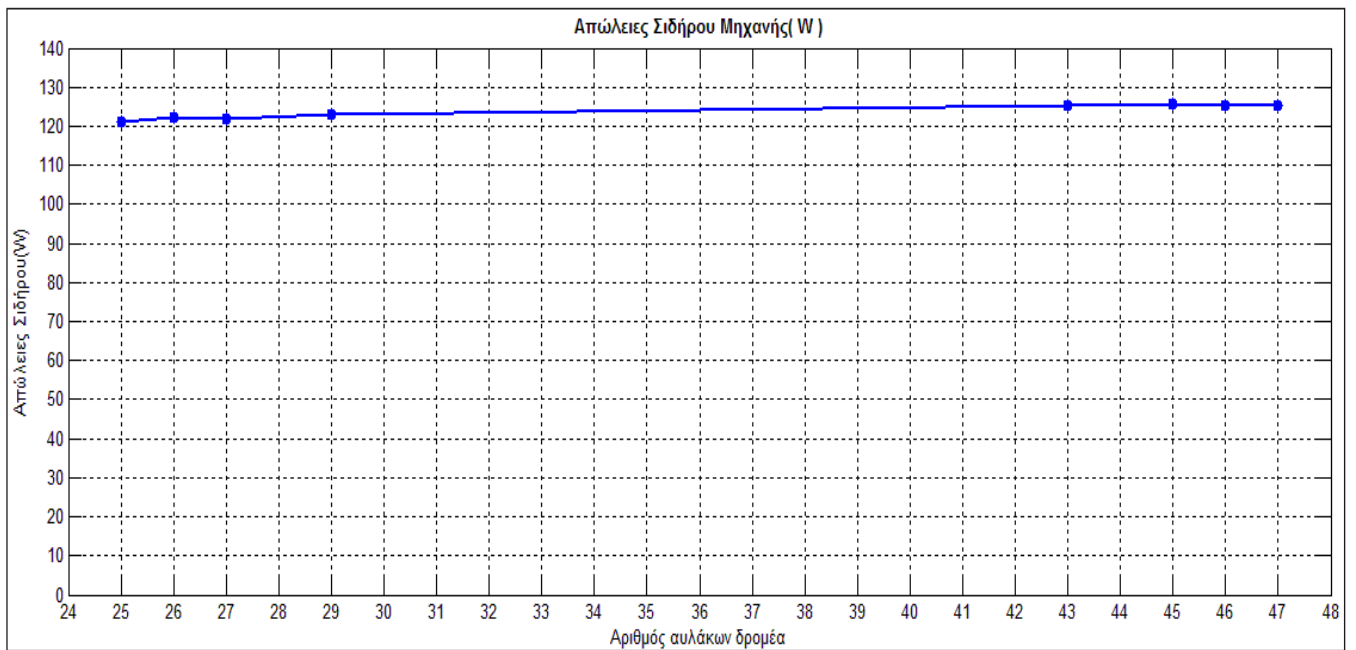
Τα αποτελέσματα της διερεύνησης παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



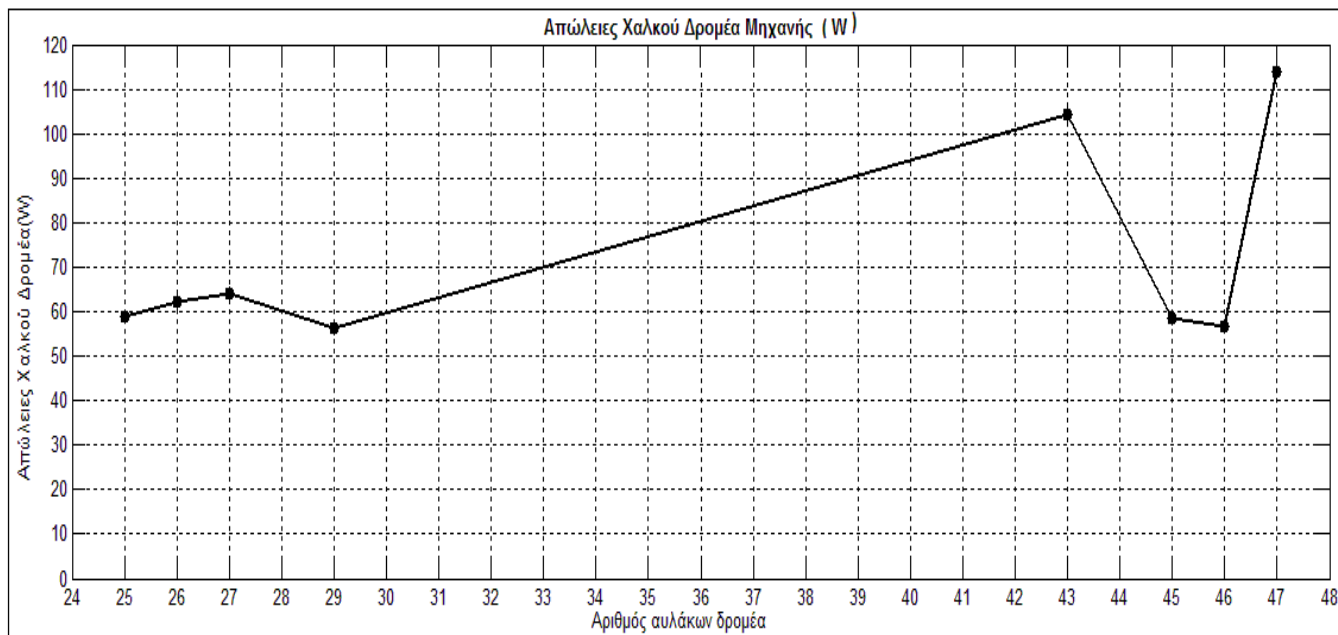
(α)



(β)



(γ)



(δ)

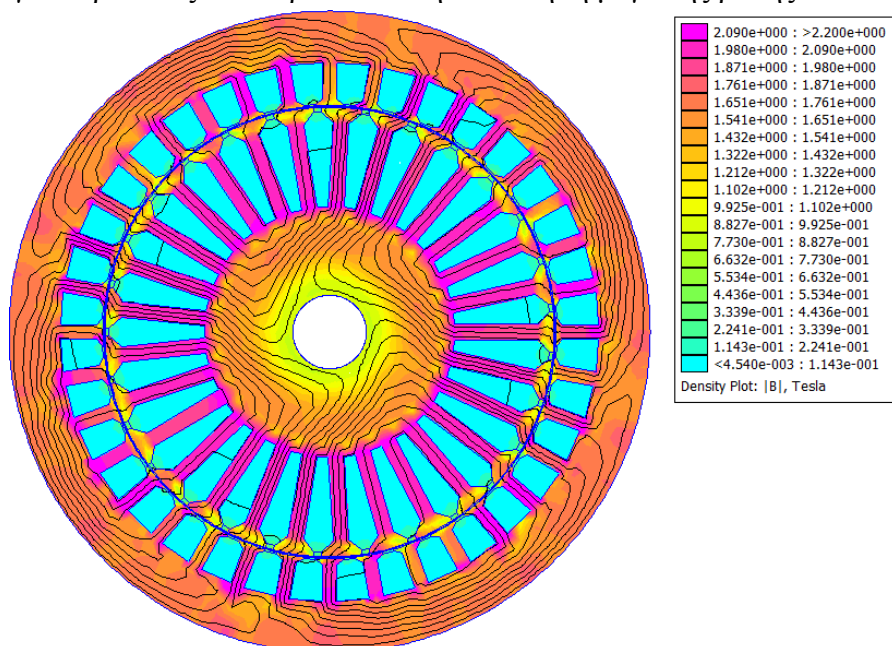
Σχήμα 4.16. : Αριθμός αυλάκων δρομέα και (α) ροπή, (β) συνολικές απώλειες, (γ) απώλειες σιδήρου, και (δ) απώλειες χαλκού δρομέα

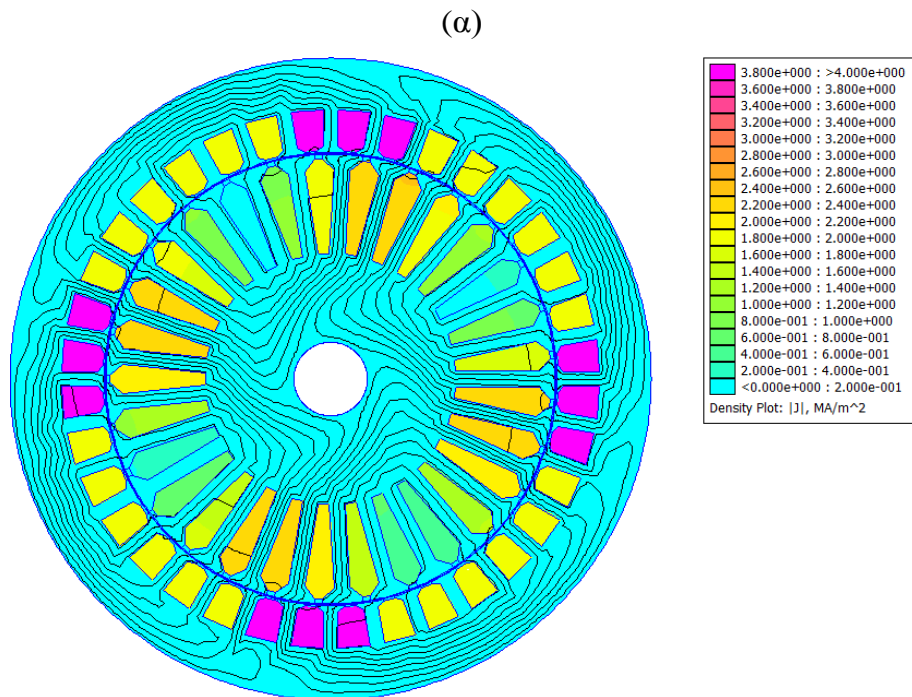
Επισημαίνεται ότι στις συνολικές απώλειες της μηχανής δεν συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες χαλκού στάτη, που θεωρούνται σταθερές, ενώ επίσης αγνοούνται οι μηχανικές απώλειες περιστροφής, καθώς στόχος είναι η μείωση των απωλειών μέσω μείωσης των φορτίσεων της μηχανής.

Με κριτήριο τη μεγιστοποίηση της ροπής και τη διατήρηση των απωλειών στα χαμηλότερα δυνατά επίπεδα, επιλέγεται αριθμός αυλάκων δρομέα:

$$Q_r = 29$$

Η νέα τοπολογία παρουσιάζεται παρακάτω στην ολίσθηση μέγιστης ροπής.





(β)

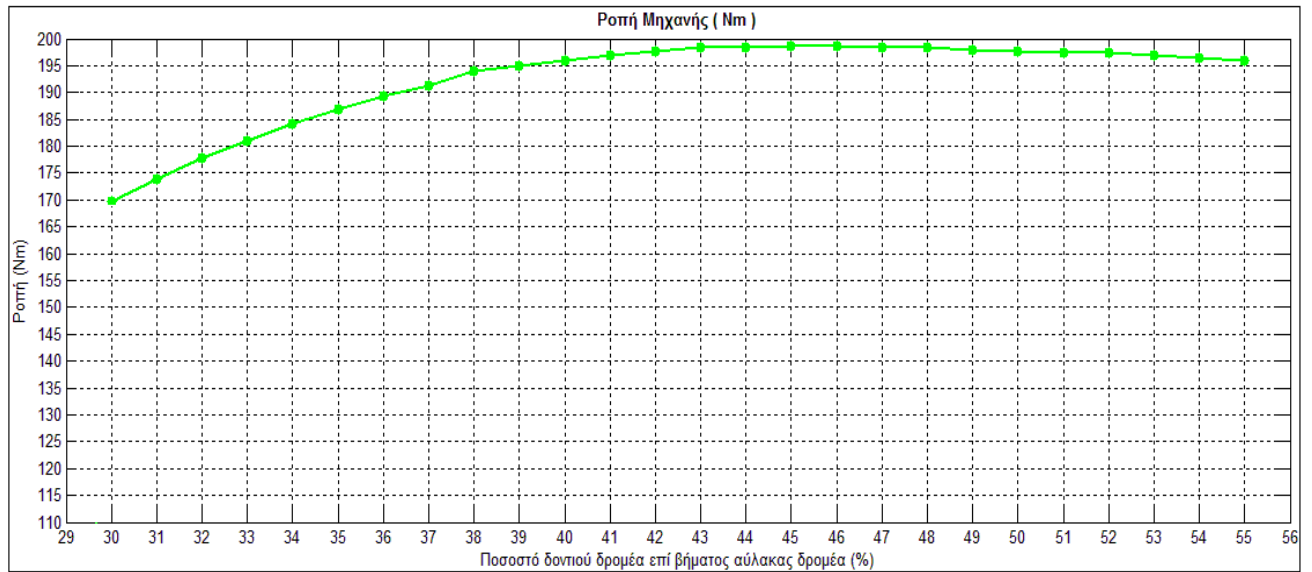
Σχήμα 4.17: Μέτρο μαγνητικής επαγωγής **(α)** και πυκνότητα ρεύματος **(β)** , μετά τη μεταβολή του Q_r

Πλάτος δοντιών δρομέα

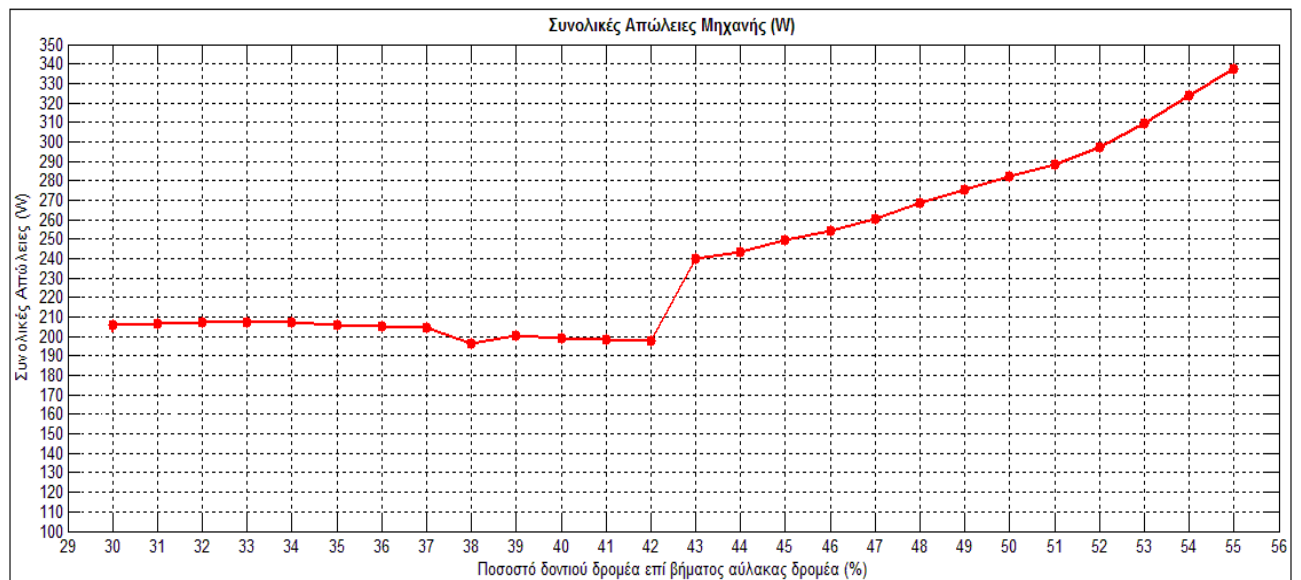
Επόμενη μεταβολή στη γεωμετρία είναι η αύξηση του πλάτους των δοντιών του δρομέα. Για την απόφαση αυτή συμβάλλουν δύο λόγοι. Αφενός η ροή στα δόντια είναι πολύ έντονη και αφετέρου η πυκνότητα ροής ρεύματος στα αυλάκια έχει περιθώριο αύξησης.

Αυξάνεται το πλάτος του δοντιού του δρομέα b_{tr} ως ποσοστό του βήματος αύλακος δρομέα τ_r . Το πλάτος δοντιού δρομέα μεταβάλλεται από 30% έως 55%.

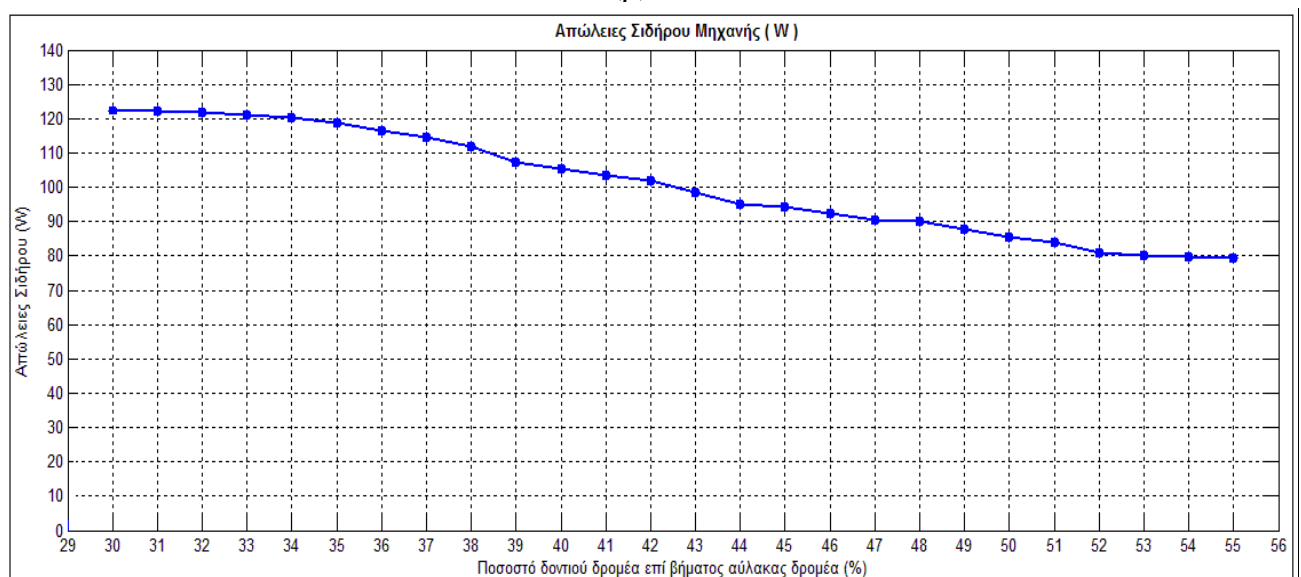
Τα αποτελέσματα της διερεύνησης παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.

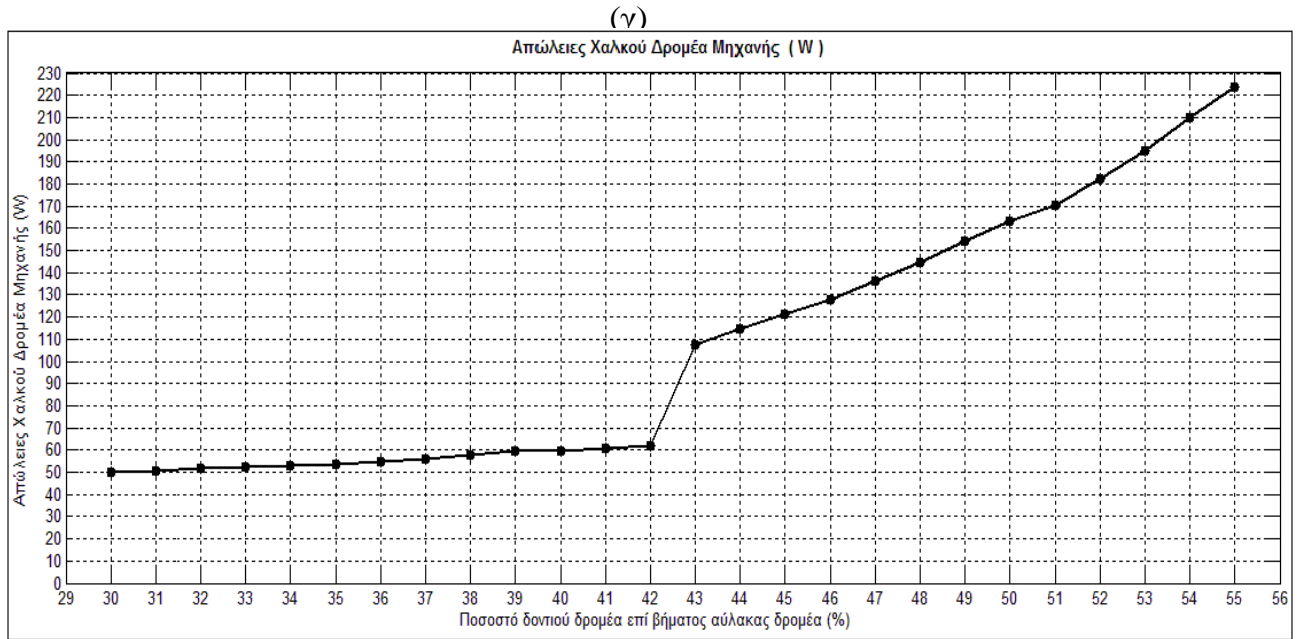


(α)



(β)



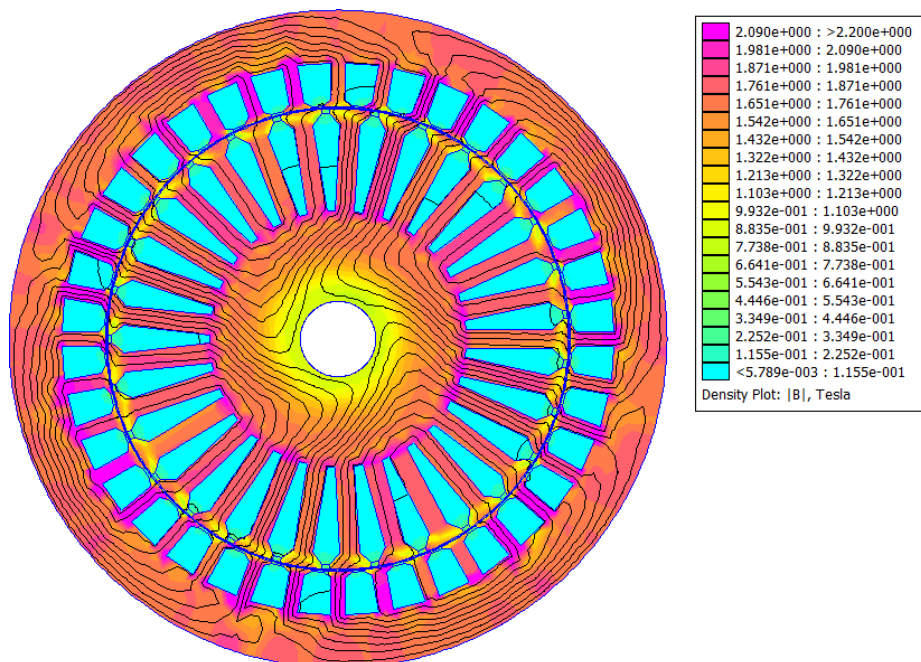


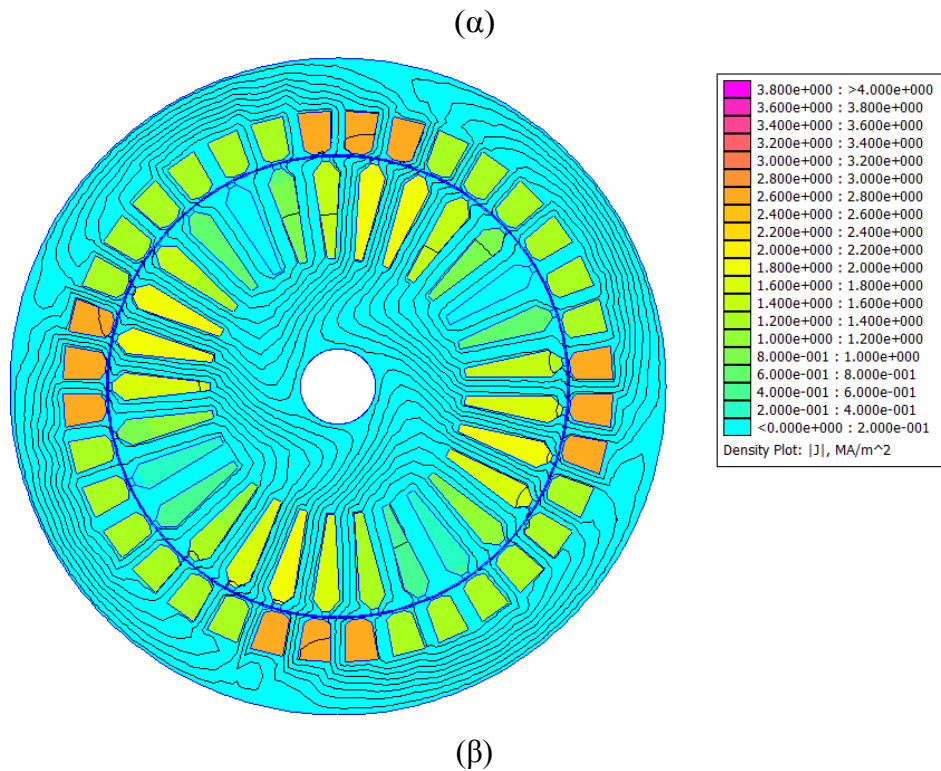
(δ)

Σχήμα 4.18 : Πλάτος δοντιών δρομέα και **(α)** ροπή, **(β)** συνολικές απώλειες, **(γ)** απώλειες σιδήρου, και **(δ)** απώλειες χαλκού δρομέα

Κατά την προκαταρκτική σχεδίαση είχε επιλεγθεί πλάτος δοντιών ίσο με το 35% του βήματος αύλακας (10.55mm), ενώ πλέον επιλέγεται πλάτος δοντιού ίσο με **42% του βήματος αύλακας** (11.4mm).

Όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα η ροπή αυξάνεται σημαντικά, ενώ οι απώλειες της μηχανής μειώνονται, καθώς περιορίζεται η φόρτιση των δοντιών του δρομέα. Επίσης, η φόρτιση του χαλκού του δρομέα παραμένει εντός των ορίων, όπως φαίνεται παρακάτω.





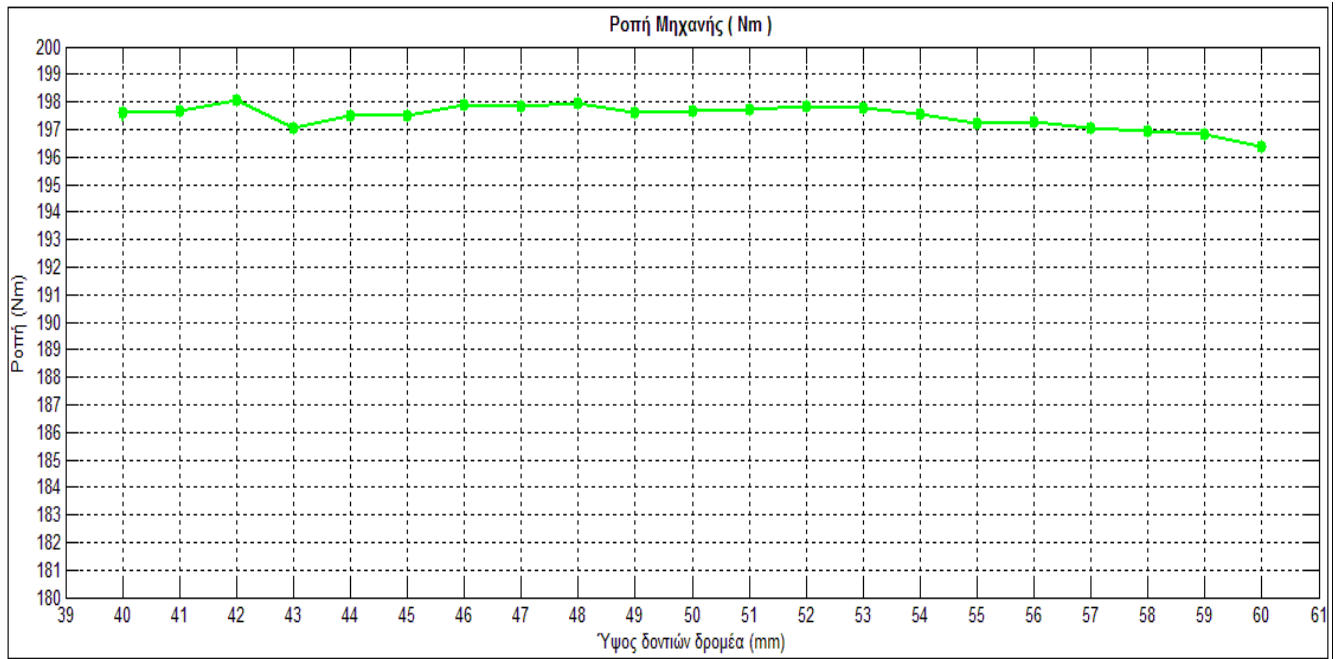
Σχήμα 4.19: Μέτρο μαγνητικής επαγωγής **(α)** και πυκνότητα ρεύματος **(β)** , μετά τη μεταβολή του b_{tr}

Ύψος δοντιών δρομέα

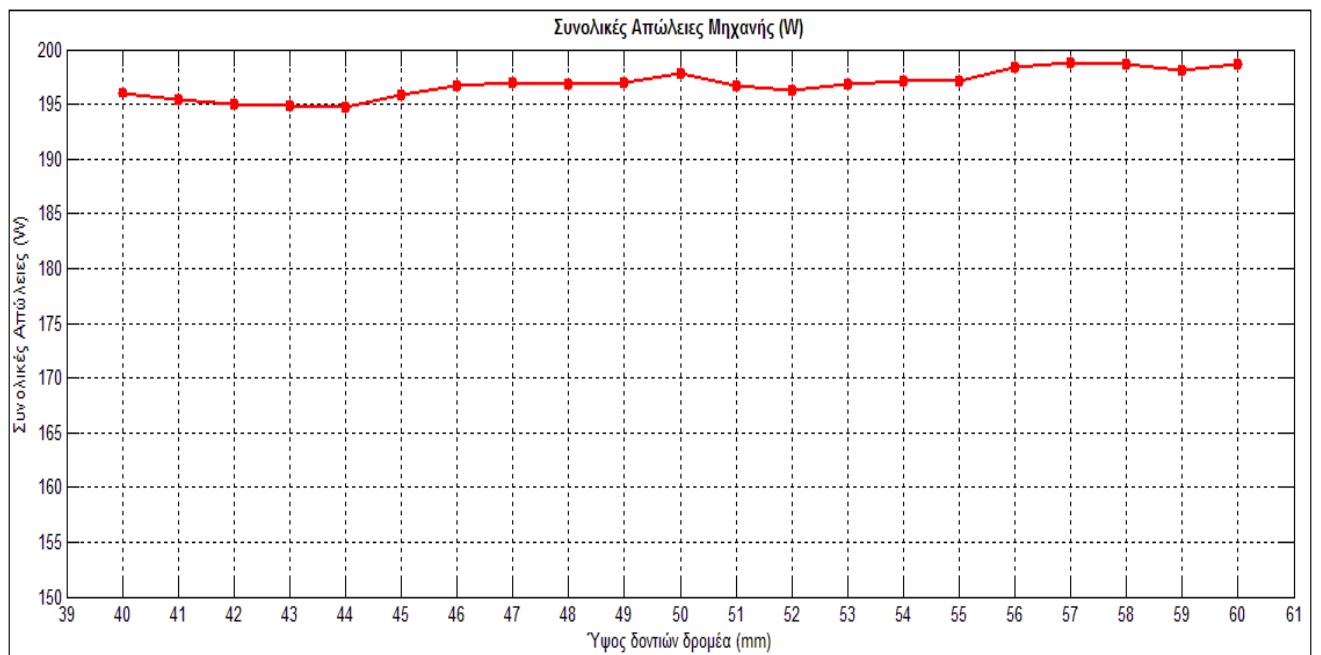
Στο στάδιο αυτό αυξάνεται το ύψος του δοντιού του δρομέα h_r . Είναι πολύ σημαντικό το ύψος των δοντιών να παραμείνει σχετικά μεγάλο, ώστε να εκμεταλλευτούμε τα πλεονεκτήματα της κατασκευαστικής κλάσης B, όπως αυτά αναφέρθηκαν στην παράγραφο 1.4.3. Επίσης, χρειάζεται μεγάλη προσοχή στη φόρτιση του χαλκού του δρομέα, ώστε να παραμείνει εντός το οριών που έχουν οριστεί.

Για το λόγο αυτό επιλέγονται τιμές από 40mm έως 60mm με βήμα 1mm.

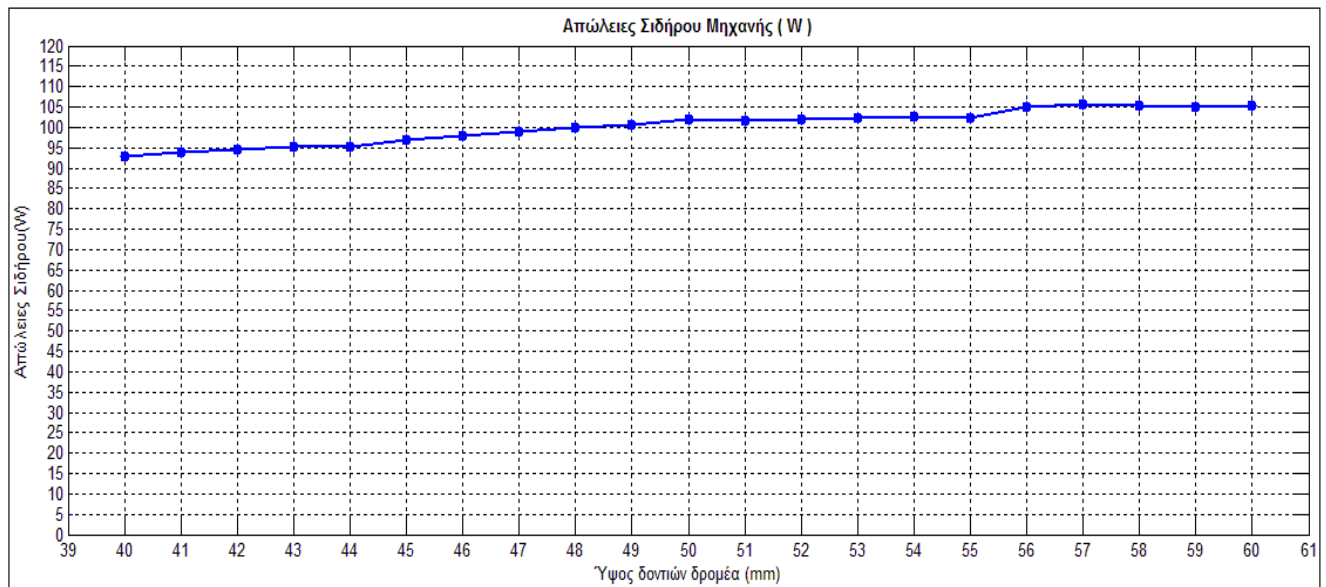
Τα αποτελέσματα της διερεύνησης παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



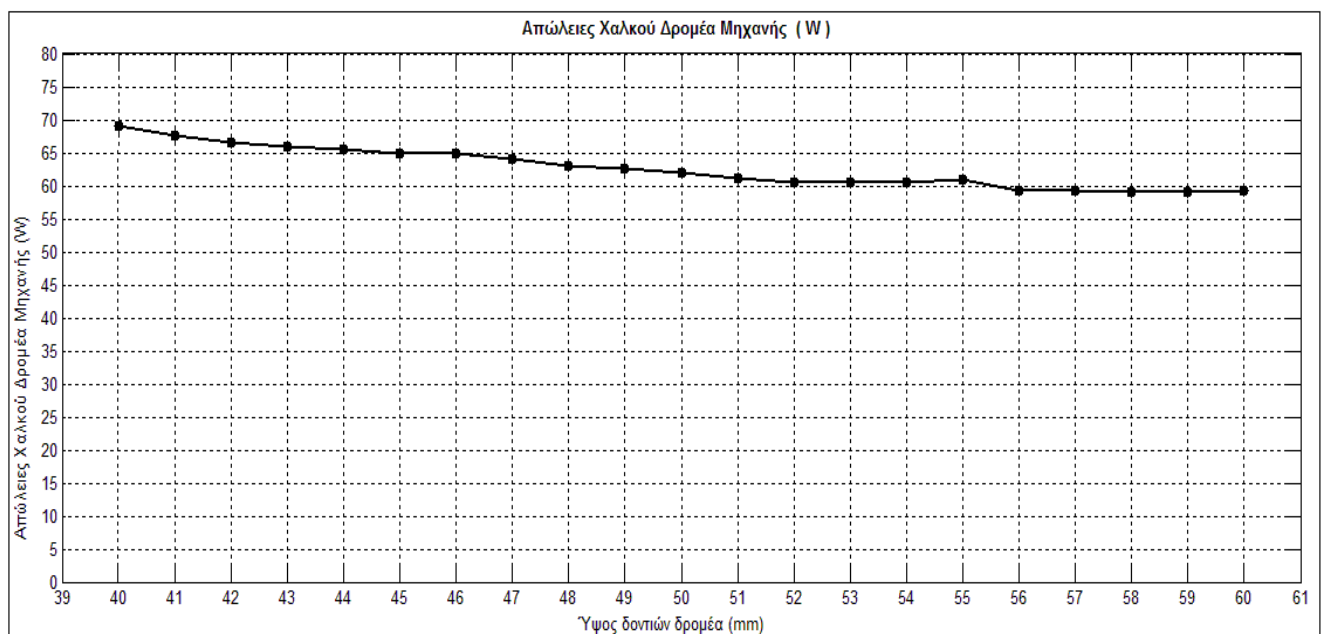
(α)



(β)



(γ)



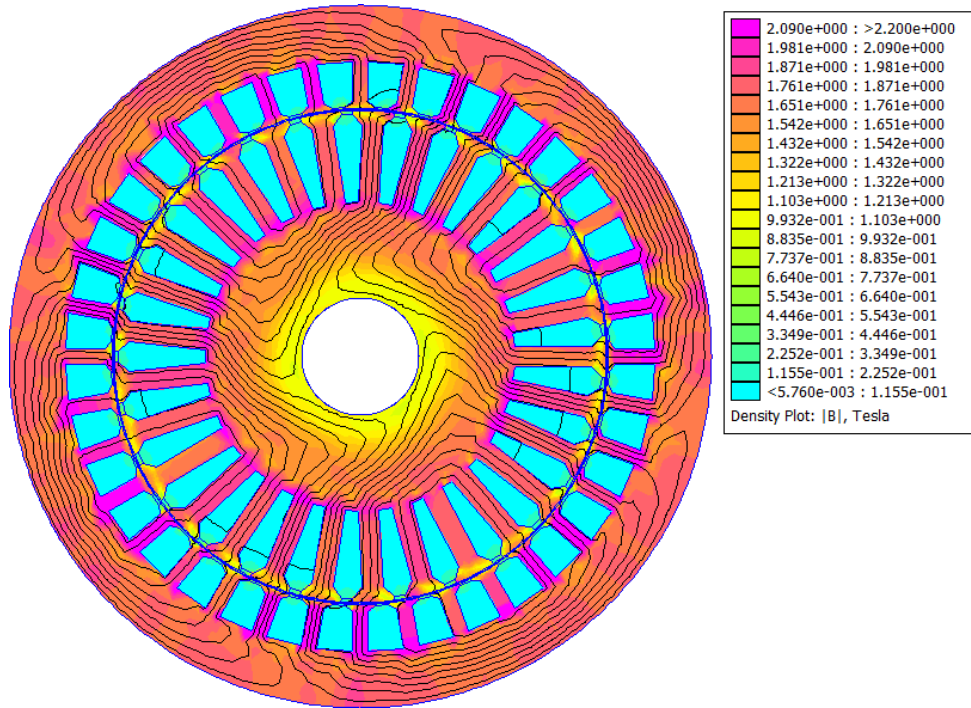
(δ)

Σχήμα 4.20 : Υψος δοντιών δρομέα και **(α)** ροπή, **(β)** συνολικές απώλειες, **(γ)** απώλειες σιδήρου, και **(δ)** απώλειες χαλκού δρομέα

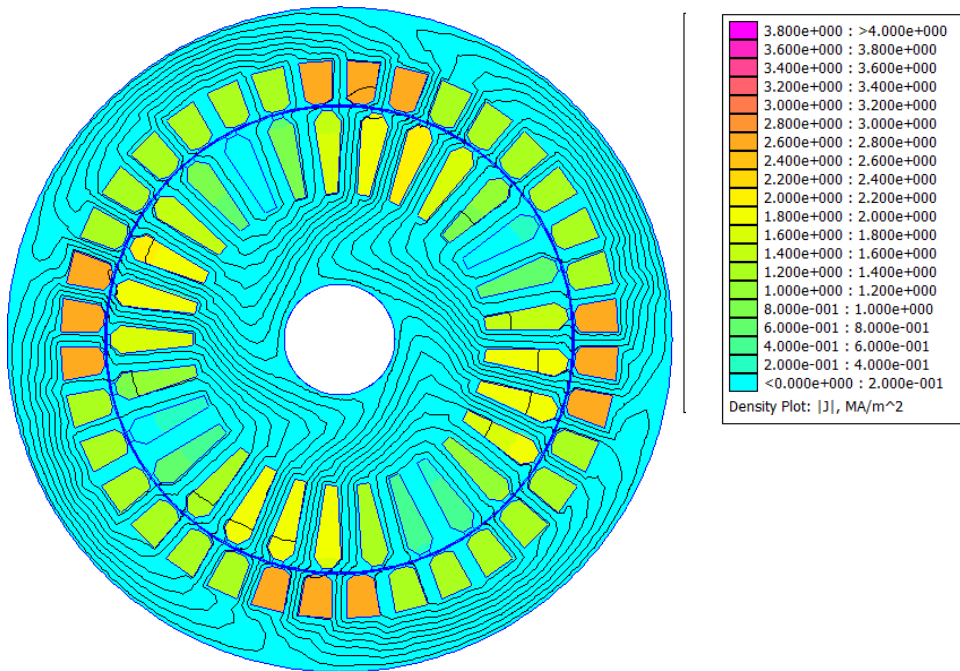
Παρατηρείται σχετικά μικρή επίπτωση τόσο στη ροπή όσο και στις απώλειες της μηχανής και παράλληλα μικρή αύξηση των απωλειών χαλκού δρομέα για μικρότερα ύψη, καθώς το μέγεθος της αύλακας μειώνεται αλλά η φόρτιση της αυξάνεται.

Επιλέγεται ύψος δοντιών δρομέα :

$$h_r = 42 \text{ mm}$$



(α)



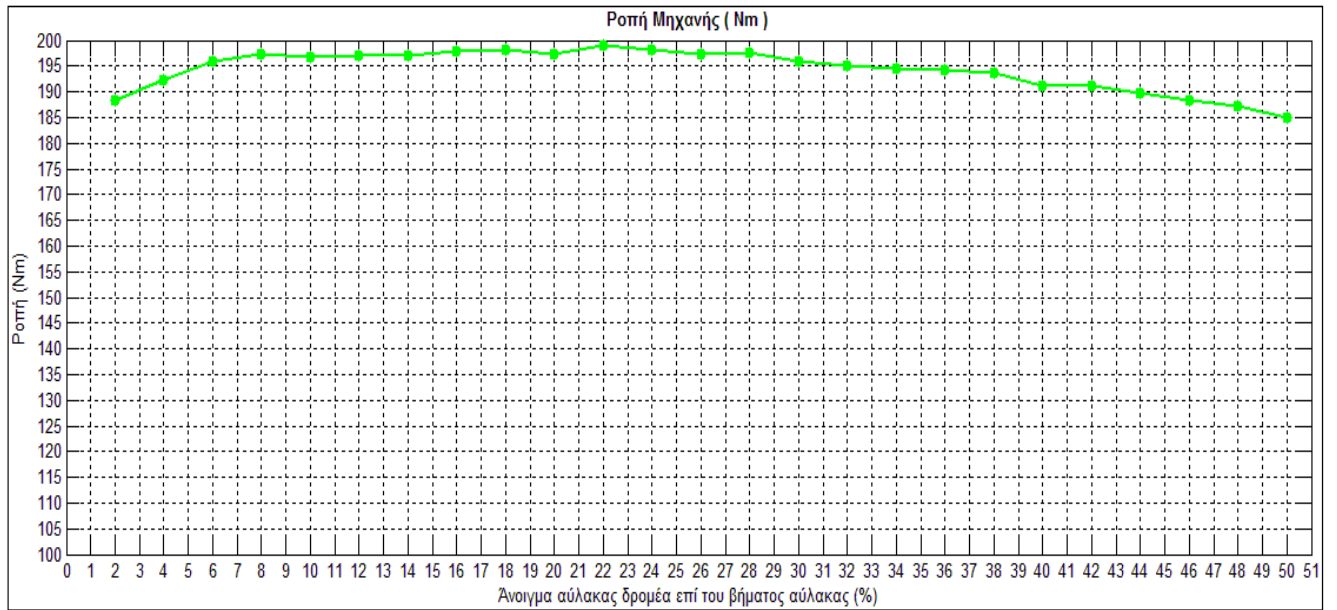
(β)

Σχήμα 4.21: Μέτρο μαγνητικής επαγωγής **(α)** και πυκνότητα ρεύματος **(β)**, μετά τη μεταβολή του h_r

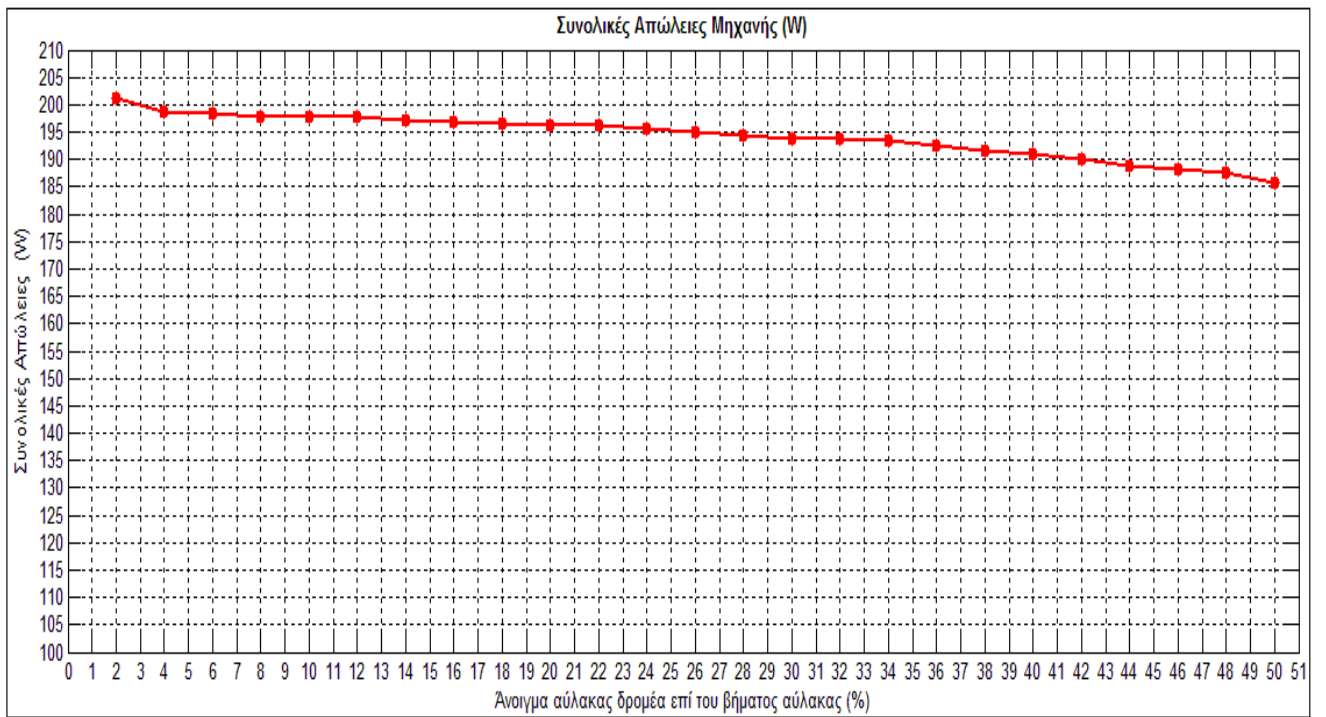
Ανοιγμα άυλακας δρομέα

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η μεταβολή της ροπής και των διάφορων απωλειών με τη μεταβολή του ανοίγματος της άυλακας του δρομέα.

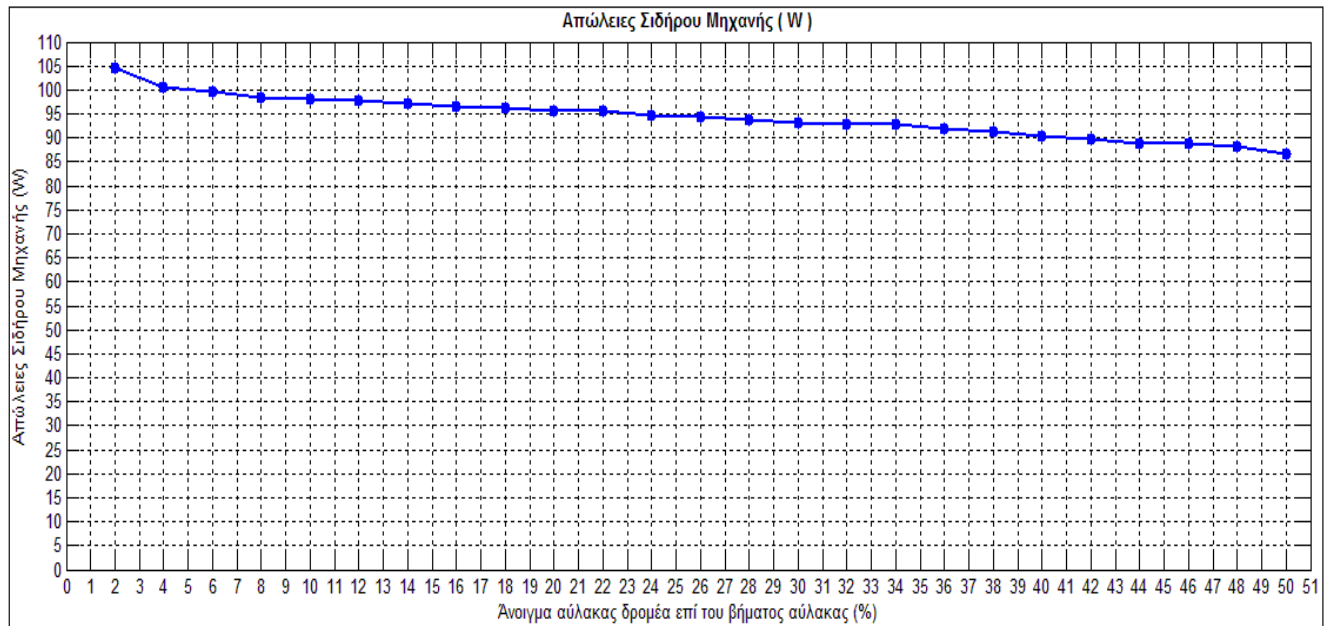
Η μεταβολή της παραμέτρου αυτής έγινε ως ποσοστό του βήματος άυλακας, από 2% έως 50%, με βήμα 2%.



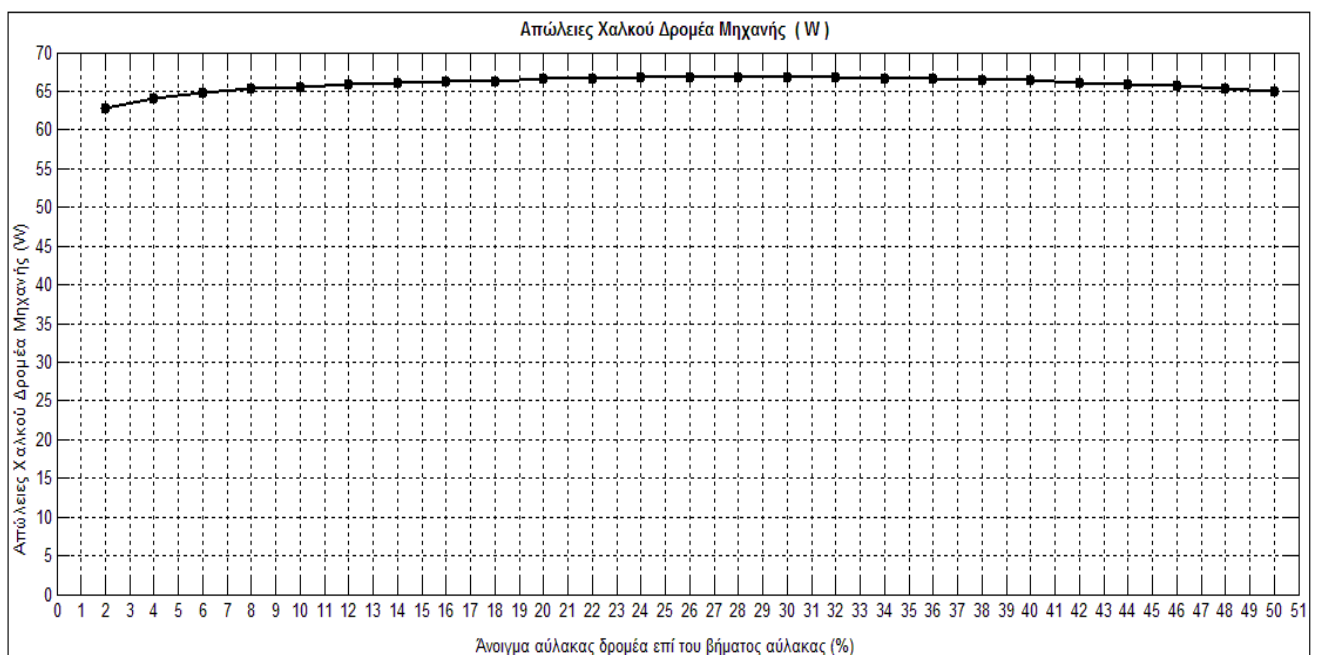
(α)



(β)



(γ)



(δ)

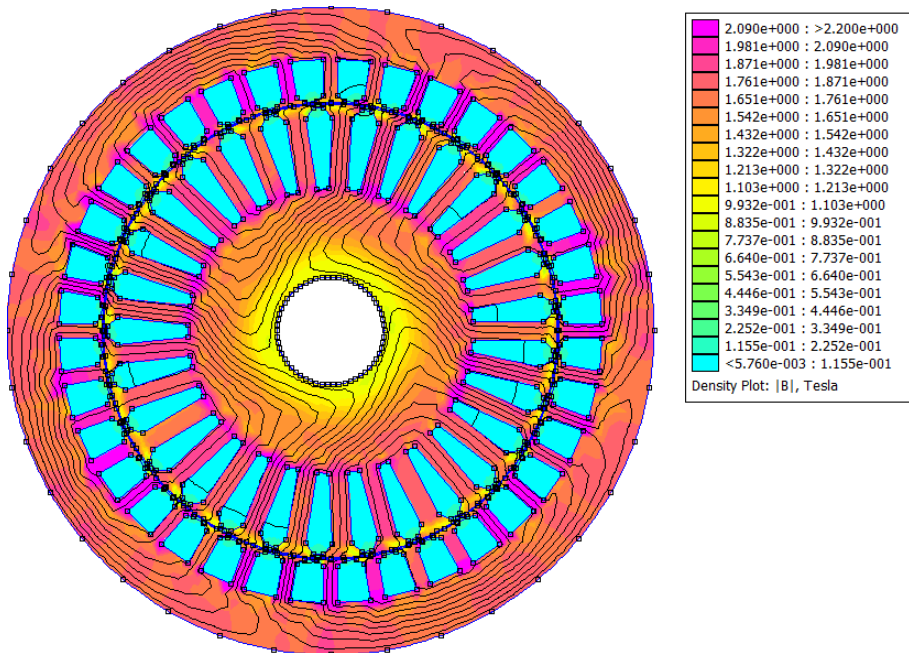
Σχήμα 4. 22: Άνοιγμα αύλακας δρομέα και **(α)** ροπή, **(β)** συνολικές απώλειες, **(γ)** απώλειες σιδήρου, και **(δ)** απώλειες χαλκού δρομέα

Πρέπει να σημειωθεί πως η μεταβολή της ροπής σε σχέση με το μέγεθος του ανοίγματος αύλακας δεν είναι σταθερή, αλλά παρουσιάζει ακανόνιστες αυξομειώσεις. Αυτό συμβαίνει διότι το υπό εξέταση μέγεθος επηρεάζει σημαντικά τις αρμονικές χώρου του πεδίου. Έτσι, κάθε μικρή αλλαγή ενδέχεται να μεταβάλλει αρκετά την παραγόμενη ροπή.

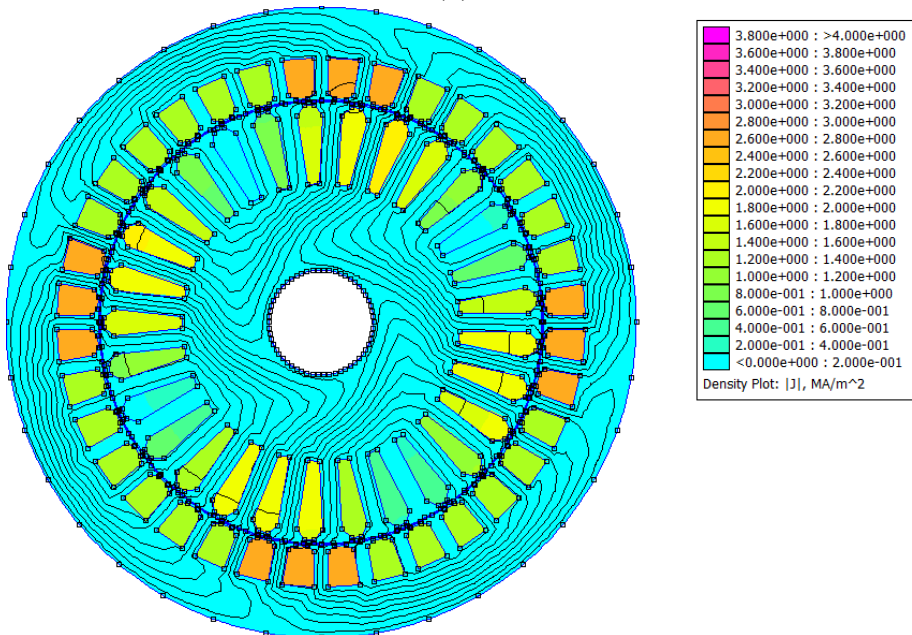
Αρχικά είχε επιλεγεί άνοιγμα αύλακας ίσο με 16% του βήματος αύλακας, ώστε να έχουμε εύλογες σκεδάσεις. Μετά τη συγκεκριμένη διερεύνηση, με στόχο τη μικρή αύξηση της ροπής, επιλέγεται :

$$b_{or} = 0.22 * \tau_r$$

Η πεδιακή ανάλυση της βελτιωμένης γεωμετρίας φαίνεται στο Σχήμα 4.23.



(α)



(β)

Σχήμα 4.23: Μέτρο μαγνητικής επαγωγής (α) και πυκνότητα ρεύματος (β), μετά τη μεταβολή του b_{or}

4.2.2 Ανάλυση ευαισθησίας γεωμετρικών παραμέτρων στάτη

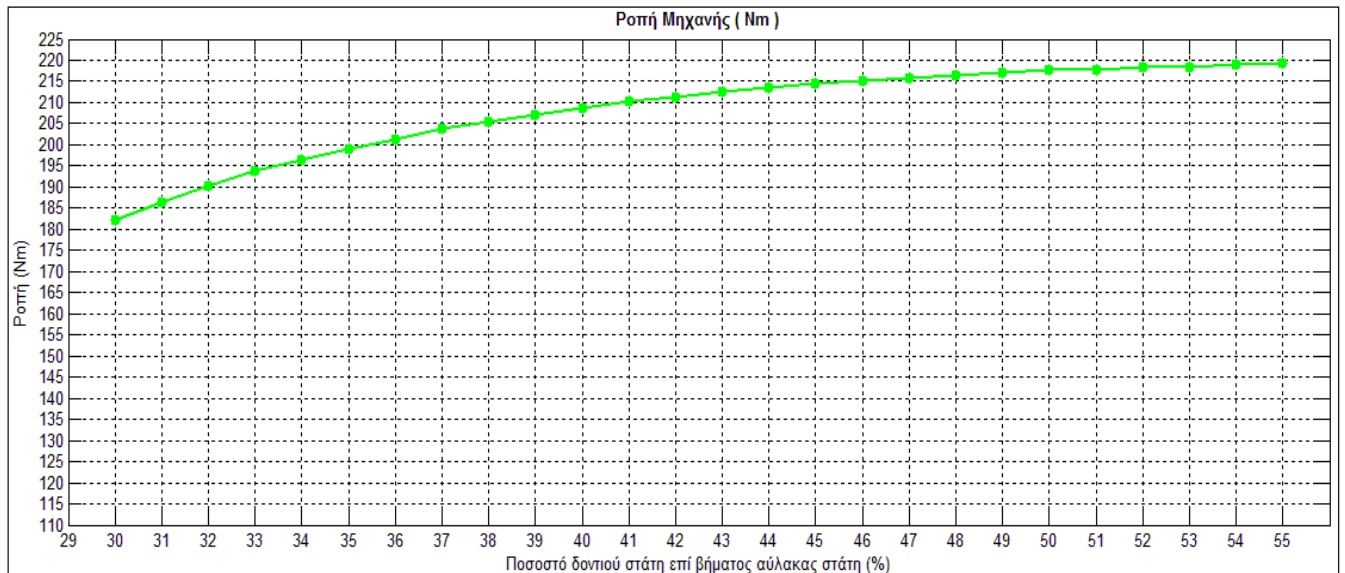
Πλάτος δοντιών στάτη

Όπως και με το δρομέα, έτσι και στο στάτη κρίνεται αναγκαία η αύξηση του πλάτους των δοντιών, καθώς η ροή στα δόντια είναι πολύ έντονη και η πυκνότητα ροής

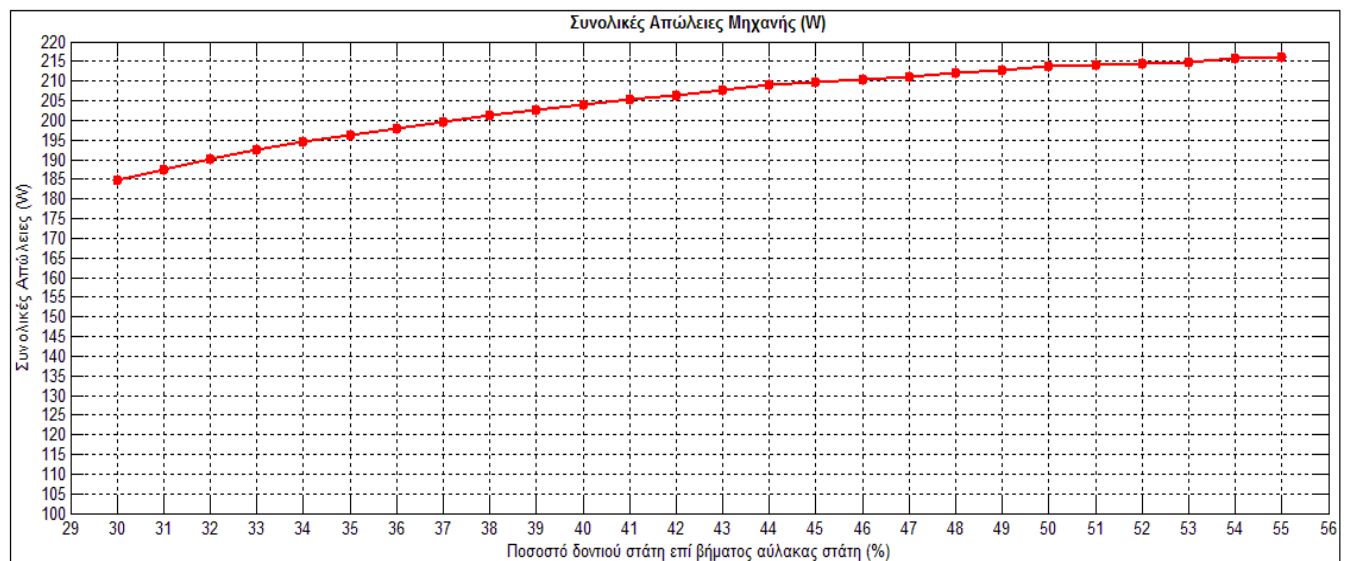
ρεύματος στα αυλάκια έχει περιθώριο αύξησης.

Αυξάνεται λοιπόν το πλάτος του δοντιού του στάτη b_{ts} ως ποσοστό του βήματος αυλάκος στάτη t_s . Το πλάτος δοντιού στάτη μεταβάλλεται από 30% έως 55%.

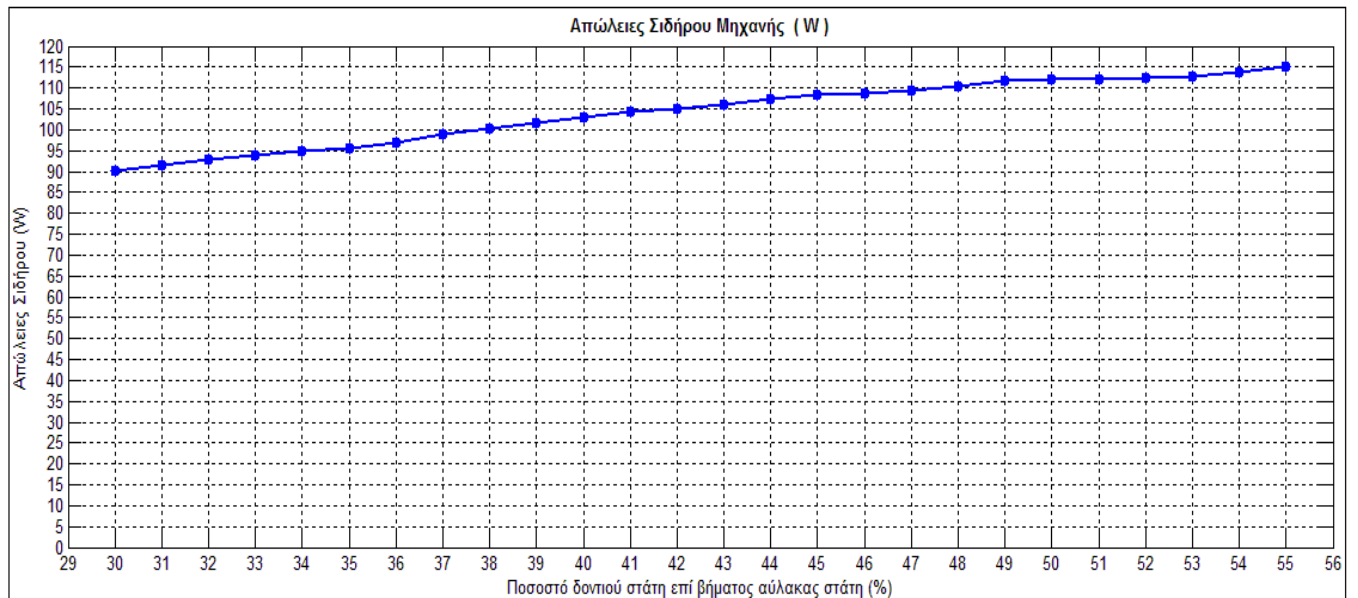
Τα αποτελέσματα της διερεύνησης παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



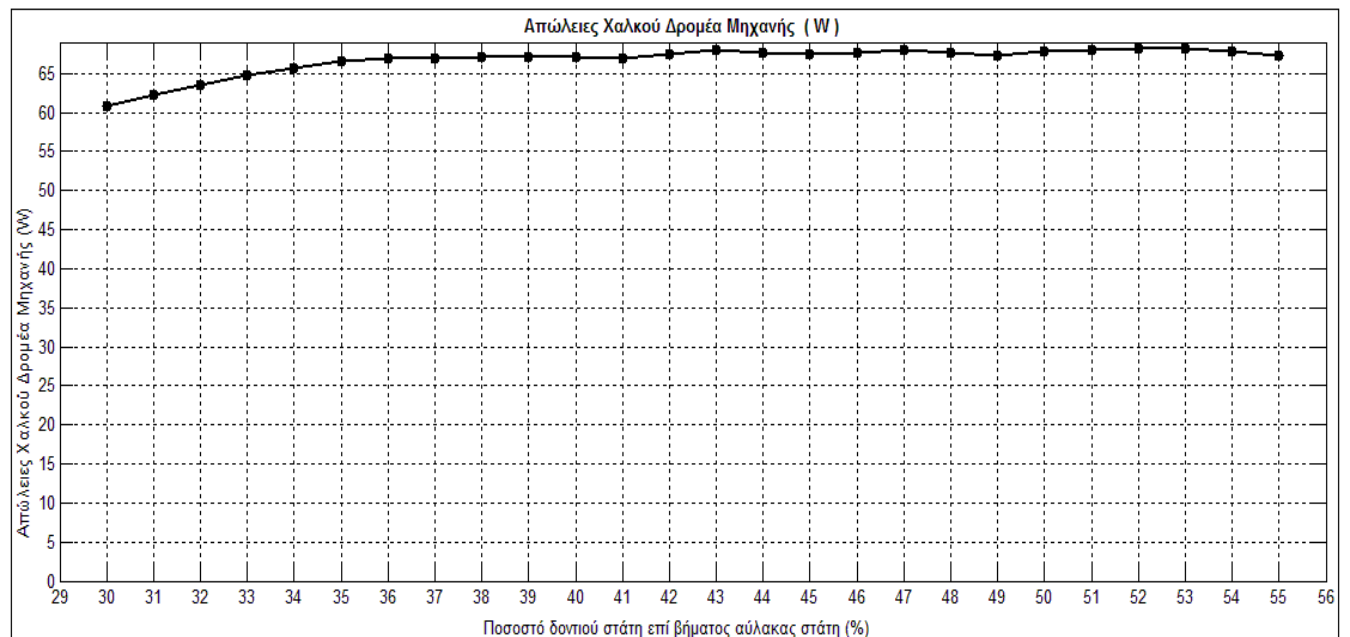
(α)



(β)



(γ)



(δ)

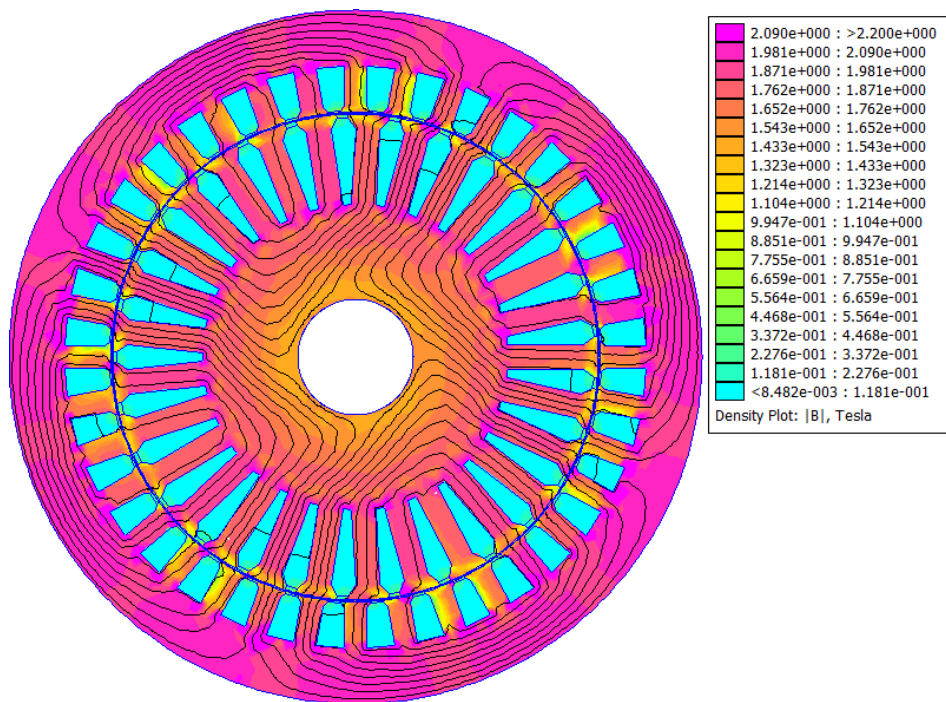
Σχήμα 4.24 : Πλάτος δοντιών στάτη και (α) ροπή, (β) συνολικές απώλειες, (γ) απώλειες σιδήρου, και (δ) απώλειες χαλκού δρομέα

Παρατηρείται πως για ποσοστό δοντιού επί του βήματος αύλακας μεγαλύτερο από 54% η πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες του στάτη ξεπερνά το όριο των 4 A/mm², που έχει τεθεί ως περιορισμός της σχεδίασης.

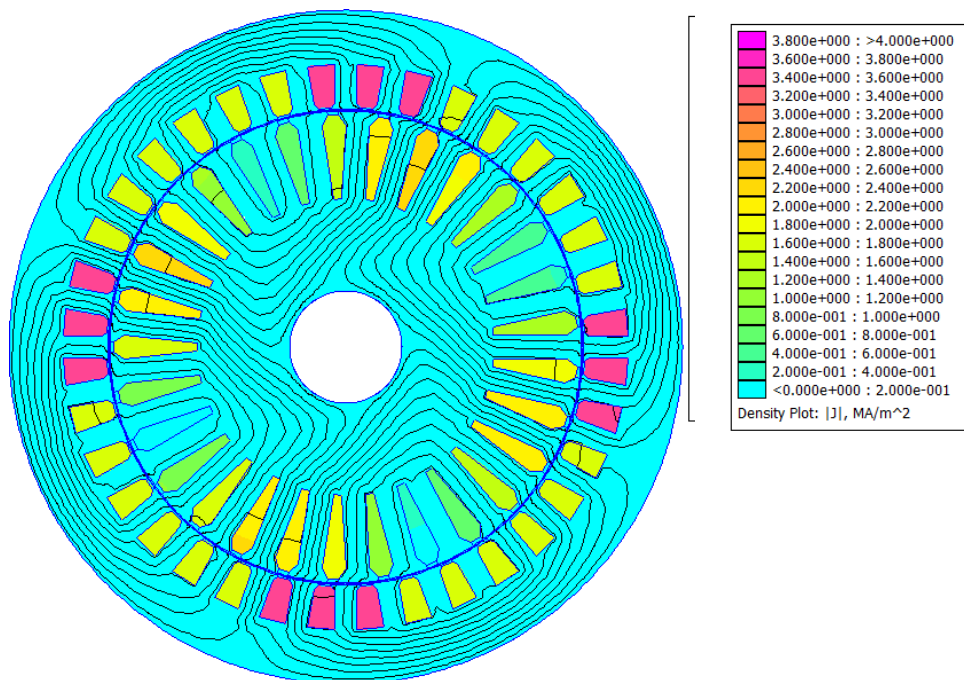
Όπως και με τα δόντια του δρομέα, η ροπή αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση του πλάτους. Έτσι, επιλέγεται πλάτος δοντιών στάτη ίσο με 53% επί του βήματος αύλακας στάτη.

$$b_s = 0.53 * \tau_s$$

Επίσης, η φόρτιση του χαλκού του στάτη παραμένει εντός των ορίων, όπως φαίνεται παρακάτω, αλλά πλέον η φόρτιση των δοντιών του δρομέα ανέρχεται στα σχεδιαστικά όρια, οπότε κρίνεται σκόπιμος ο επαναπροσδιορισμός του πάχους τους.



(α)

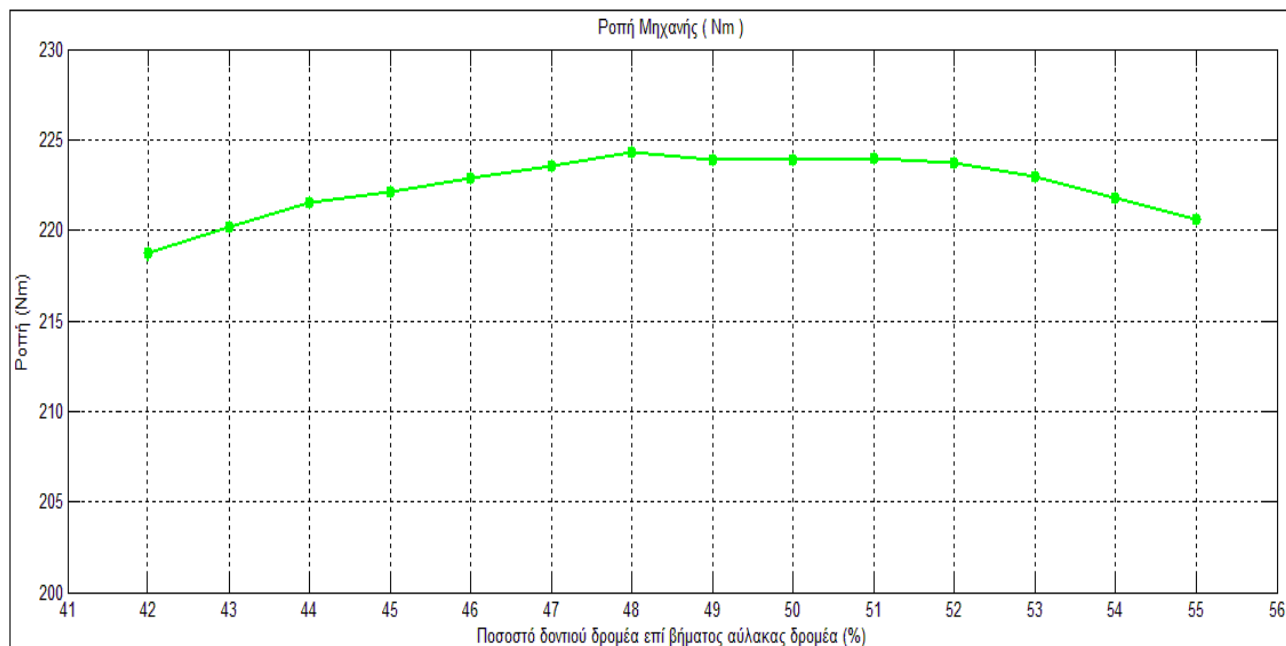


(β)

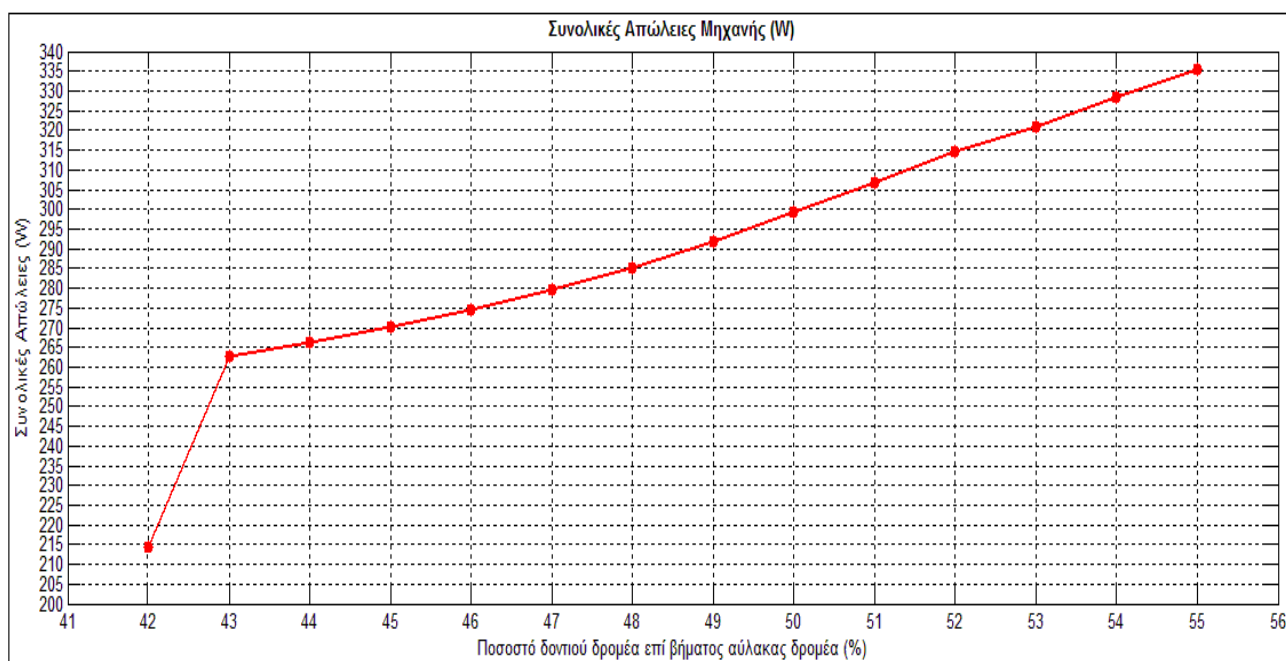
Σχήμα 4.25: Μέτρο μαγνητικής επαγωγής **(α)** και πυκνότητα ρεύματος **(β)**, μετά τη μεταβολή του b_s

Ακολουθεί η εκ νέου διερεύνηση του πλάτους των δοντιών του δρομέα, ώστε η φορτισή τους να είναι και πάλι εντός των σχεδιαστικών ορίων. Αυξάνεται το πλάτος του δοντιού του δρομέα b_{tr} ως ποσοστό του βήματος άλακος δρομέα τ_r , και τώρα μεταβάλλεται από 42% έως 55%.

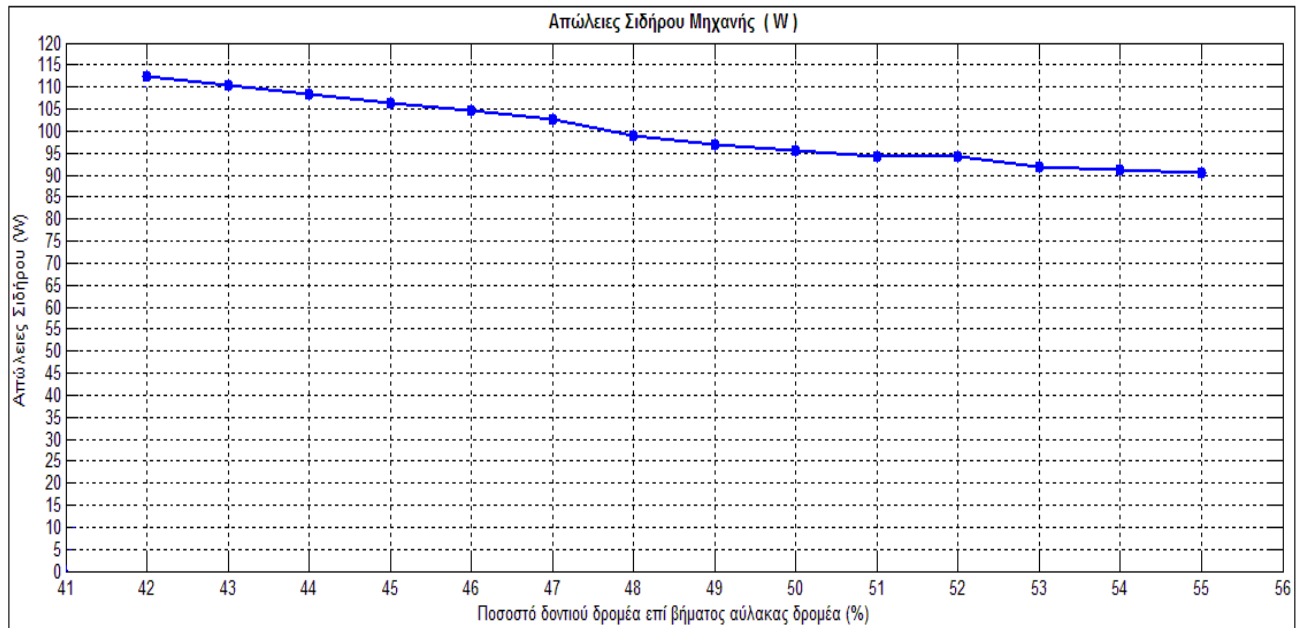
Τα αποτελέσματα της διερεύνησης παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



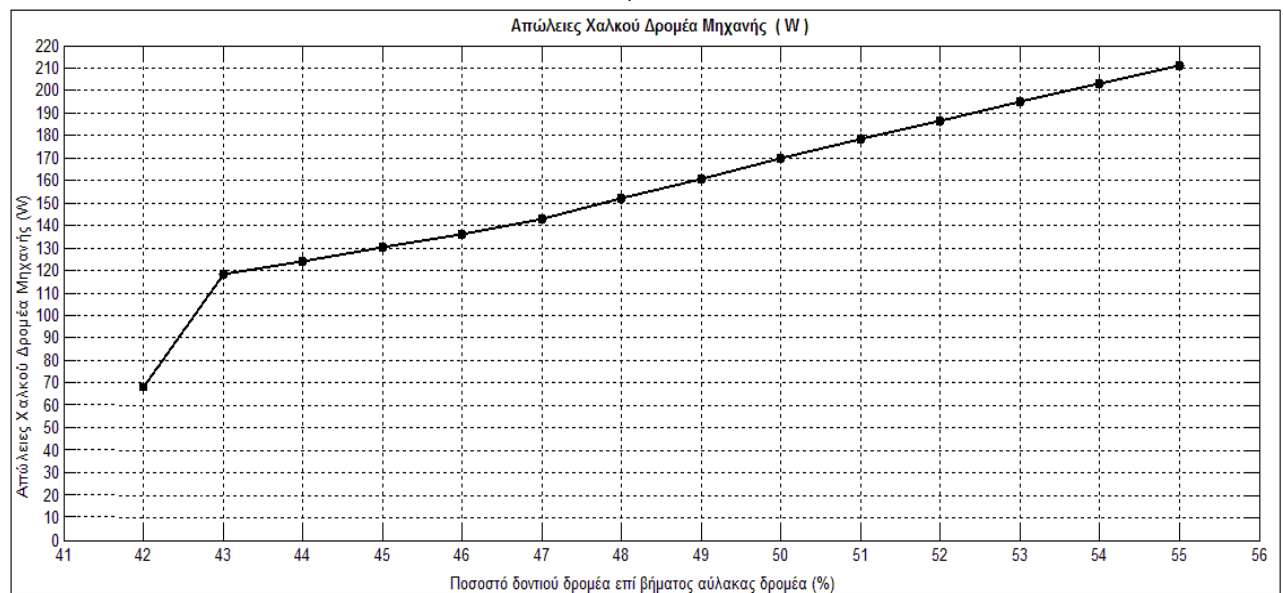
(α)



(β)



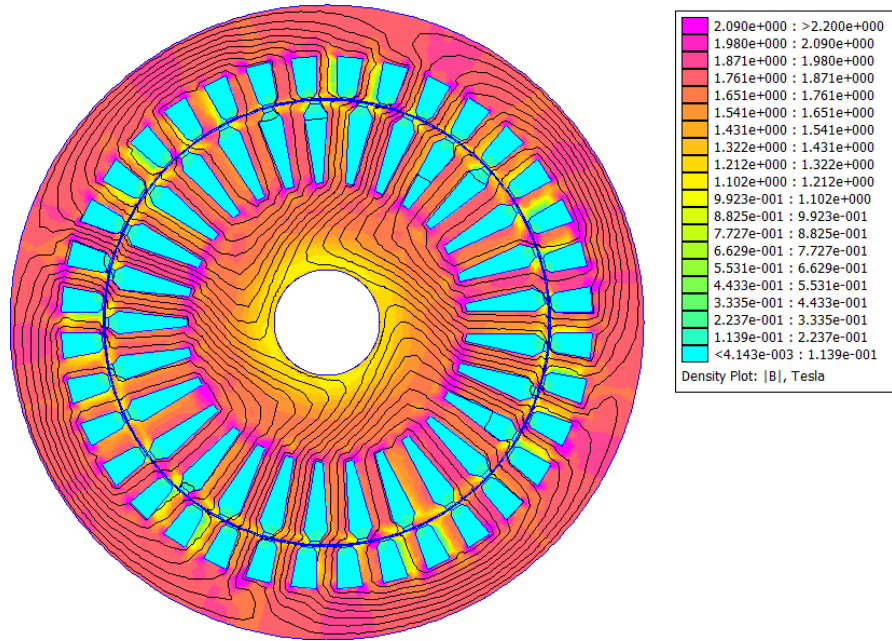
(γ)



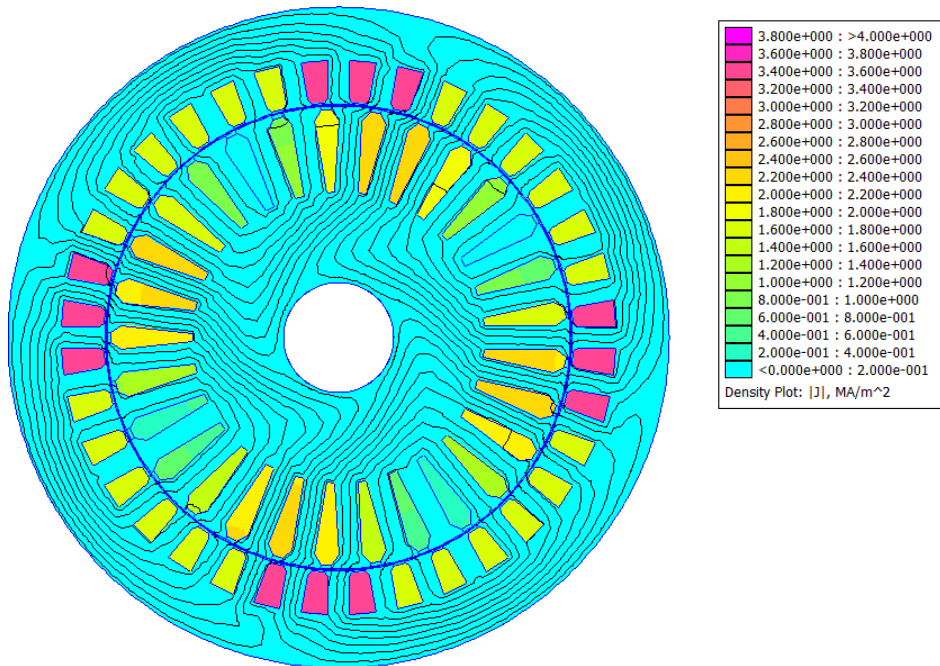
(δ)

Σχήμα 4.26 : Πλάτος δοντιών δρομέα και **(α)** ροπή, **(β)** συνολικές απώλειες, **(γ)** απώλειες σιδήρου, και **(δ)** απώλειες χαλκού δρομέα

Πλέον επιλέγεται πλάτος δοντιού ίσο με **48% του βήματος αύλακας**(13.1 mm) και όπως φαίνεται παρακάτω οι φορτίσεις του δρομέα είναι και πάλι εντός ορίων.



(α)



(β)

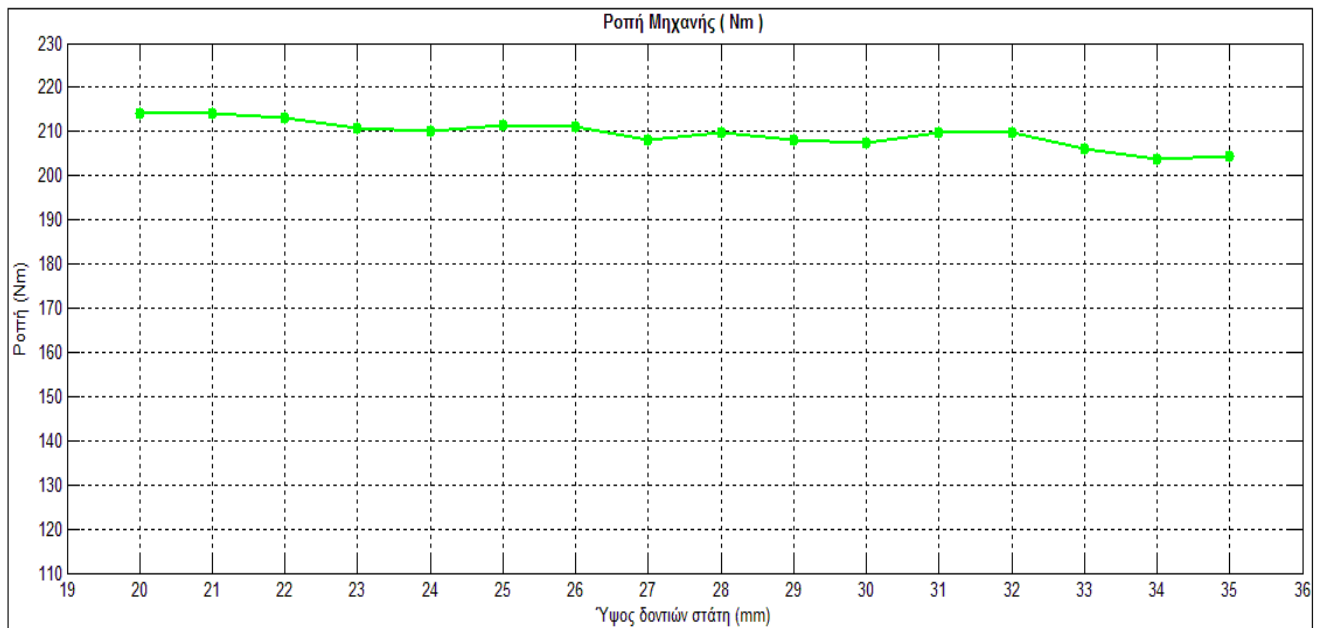
Σχήμα 4.27: Μέτρο μαγνητικής επαγωγής **(α)** και πυκνότητα ρεύματος **(β)**, μετά τη μεταβολή του b_{tr}

Ύψος δοντιών στάτη

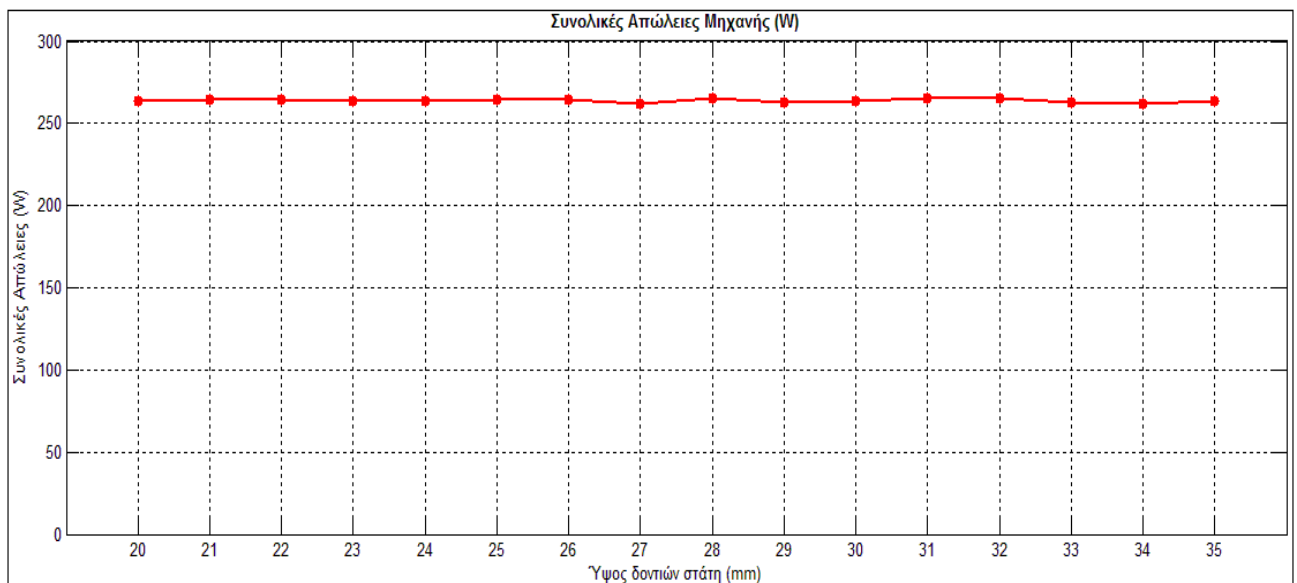
Για τη διερεύνηση του βέλτιστου ύψους στάτη επιλέγονται τιμές από 20mm έως 35mm με βήμα 1mm.

Χρειάζεται μεγάλη προσοχή στη φόρτιση του χαλκού του στάτη, ώστε να παραμείνει εντός το οριών που έχουν οριστεί.

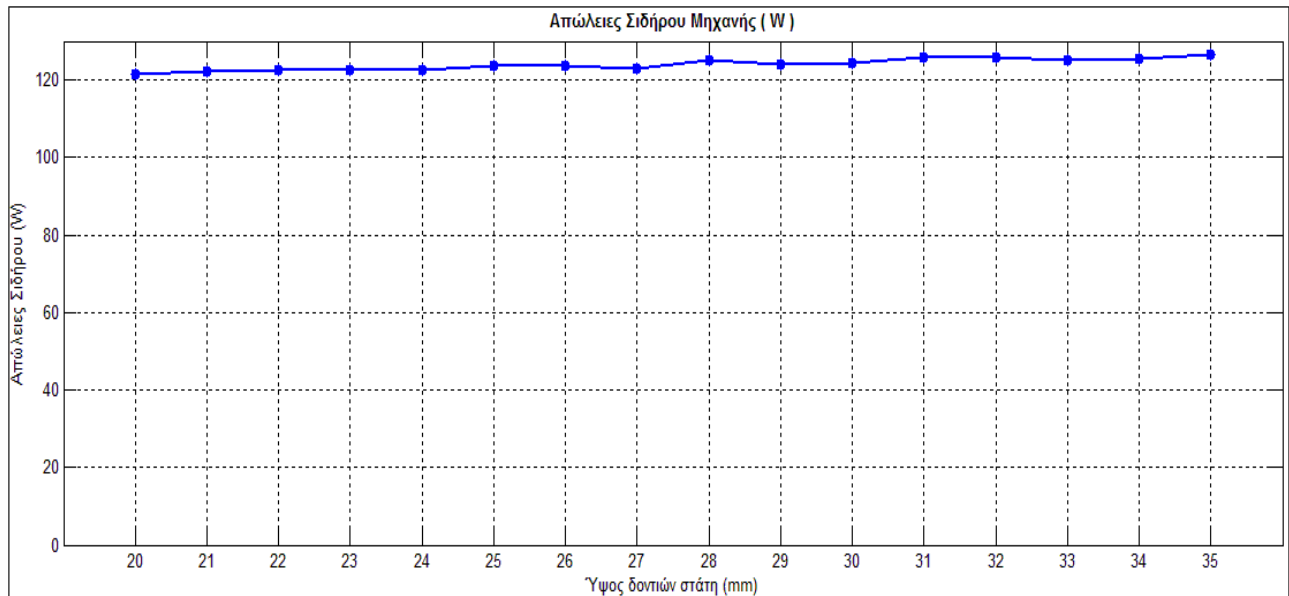
Τα αποτελέσματα της διερεύνησης παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.



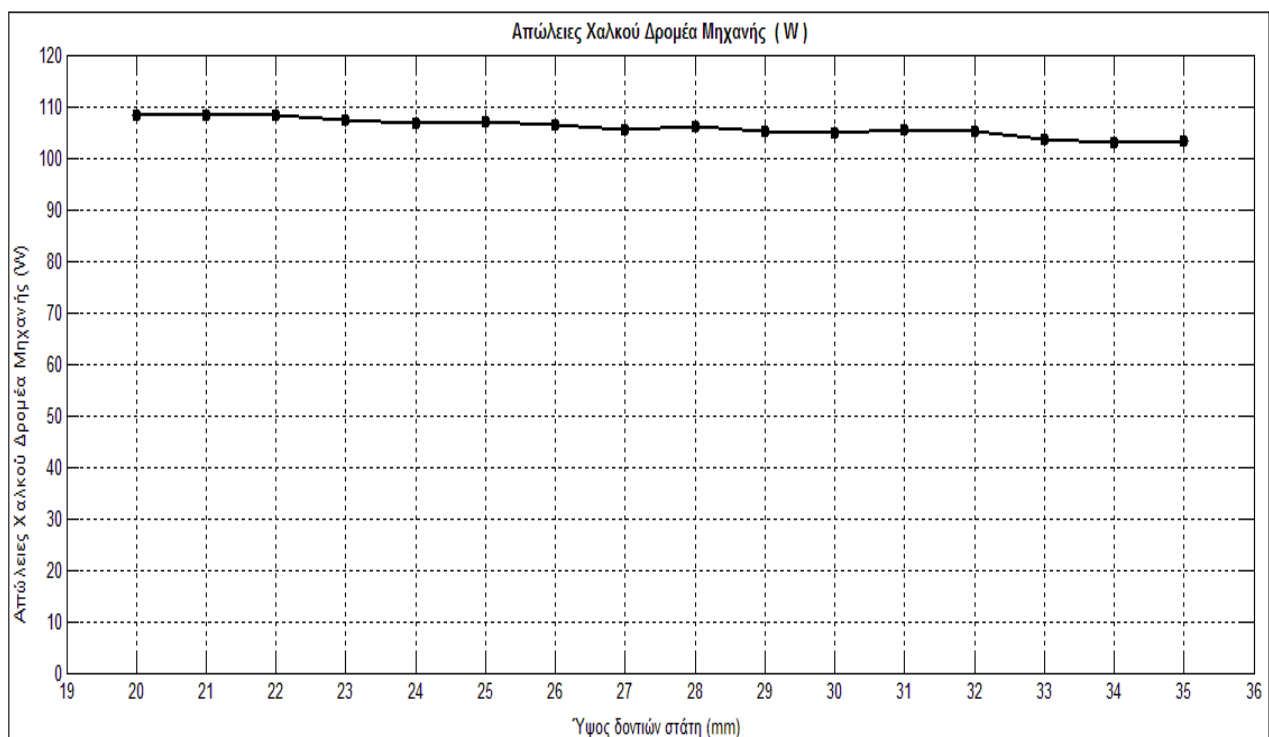
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 4.28 : Ύψος δοντιών στάτη και (α) ροπή, (β) συνολικές απώλειες, (γ) απώλειες σιδήρου, και (δ) απώλειες χαλκού δρομέα

Παρατηρείται πως για ύψος δοντιού μικρότερο από 22mm η πυκνότητα ρεύματος στις αύλακες του στάτη ξεπερνά το όριο των 4 A/mm^2 , που έχει τεθεί ως περιορισμός της σχεδίασης.

Για μεταβολές μεγαλύτερες από 22mm η ροπή παρουσιάζει μείωση, ενώ οι απώλειες της μηχανής αυξάνονται. Έτσι, το ύψος των δοντιών στάτη επιλέγεται να παραμείνει ίδιο με την αρχική σχεδίαση.

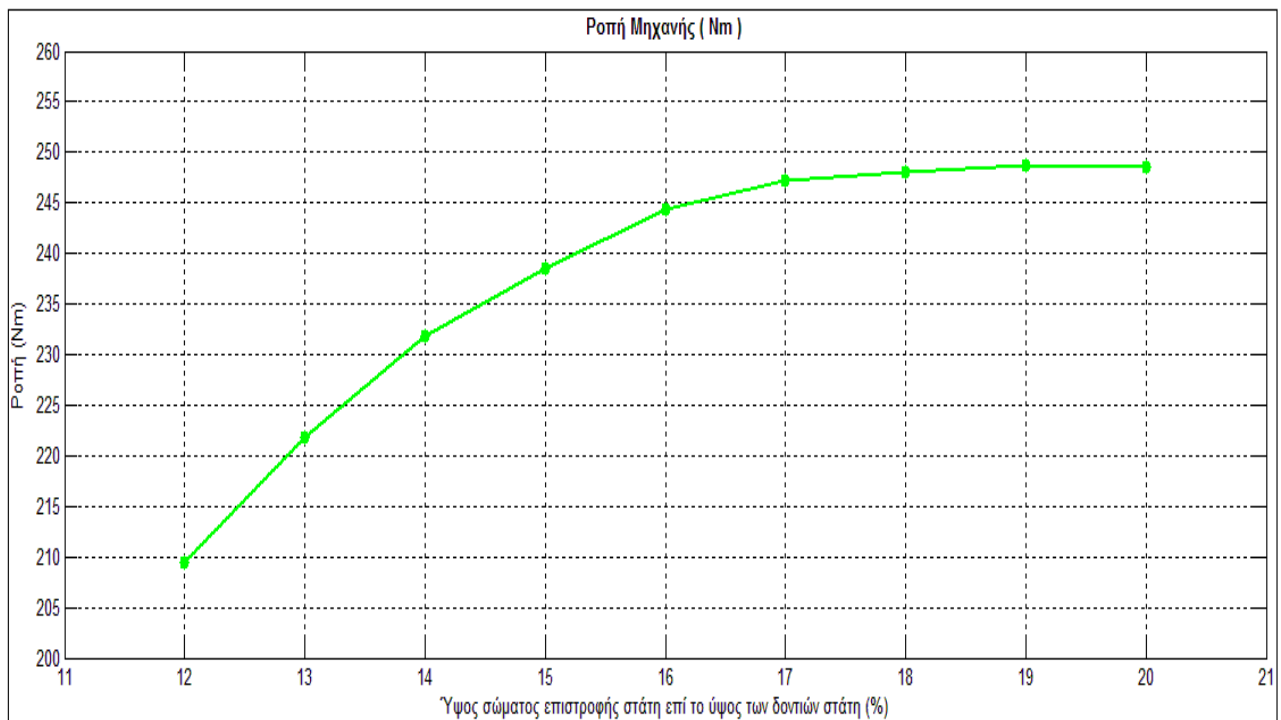
$$h_s = 22 \text{ mm}$$

Έτσι, η εικόνα των φορτίσεων της μηχανής παραμένει ίδια με το σχήμα της προηγούμενης ενότητας.

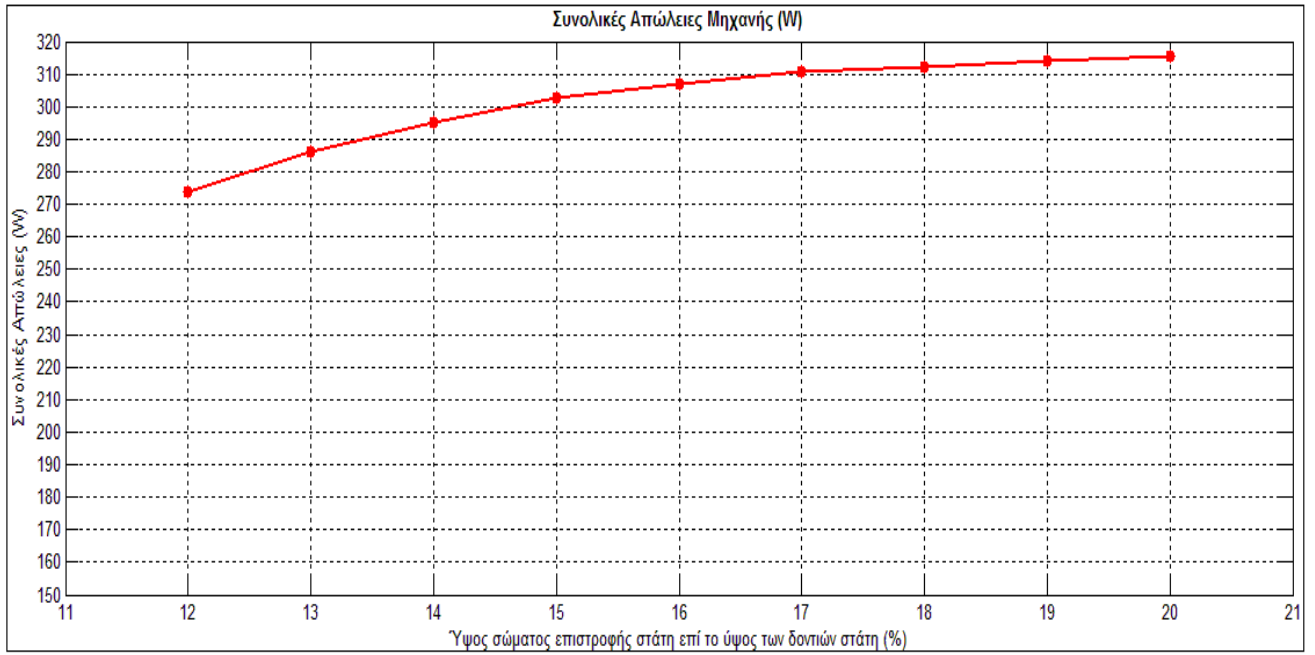
Σώμα επιστροφής στάτη

Καθώς αυξήθηκε το πλάτος των δοντιών του στάτη παρατηρήθηκε ότι πλέον η πυκνότητα μαγνητικής ροής στο σώμα επιστροφής του στάτη (h_{cs}) είναι αρκετά μεγαλύτερη από 1.7 T, που τέθηκε ως σχεδιαστική προδιαγραφή

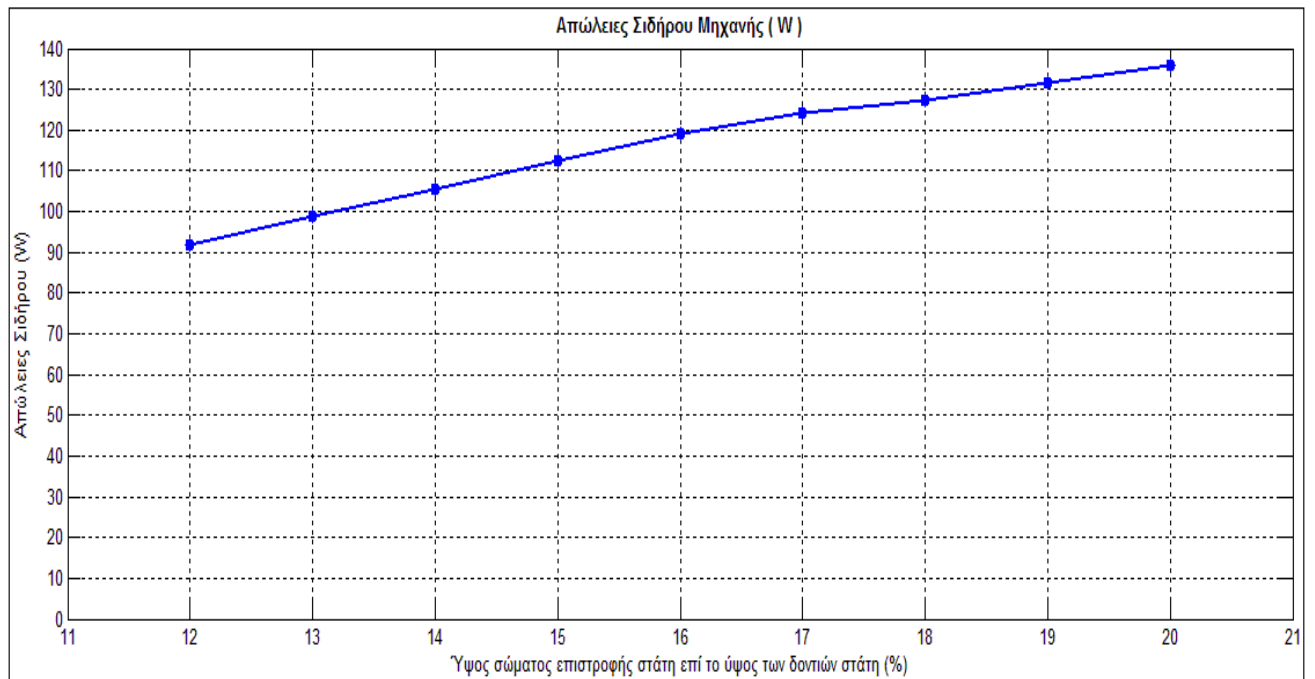
Για το λόγο αυτό μεταβάλλεται το μήκος του σε συνάρτηση με το ύψος των δοντιών του στάτη, από 12 έως 20% του ύψους των δοντιών με βήμα 1%, ώστε να φτάσει στα επιθυμητά επίπεδα η φόρτίσή του και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης παρακάτω.



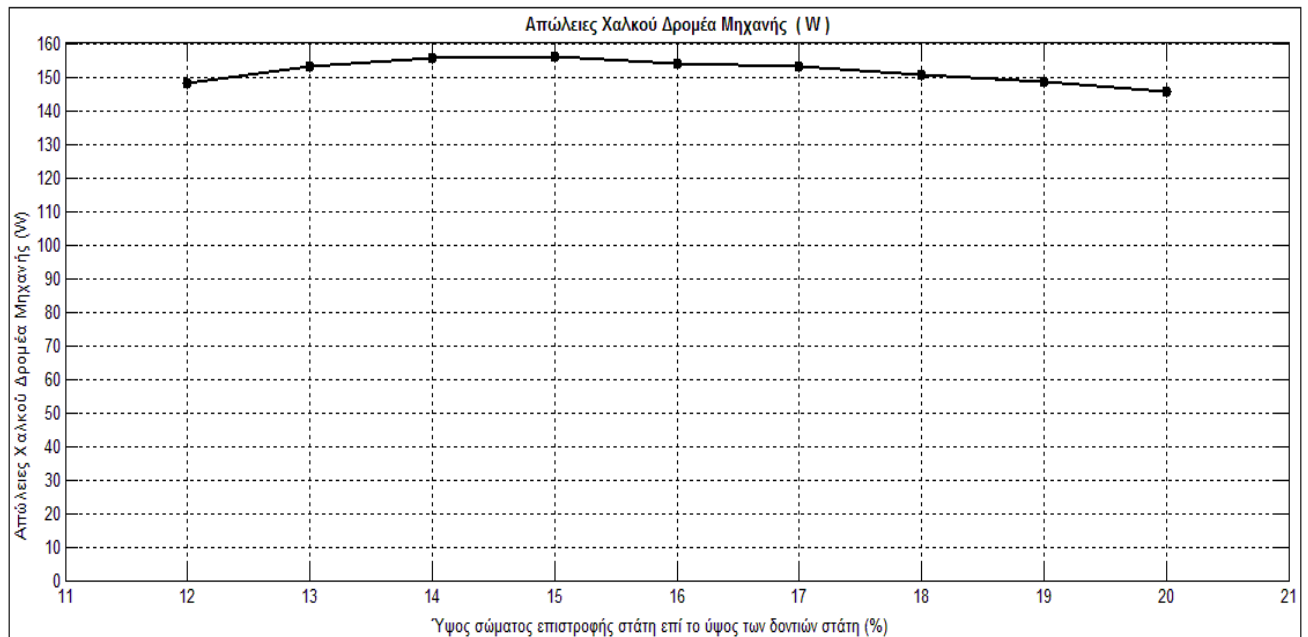
(α)



(β)



(γ)



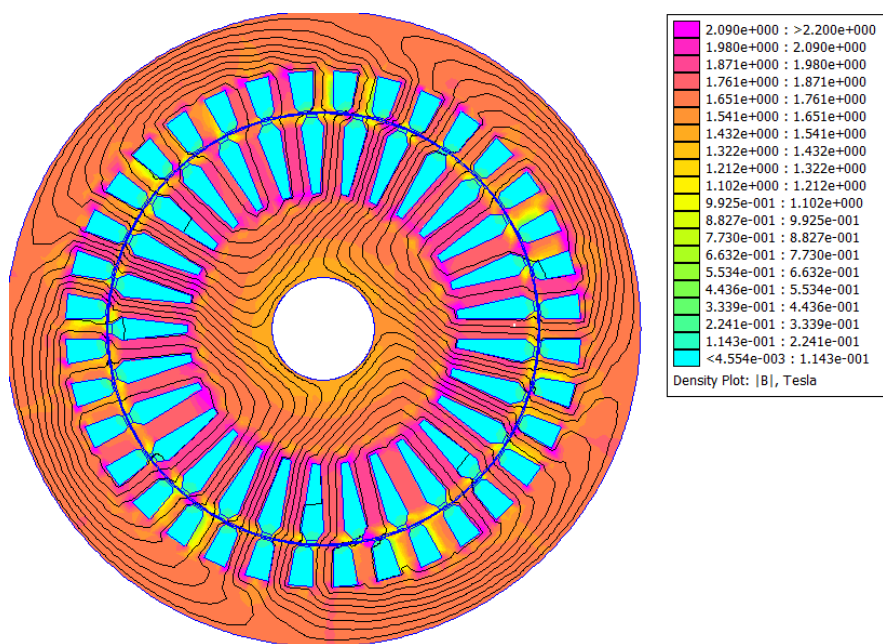
(δ)

Σχήμα 4.29 : Υψος σώματος επιστροφής στάτη και **(α)** ροπή, **(β)** συνολικές απώλειες, **(γ)** απώλειες σιδήρου, και **(δ)** απώλειες χαλκού δρομέα

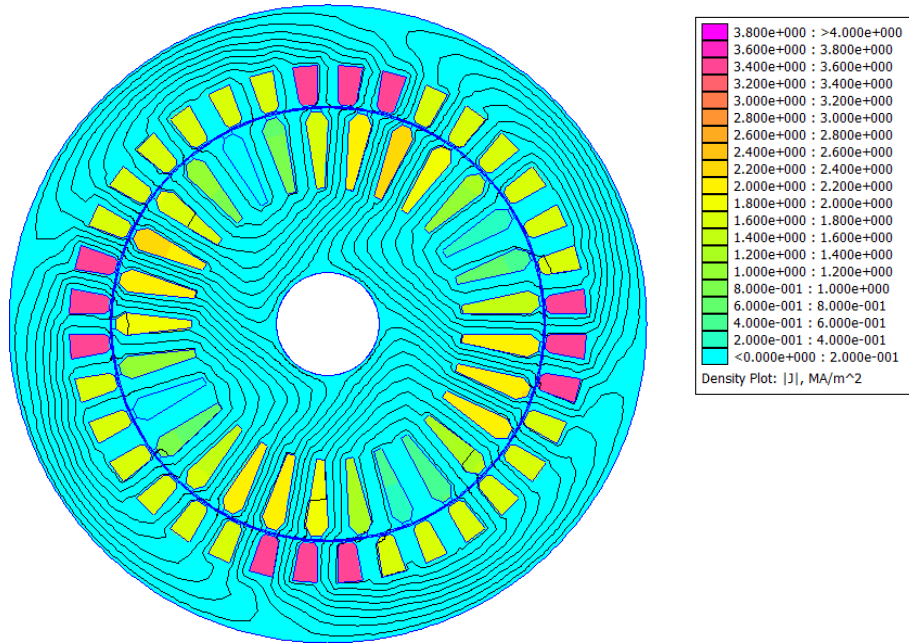
Με βάση τα αποτελέσματα και τις φορτίσεις του σώματος επιστροφης του στάτη επιλέγεται:

$$h_{cs} = 1.7 \cdot h_s \text{ ή } 37\text{mm}$$

Η αρμονική ανάλυση φαίνεται στη συνέχεια:



(α)



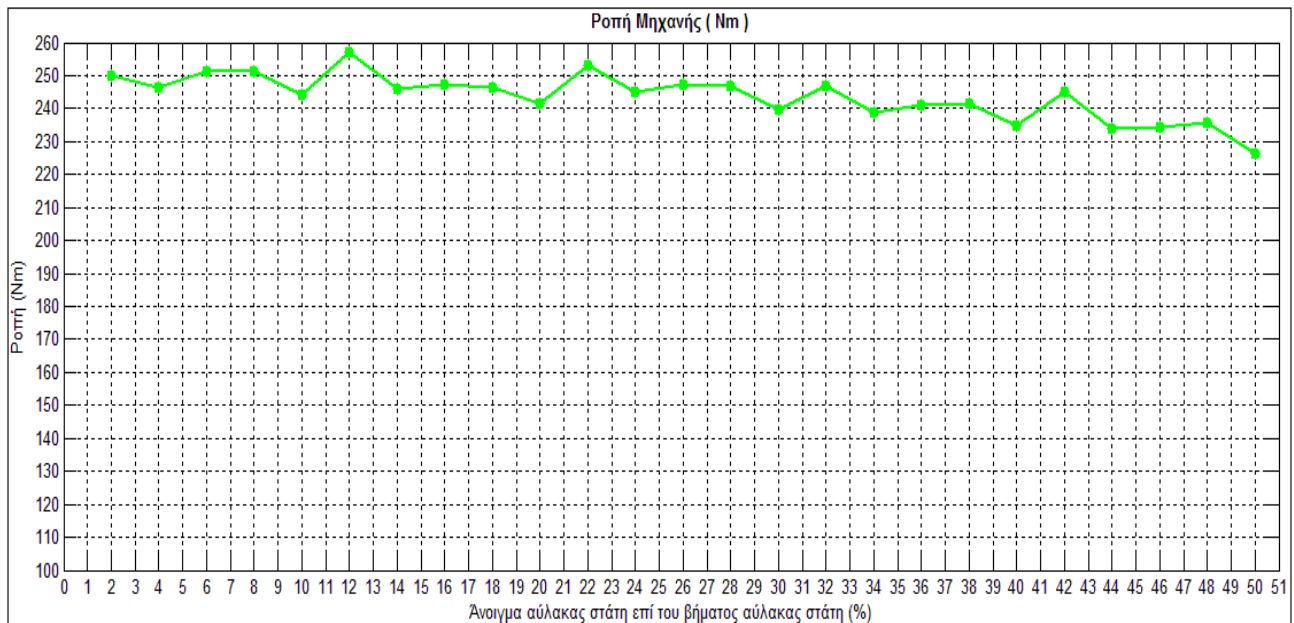
(β)

Σχήμα 4.30: Μέτρο μαγνητικής επαγωγής (α) και πυκνότητα ρεύματος (β) , μετά τη μεταβολή του h_{cs}

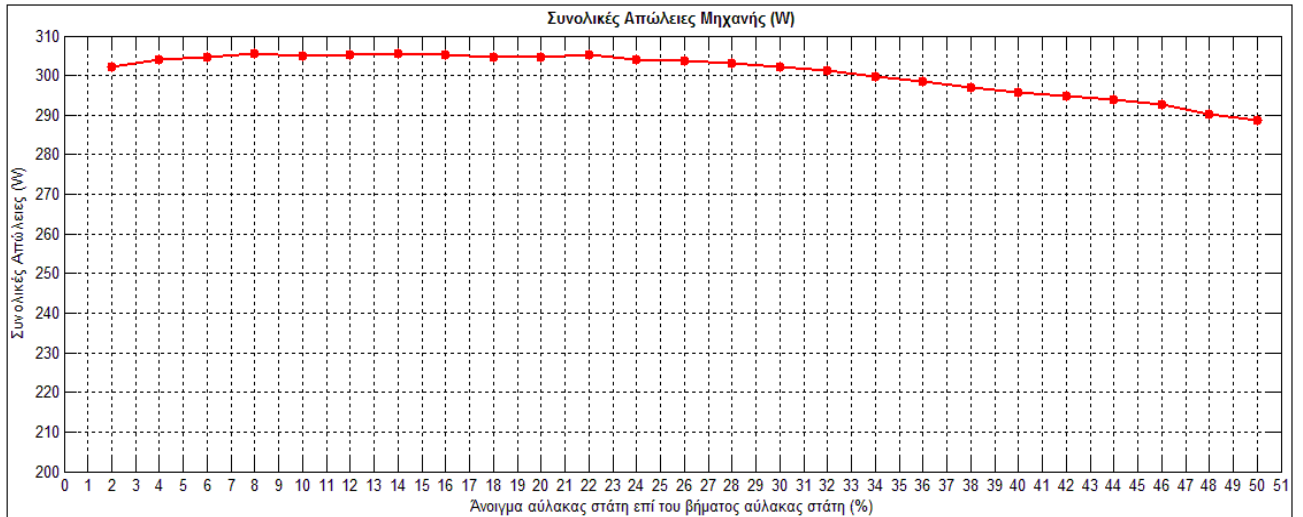
Άνοιγμα άυλακας στάτη

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η μεταβολή της ροπής και των διάφορων απωλειών με τη μεταβολή του ανοίγματος της άυλακας του στάτη.

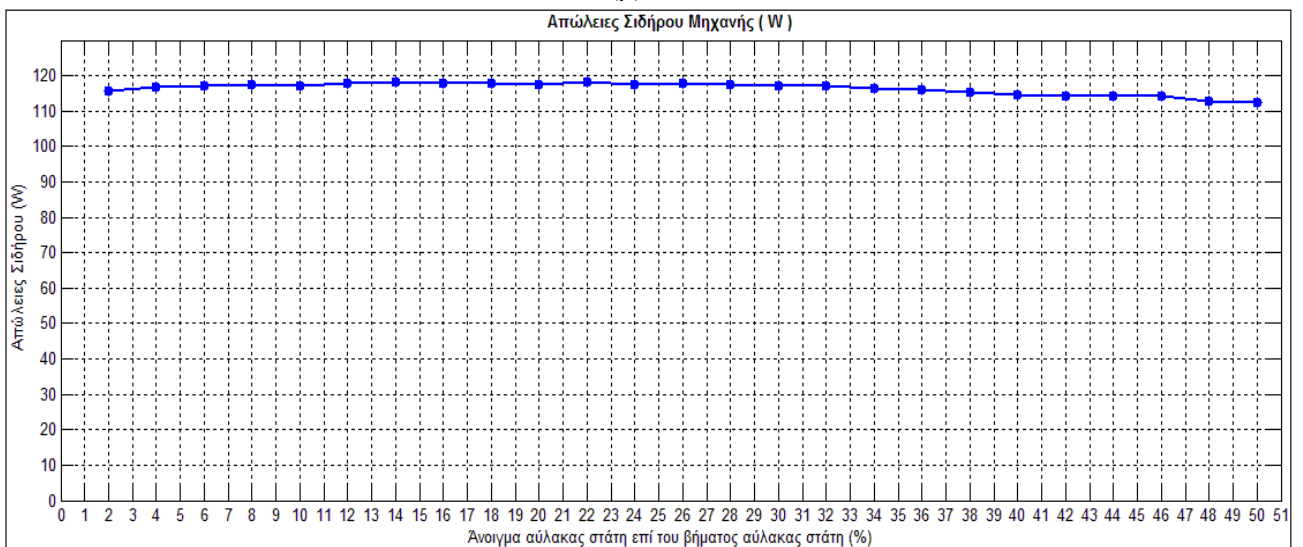
Η μεταβολή της παραμέτρου αυτής έγινε ως ποσοστό του βήματος άυλακας, από 2% έως 48%, με βήμα 2%.



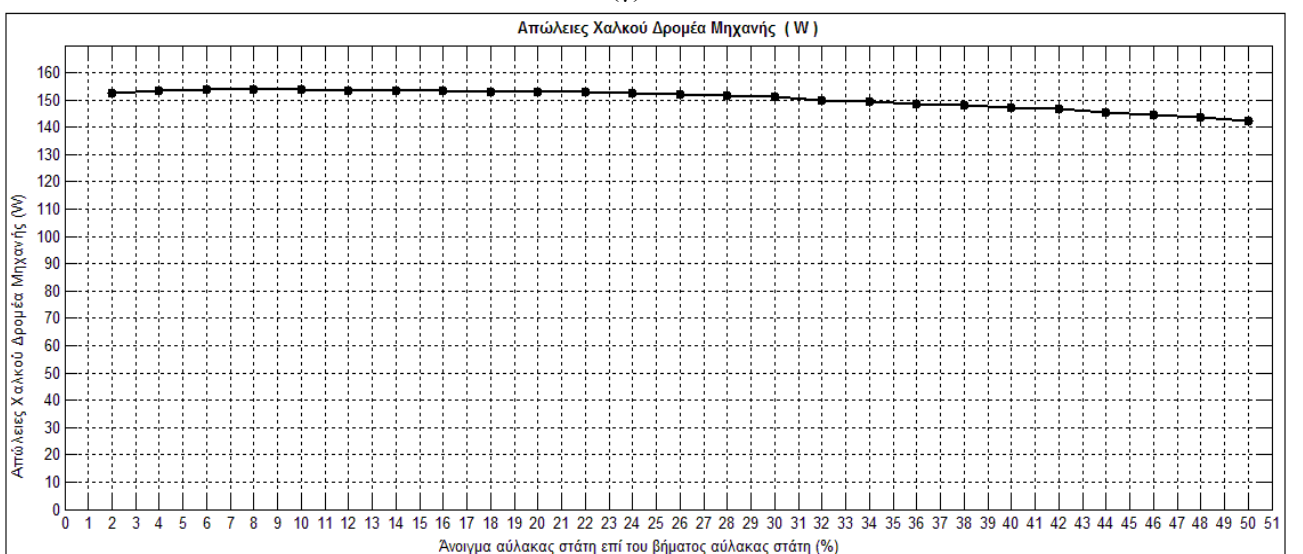
(α)



(β)



(γ)



(δ)

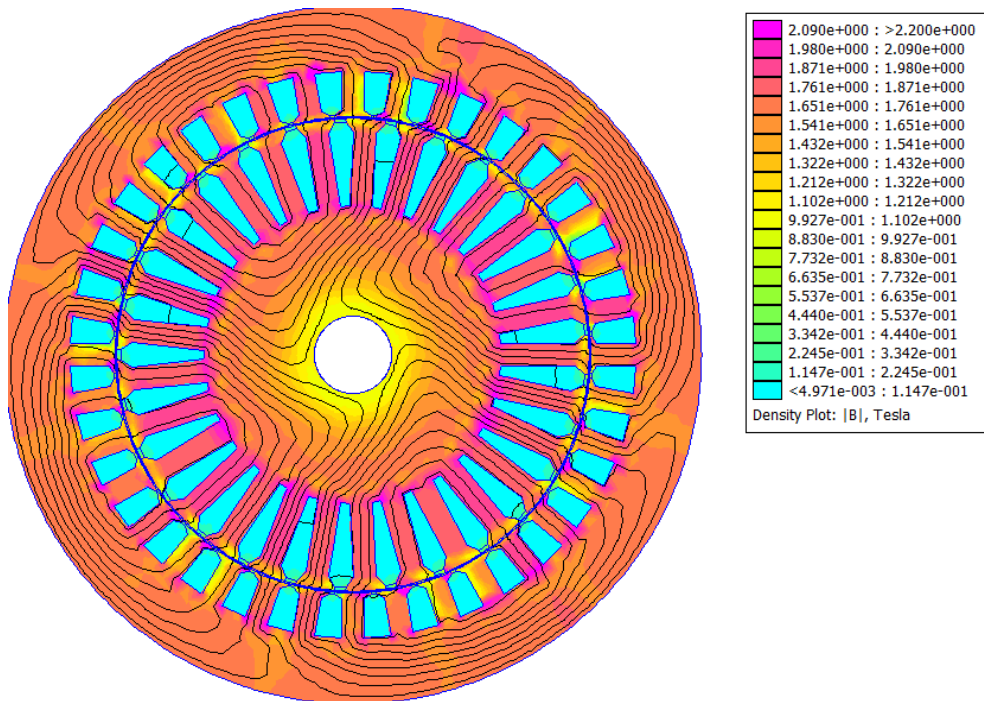
Σχήμα 4. 31: Άνοιγμα αλάκας στάτη και (α) ροπή, (β) συνολικές απώλειες, (γ) απώλειες σιδήρου, και (δ) απώλειες χαλκού δρομέα

Πρέπει να σημειωθεί πως η μεταβολή της ροπής σε σχέση με το μέγεθος του ανοίγματος αύλακας δεν είναι σταθερή, αλλά παρουσιάζει ακανόνιστες αυξομειώσεις. Αυτό συμβαίνει διότι το υπό εξέταση μέγεθος επηρεάζει σημαντικά τις αρμονικές χώρου του πεδίου. Έτσι, κάθε μικρή αλλαγή ενδέχεται να μεταβάλλει αρκετά την παραγόμενη ροπή.

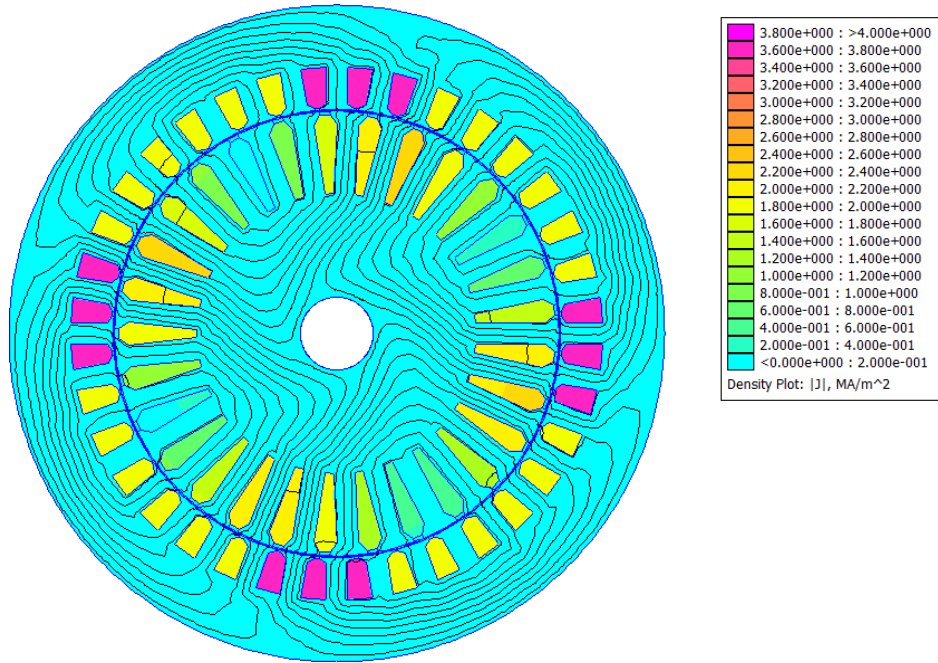
Αρχικά είχε επιλεχθεί άνοιγμα αύλακας ίσο με 30% του βήματος αύλακας, ώστε να έχουμε εύλογες σκεδάσεις. Μετά τη συγκεκριμένη διερεύνηση, με στόχο τη μικρή αύξηση της ροπής, επιλέγεται :

$$b_{os} = 0.12 * \tau_s$$

Η πεδιακή ανάλυση της βελτιωμένης γεωμετρίας φαίνεται στο Σχήμα 4.32:



(α)

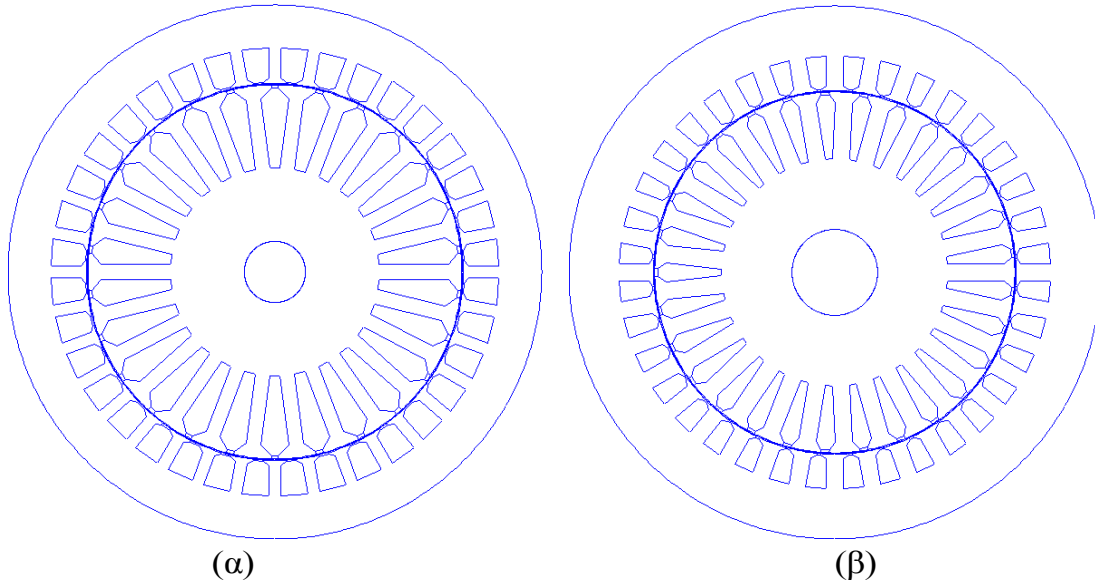


(β)

Σχήμα 4.32: Μέτρο μαγνητικής επαγωγής (α) και πυκνότητα ρεύματος (β) , μετά τη μεταβολή του b_{os}

4.2.3 Τελική Γεωμετρία

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας παρουσιάζεται η γεωμετρία της μηχανής που προέκυψε, σε σύγκριση με την αρχική, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.33:



(α)

(β)

Σχήμα 4.33: (α) Αρχική γεωμετρία μηχανής, (β) Τελική γεωμετρία μηχανής

Παρατηρείται ότι αυξήθηκε ελαφρώς ο αριθμός των αυλάκων του δρομέα, το πλάτος των δοντιών δρομέα και στάτη, καθώς και το σώμα επιστροφής του στάτη. Επίσης, αυξήθηκε και η διάμετρος του άξονα της μηχανής, καθώς ο σίδηρος του πυρήνα του δρομέα παρέμενε αφόρτιστος κοντά στον άξονα.

Στον πίνακα 4.4 αναγράφονται οι βασικές διαστάσεις της μηχανής, τόσο πριν όσο και μετά τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας, ενώ φαίνονται και οι σχέσεις

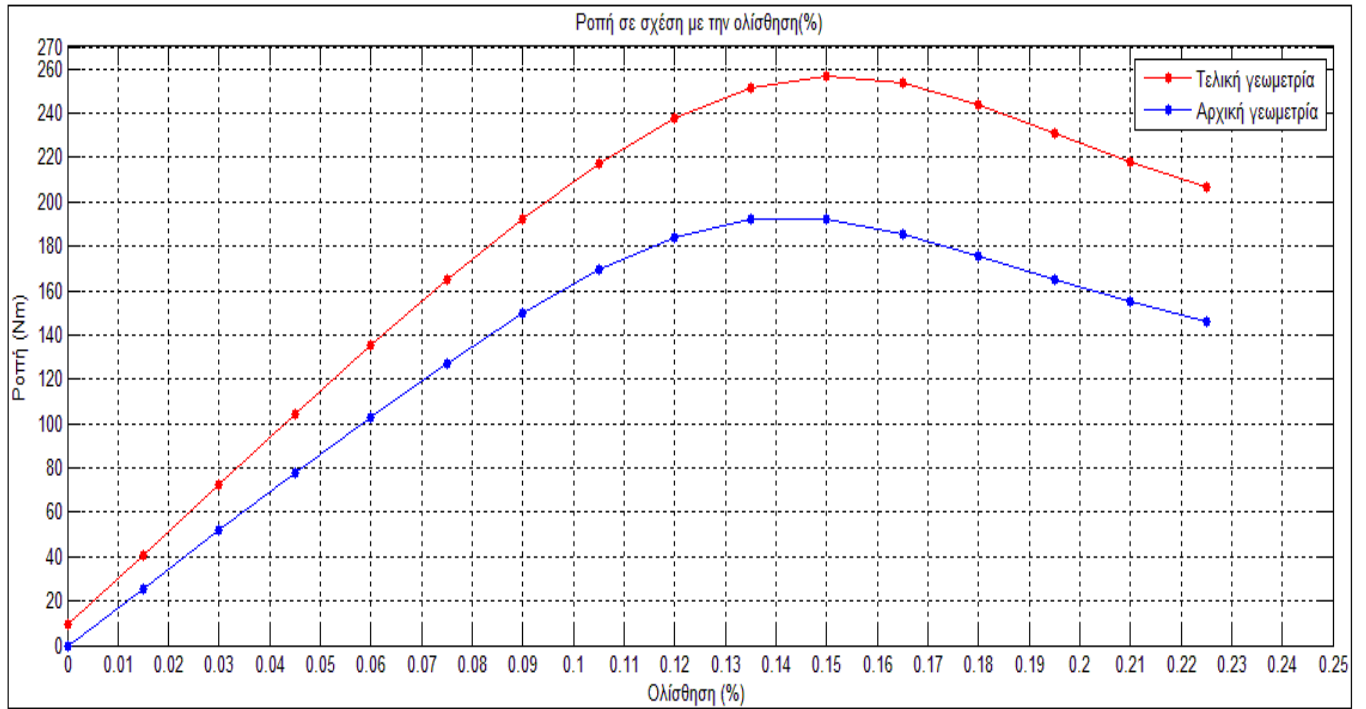
παραμετροποίησης μεταξύ των βασικών μεγεθών και των υπολοίπων.

Μέγεθος	Σύμβολο	Αρχική γεωμετρία		Βέλτιστη γεωμετρία	
		Τιμή	Σχέση παραμετροποίησης	Τιμή	Σχέση παραμετροποίησης
Αριθμός πόλων	p	4	-	4	-
Αύλακες ανά φάση ανά πόλο	q	3	-	3	-
Διάμετρος Διακένου	D	269 mm	-	269 mm	-
Ενεργό μήκος	L	130 mm	-	130 mm	-
Μήκος Διακένου	l_g	1 mm	-	1 mm	-
Αριθμός αυλάκων στάτη	Q	36	$p \cdot 3 \cdot q$	36	$p \cdot 3 \cdot q$
Βήμα αύλακας στάτη	τ_s	10 μοίρες	$360/Q$	10 μοίρες	$360/Q$
Πάχος δοντιού στάτη	b_{ts}	8.5 mm	$0.35 \cdot \tau_s$	12.87 mm	$0.53 \cdot \tau_s$
Υψος δοντιού στάτη	h_s	22 mm	-	22 mm	-
Σώμα επιστροφής στάτη	h_{cs}	30.75 mm	$1.4 \cdot h_s$	37.4 mm	$1.7 \cdot h_s$
Εξωτερική διάμετρος	D_{out}	384 mm	$D + l_g + h_s + h_{os} + h_{ws} + h_{cs}$	397.2 mm	$D + l_g + h_s + h_{os} + h_{ws} + h_{cs}$
Ανοιγμα αύλακας στάτη	b_{os}	7.15 mm	$0.3 \cdot \tau_s$	2.86 mm	$0.12 \cdot \tau_s$
Υψος ανοίγματος αύλακας	h_{os}	1.1 mm	$0.05 \cdot h_s$	1.1 mm	$0.05 \cdot h_s$
Υψος σφην. περιοχής πεδήλου	h_{ws}	2.64 mm	$0.12 \cdot h_s$	2.64 mm	$0.12 \cdot h_s$
Αριθμός αυλάκων δρομέα	Q_r	26	-	29	-
Βήμα αύλακας δρομέα	τ_r	13.85 μοίρες	$360/Q_r$	12.41 μοίρες	$360/Q_r$
Πάχος δοντιού δρομέα	b_{tr}	10.55 mm	$0.35 \cdot \tau_r$	13.14 mm	$0.48 \cdot \tau_r$
Υψος δοντιού δρομέα	h_r	50 mm	-	42 mm	-
Διάμετρος άξονα	D_{shaft}	44 mm	-	64 mm	-
Ανοιγμα αύλακας δρομέα	b_{or}	5.1 mm	$0.16 \cdot \tau_r$	6.3 mm	$0.22 \cdot \tau_r$
Υψος ανοίγματος αύλακας	h_{or}	2.5 mm	$0.05 \cdot h_r$	2.1 mm	$0.05 \cdot h_r$
Υψος σφην. περιοχής πεδήλου	h_{wr}	7 mm	$0.14 \cdot h_r$	5.88 mm	$0.14 \cdot h_r$

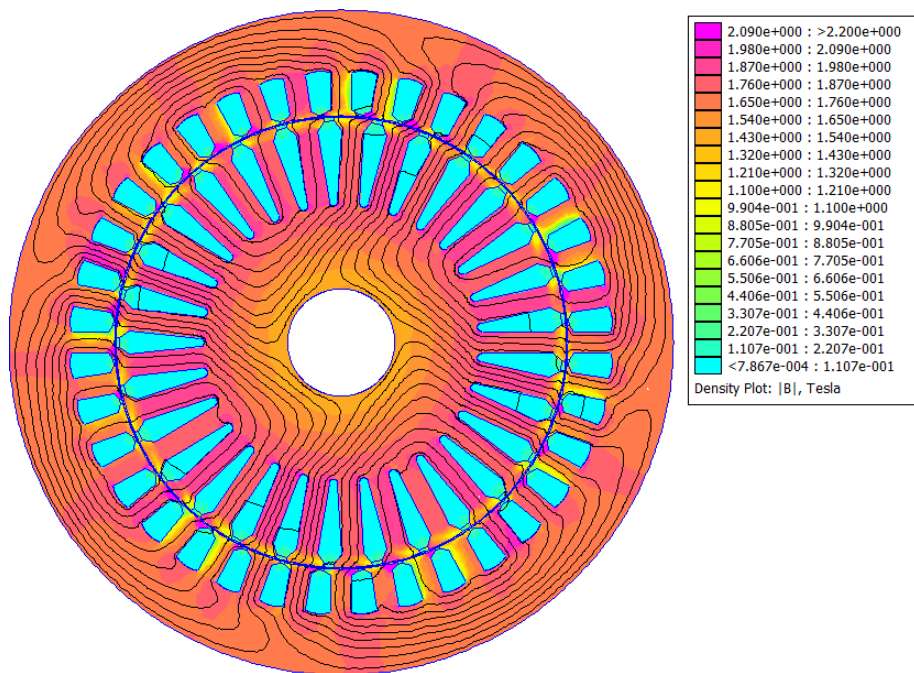
Πίνακας 4.4: Βασικές διαστάσεις της μηχανής και μεγέθη της παραμετροποιημένης διαδικασίας σχεδίασης, πριν και μετά την ανάλυση ευαισθησίας

Με την σχεδίαση της νέας γεωμετρίας επιτεύχθηκε σημαντική αύξηση της παραγόμενης ροπής, πάνω από 35%, και μείωση των φορτίσεων στα επιμέρους τμήματα της μηχανής, ώστε αυτά να παραμένουν εντός των ορίων που τέθηκαν κατά την προκαταρκτική σχεδίαση.

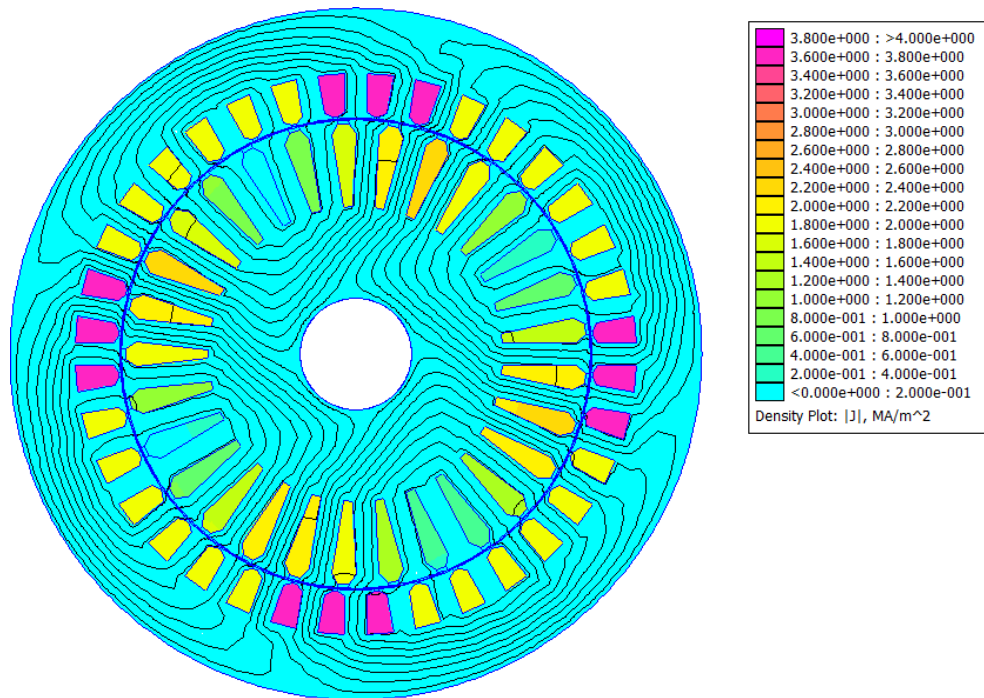
Στο Σχήμα 4.34 φαίνεται η παραγόμενη ροπή της μηχανής σε σχέση με την ολίσθηση για την αρχική και την τελική γεωμετρία, ενώ στο Σχήμα 4.35 παρουσιάζονται οι φορτίσεις της τελικής γεωμετρίας.



Σχήμα 4.34 : Ροπή σε σχέση με την ολίσθηση πριν και μετά τη διαδικασία βελτιστοποίησης



(α)

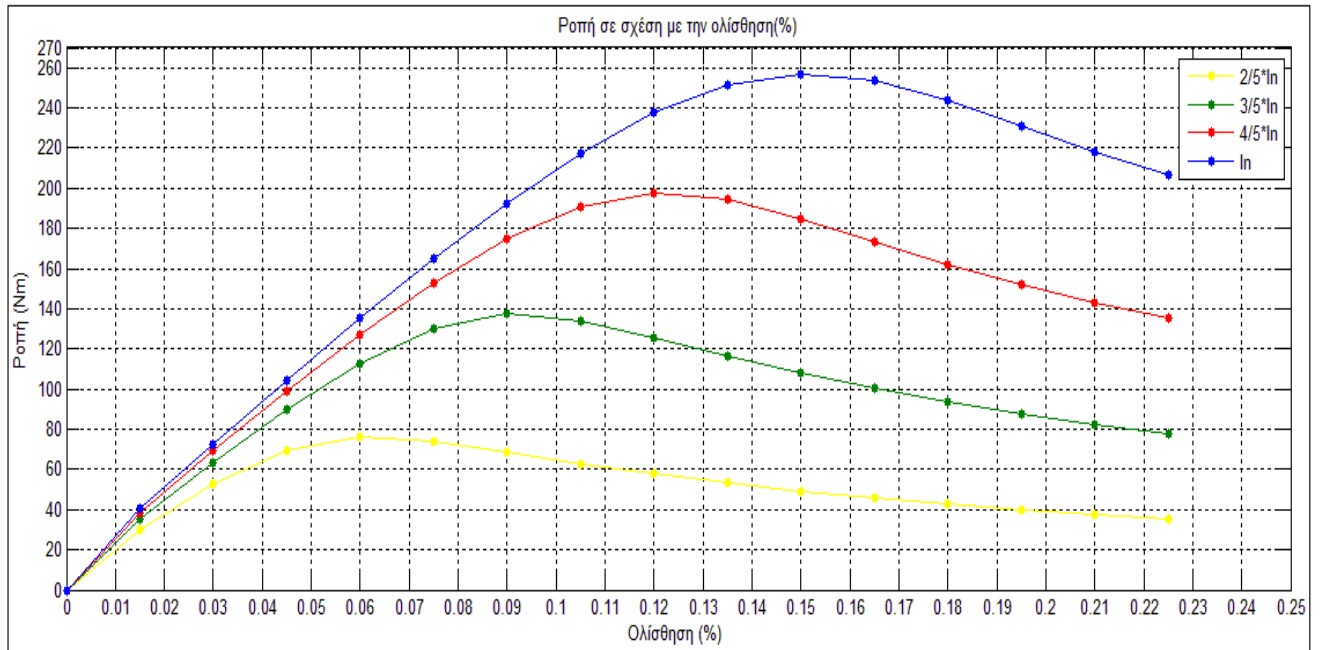


(β)

Σχήμα 4.35: Μέτρο μαγνητικής επαγωγής (α) και πυκνότητα ρεύματος (β), μετά τη σχεδίαση της βέλτιστης γεωμετρίας

Παρατηρούμε ότι οι φορτίσεις των τμημάτων της μηχανής παραμένουν εντός ορίων και συγκεκριμένα δεν ξεπερνούν τα 1.9T στα δόντια του δρομέα, τα 1.8T στα δόντια το στάτη, τα 1.7T στο σώμα επιστροφής του στάτη και τα 1.6T στο σώμα του δρομέα. Μικρός κορεσμός παρατηρείται στα πέλματα των δοντιών στάτη και δρομέα, ο οποίος όμως κρίνεται αποδεκτός. Επίσης, η φόρτιση του χαλκού στο στάτη και των δρομέα παραμένει εντός των αποδεκτών ορίων.

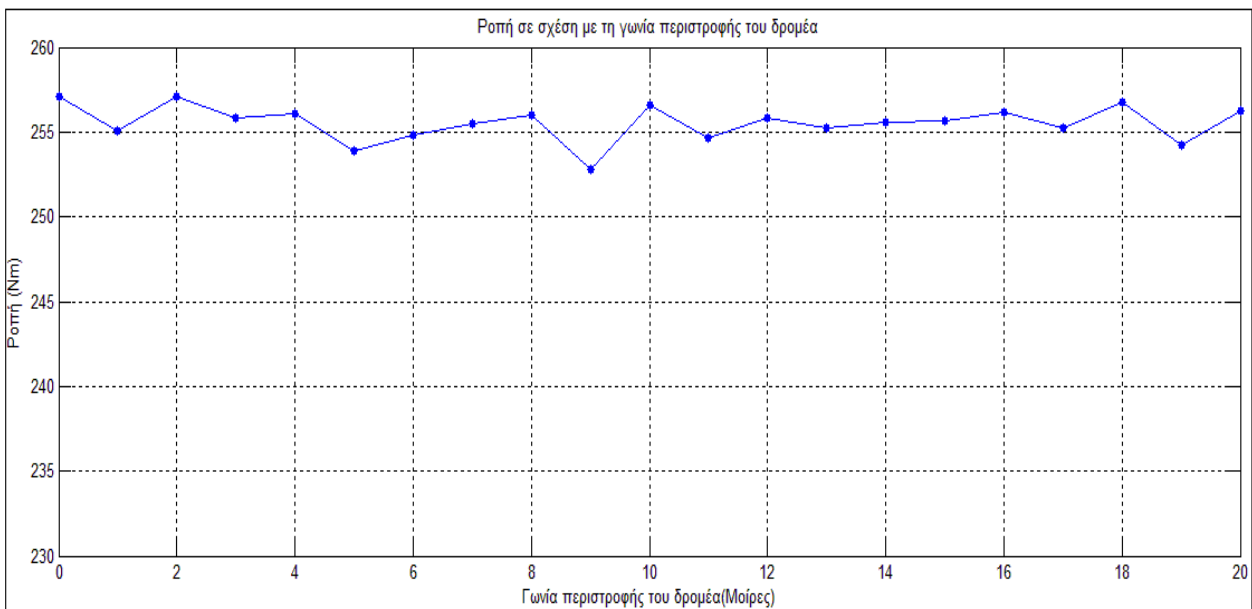
Στη συνέχεια παρουσιάζεται η καμπύλη ροπής-ολίσθησης για ρεύματα από 40% μέχρι 100% του ονομαστικού, καθώς σε καμία περίπτωση δε θα ξεπεραστεί αυτό, λόγω της λειτουργίας εξασθένησης πεδίου που χρησιμοποιεί η συγκεκριμένη εφαρμογή.



Σχήμα 4.36: Καμπύλη ροπής-ολίσθησης για διάφορες τιμές του ρεύματος. Παρατηρείται ότι για τις διάφορες τιμές του ρεύματος η καμπύλη κλιμακώνεται, ενώ μεταβάλλεται και η ολίσθηση μέγιστης ροπής.

Καμπύλη ροπής-γωνίας δ°

Όπως έγινε στην παράγραφο 4.1.1, προσομοιώνεται η περιστροφή του δρομέα κατά γωνία δ° και μετράται η ροπή στις διάφορες θέσεις του:

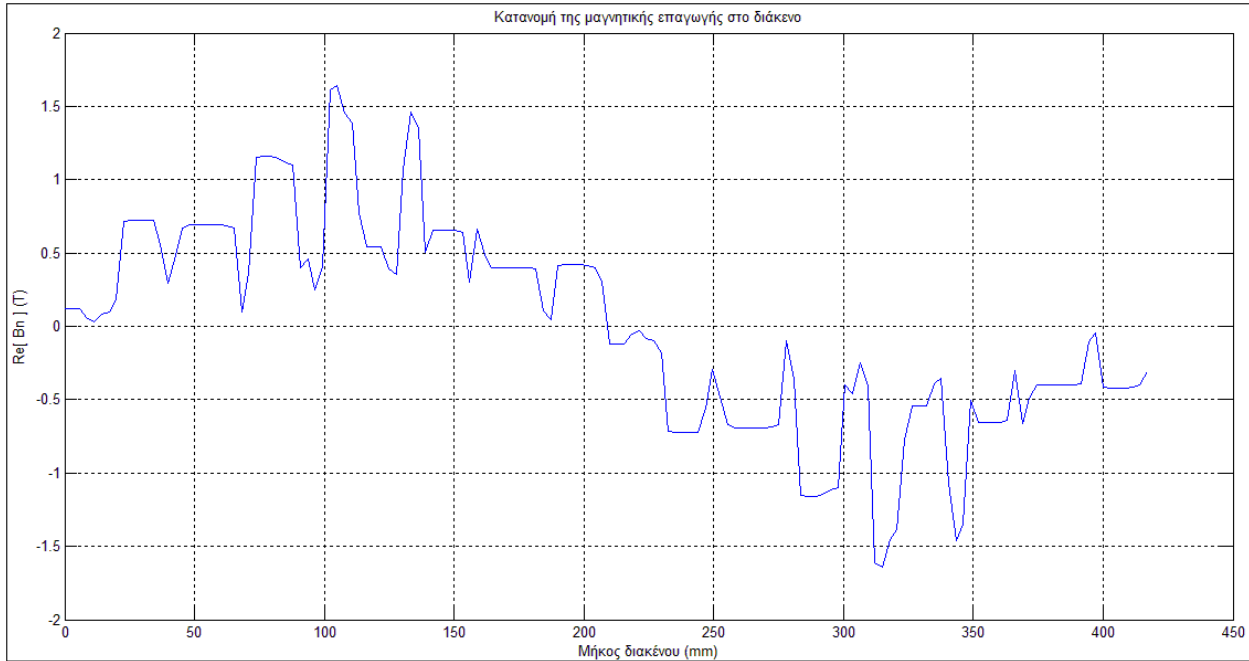


Σχήμα 4.37: Ροπή σε σχέση με τη γωνία περιστροφής του δρομέα για τη βέλτιστη γεωμετρία

Για τη βέλτιστη γεωμετρία που αναπτύχθηκε η μέση ροπή είναι 255.55Nm, με ελάχιστη τιμή τα 252.8Nm και μέγιστη τα 257.1Nm, οπότε υπολογίζεται η κυμάτωση της ροπής που παρουσιάζει και προκύπτει περίπου 1.7%, η οποία κρίνεται άκρως ικανοποιητική.

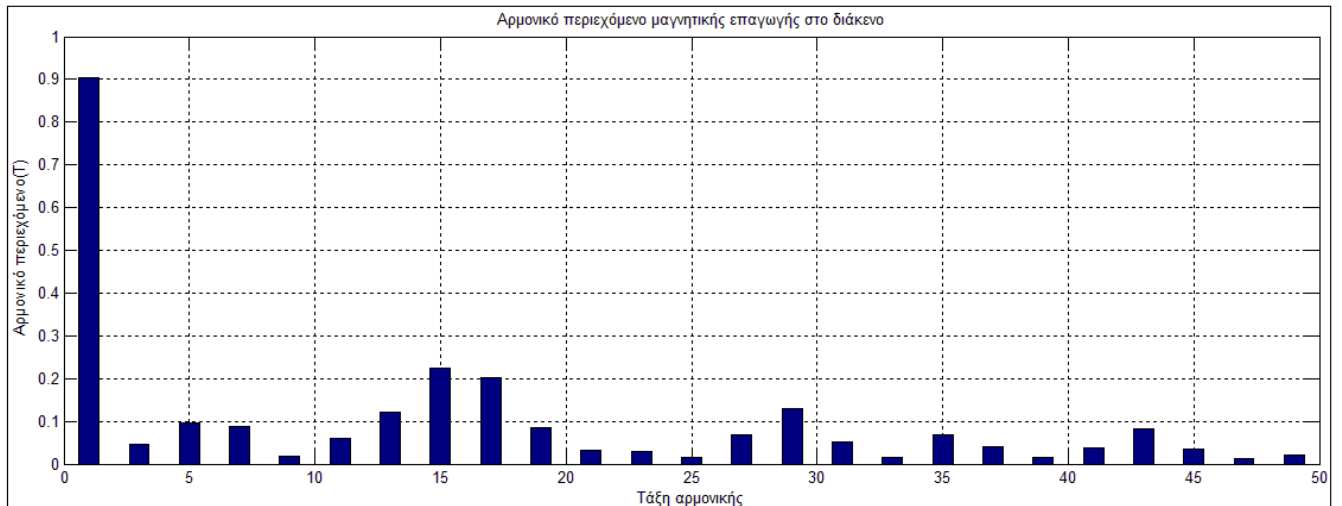
Κατανομή του πεδίου στο διάκενο

Στο Σχήματα 4.38 φαίνεται το πραγματικό μέρος της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο για τη βέλτιστη γεωμετρία. Παρατηρείται έντονο αρμονικό περιεχόμενο, λόγω της διαμόρφωσης των αυλάκων του στάτη και του δρομέα.



Σχήμα 4.38: Πυκνότητα μαγνητικής ροής κατά μήκος του διακένου για τη βέλτιστη γεωμετρία

Αναλύοντας την παραπάνω κυματομορφή κατά Fourier προκύπτει το αρμονικό περιεχόμενο και η συμμετοχή κάθε αρμονικής. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 4.39 και στον Πίνακα 4.5:



Σχήμα 4.39: Αρμονικό περιεχόμενο μαγνητικής επαγωγής για τη βέλτιστη γεωμετρία

Τάξη αρμονικής	% συμμετοχή
3	4.95
5	10.7
7	9.8
9	1.8
11	6.6
13	13.5
15	24.9
17	22.4

Πίνακας 4.5: Συμμετοχή αρμονικών μαγνητικής επαγωγής για τη βέλτιστη γεωμετρία

Για τη βέλτιστη γεωμετρία προέκυψε συνολική αρμονική παραμόρφωση 48.5%.

Απώλειες και απόδοση τελικής σχεδίασης

Στην ολίσθηση μέγιστης ροπής της μηχανής υπολογίζονται οι απώλειες για τη βέλτιστη σχεδίαση που πραγματοποιήθηκε, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.3 :

Απώλειες χαλκού στάτη : $P_{Cu\text{stator}} = 967.8 \text{ W}$

Απώλειες χαλκού δρομέα : $P_{Cu\text{rotor}} = 134.37 \text{ W}$

Απώλειες σιδήρου : $P_{Fe} = 123.66 \text{ W}$

Επίσης θεωρούνται μηχανικές απώλειες $P_{m,loss}$ τριβών, ανεμισμού και διαφεύγουσες, 2% της ισχύος εξόδου.

Έτσι, η απόδοση της μηχανής είναι :

$$\text{Efficiency} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{T \omega}{T \omega + P_{c\text{ustator}} + P_{c\text{urotor}} + P_{Fe} + P_{m,loss}}$$

Και προκύπτει :

$$\eta = 0.9603 \text{ ή } 96.03\%$$

Η απόδοση του κινητήρα που υπολογίστηκε θεωρείται εξαιρετικά ικανοποιητική.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

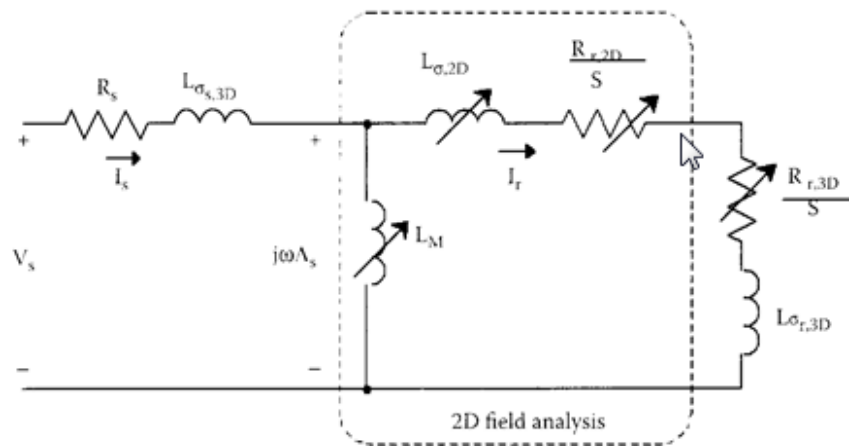
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

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.

5.1 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 5.1. 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 5.1: Ισοδύναμο κύκλωμα μεταβλητών παραμέτρων τριφασικού κινητήρα επαγωγής. Επισημαίνονται οι παράμετροι που προσδιορίζονται από τη 2-διάστατη ανάλυση [5]

Οι 2D παράμετροι δεν είναι σταθερές. Η αντίδραση μαγνήτισης L_M είναι συνάρτηση της πεπλεγμένης ροής του στάτη Λ_s . 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 ολίσθησης του δρομέα s , λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της κατανομής ρευμάτων στις μπάρες του δρομέα.

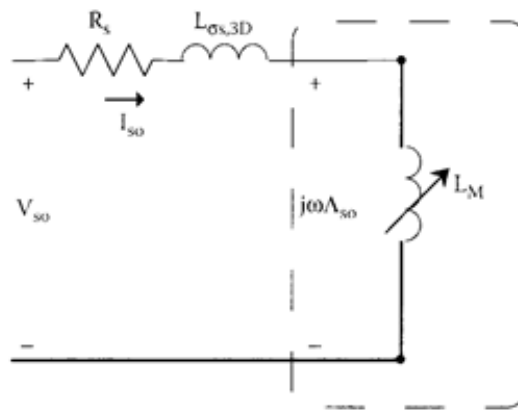
Αντίθετα οι παράμετροι που αντιστοιχούν στα 3D φαινόμενα θεωρούνται σταθερές. Η αντίσταση του τυλίγματος του στάτη R_s και η αντίδραση σκέδασης $L_{\sigma_{s,3D}}$ θεωρούνται ανεξάρτητες από την ανομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος. Παρόμοια και οι αντίστοιχες παράμετροι του δρομέα $R_{r,3D}$ και $L_{\sigma_{r,3D}}$ θεωρούνται σταθερές. Αυτές αφορούν τους δακτυλίους βραχυκύκλωσης (end-rings) του δρομέα και την κλίση των αυλακίων (skewing). Υπολογίζονται αναλυτικά και χρησιμοποιούνται στο ισοδύναμο κύκλωμα. Οι απώλειες σιδήρου δεν περιλαμβάνονται στο ισοδύναμο αυτό (γι' αυτό και δεν υπάρχει αντίσταση R_c 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 φορτίου για τον προσδιορισμό της αντίδρασης μαγνήτισης L_M
- η δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα για τις υπόλοιπες 2D παραμέτρους

5.1.1 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.

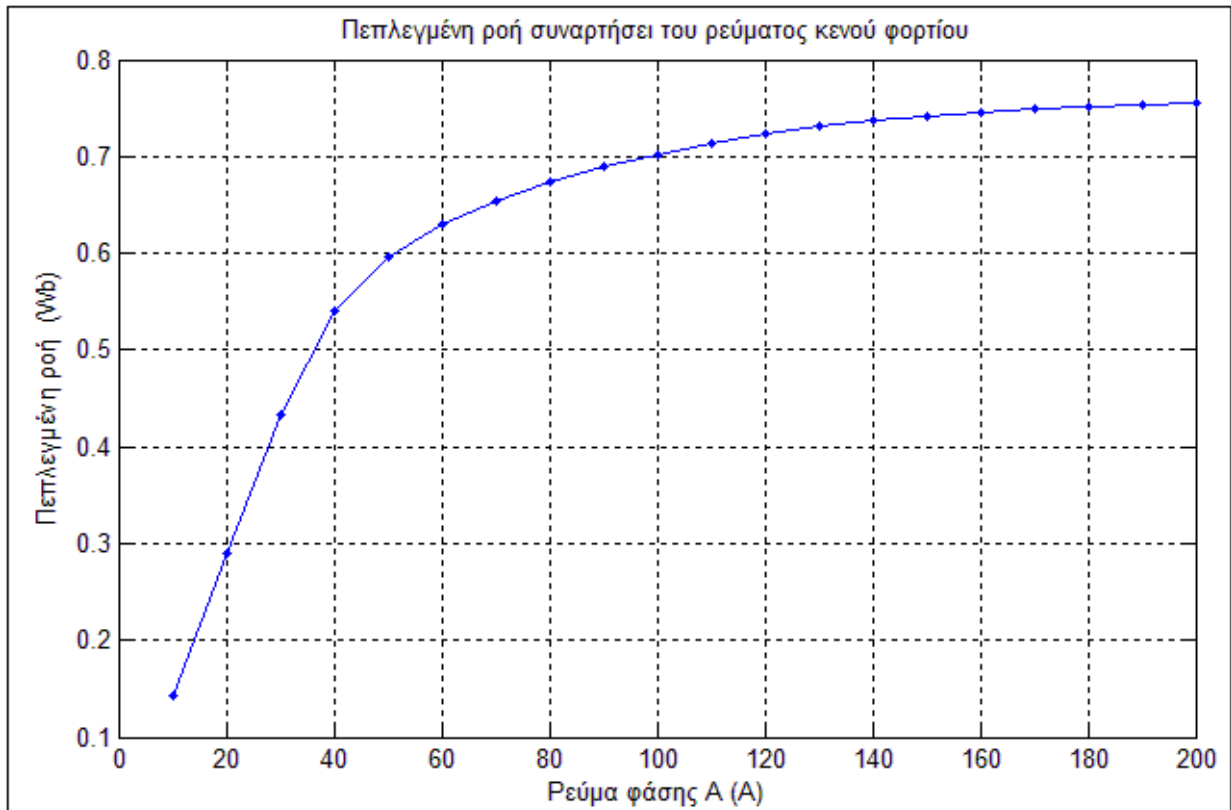


Σχήμα 5.2: Μείωση του ισοδύναμου κυκλώματος κατά τη δοκιμή κενού φορτίου [5]

Το πρόγραμμα 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:

$$L_M(\Lambda_{so}) = \frac{\Lambda_{so}}{I_{so}} \quad (5.1)$$

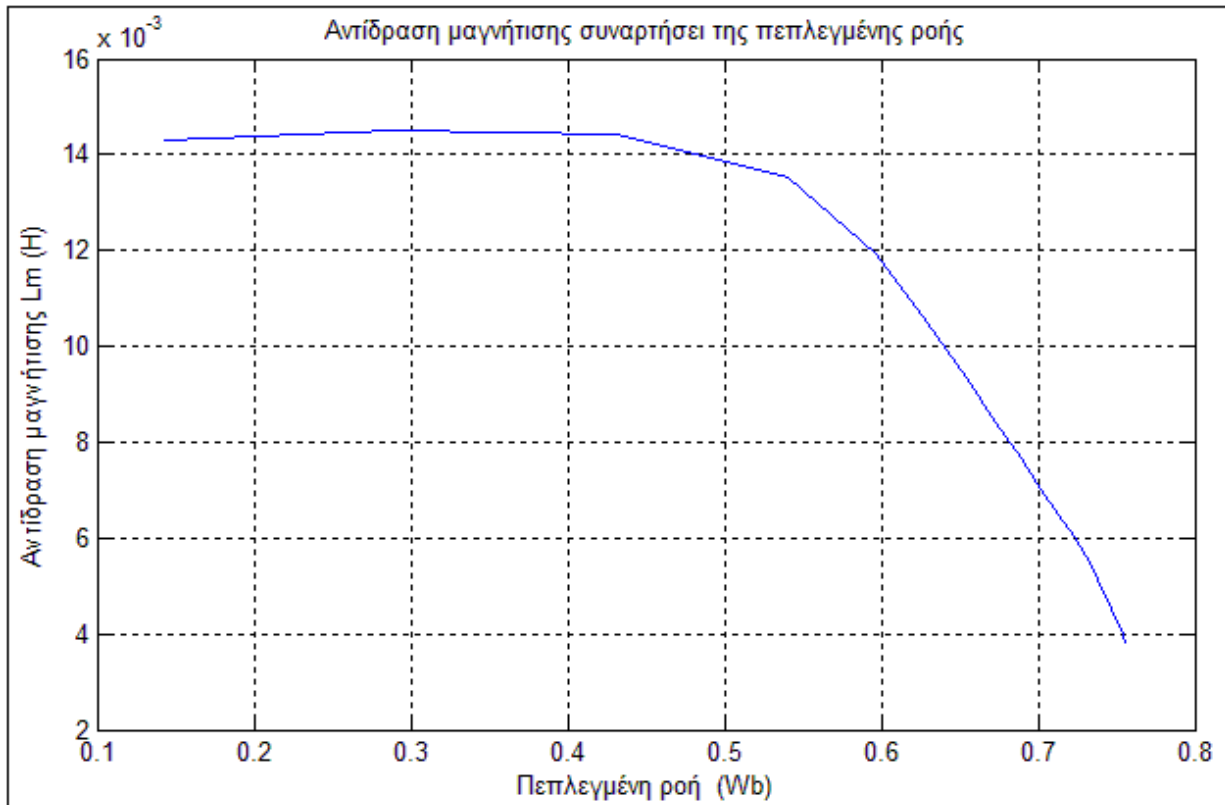
Από την προσομοίωση προκύπτει το γράφημα του Σχήματος 5.3 που δίνει την πεπλεγμένη ροή σε συνάρτηση με το ρεύμα της φάσης A.



Σχήμα 5.3: Πεπλεγμένη ροή σε συνάρτηση με το ρεύμα της φάσης A

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

Σύμφωνα με τη σχέση 5.1 , 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 Σχήμα 5.4:



Σχήμα 5.4: Αντίδραση μαγνήτισης L_M ως συνάρτηση της πεπλεγμένης ροής

Η σταθερή τιμή της αντίδραση μαγνήτισης που αντιστοιχεί στο γραμμικό τμήμα της καμπύλης του Σχήματος 5.4 είναι $L_{M,linear} = 0.0142H$.

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:

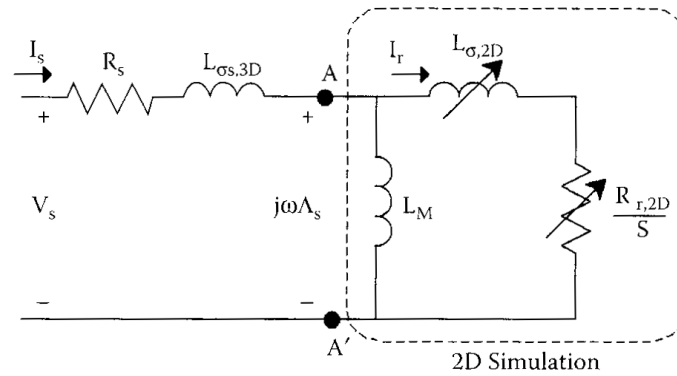
$$L_M(\Lambda_{So}) = L_M(\Lambda_S) \quad (5.2)$$

5.1.2 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 5.1 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.

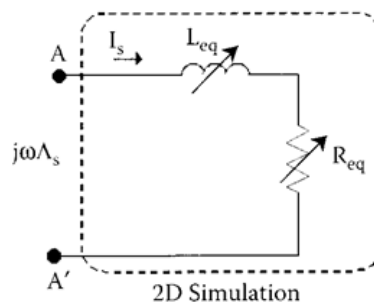
Το ισοδύναμο κύκλωμα για τη δοκιμή αυτή φαίνεται στο Σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Ισοδύναμο κύκλωμα για τη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα [5]

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 κατανεμημένο, οι απώλειες Joule του δρομέα, P_{Jr} , και η τιμή της μαγνητικής ενέργειας του μαγνητικού υλικού W_m , είναι χρονικά σταθερές. 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 5.6.



Σχήμα 5.6: Παράμετροι που αντιστοιχούν στη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα [5]

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

$$R_{eq} = \frac{P_{Jr}}{3 \cdot I_s^2} \quad (5.3)$$

$$L_{eq} = \frac{2 \cdot W_m}{3 \cdot I_s^2} \quad (5.4)$$

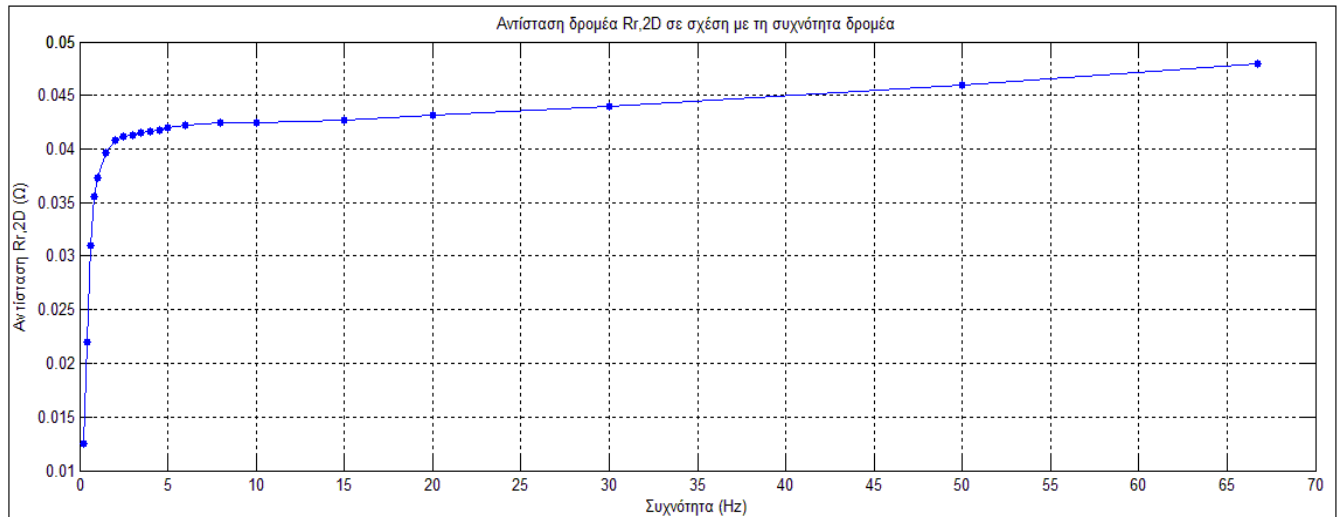
,όπου I_s η RMS τιμή του ρεύματος που χρησιμοποιήθηκε στη δοκιμή.

Αφού το L_M είναι γνωστό και ίσο με την ακόρεστη τιμή του από τη δοκιμή κενού

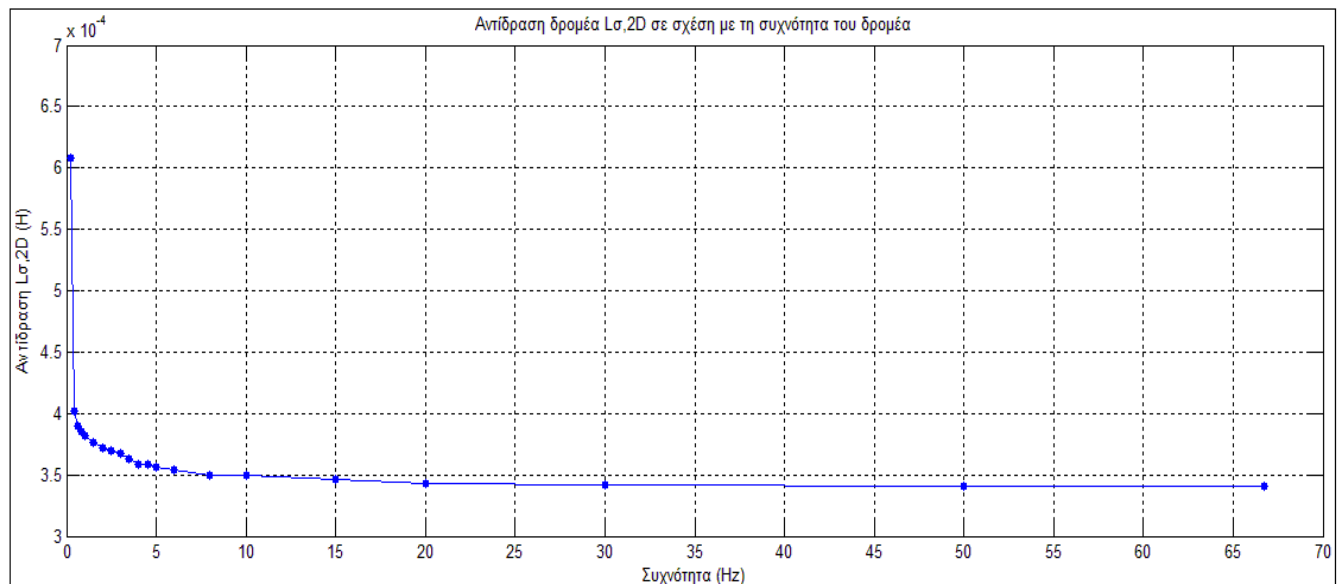
φορτίου, μπορούν να υπολογιστούν οι συναρτήσεις $R_{r,2D}(f_r)$ και $L_{\sigma,2D}(f_r)$ του κυκλώματος του Σχήματος 5.5.

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 5.6 φαίνεται η $R_{r,2D}(f_r)$ και στο Σχήμα 5.7 η $L_{\sigma,2D}(f_r)$.



Σχήμα 5.6: Μεταβολή της αντίστασης $R_{r,2D}$ με τη συχνότητα του δρομέα



Σχήμα 5.7: Μεταβολή της αντίδρασης $L_{\sigma,2D}$ με τη συχνότητα του δρομέα

5.1.3. Υπολογισμός παραμέτρων 3D φαινομένων

Για την ολοκλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος, οι παράμετροι που αντιστοιχούν στις συνδέσεις των τυλιγμάτων του στάτη ($L_{\sigma s,3D}$) 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:

$$L_{\sigma s,ew} = \mu_0 \cdot \frac{N^2}{2 \cdot p} \cdot L_{ew} \cdot \lambda_{ew} \quad (5.5)$$

όπου,

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

- $N=2N_s$ είναι το πλήθος αγωγών ανά φάση

- και το ενεργό μήκος των συνδέσεων των τυλιγμάτων του στάτη, είναι:

$$L_{ew} = (0.083 \cdot p + 1.1217) \cdot \frac{p \cdot D + y}{2 \cdot p} \quad (5.6)$$

, όπου $p=2$ τα ζεύγη πόλων του κινητήρα και y το συνολικό ύψος της αύλακας του στάτη.

Οπότε : $L_{\sigma s,ew} = 0.001323H$

Η αντίδραση που οφείλεται στην κλίση των αυλακιών του δρομέα ($L_{\sigma s,sk}$) θεωρείται αμελητέα, καθώς υπήρξε ιδιαίτερη μέριμνα στο συνδυασμό αυλάκων στάτη και δρομέα που δεν απαιτούν κλίση για μείωση των αρμονικών.

Οπότε : $L_{\sigma s,sk} = 0$ H.

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

$$L_{\sigma s,3D} = L_{\sigma s,sk} + L_{\sigma s,ew} = 0.001323H \quad (5.7)$$

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

$$R_s = 0.0135 \Omega.$$

Η διάμετρος των δακτυλίων του δρομέα δίνεται από τη σχέση:

$$S_{ring} = \frac{\pi}{4} \cdot d_r^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Q_r}\right)} \quad (5.8)$$

, όπου d_r είναι η διάμετρος αύλακας του δρομέα και p τα ζεύγη πόλων.

Οπότε, η αντίστασή τους είναι:

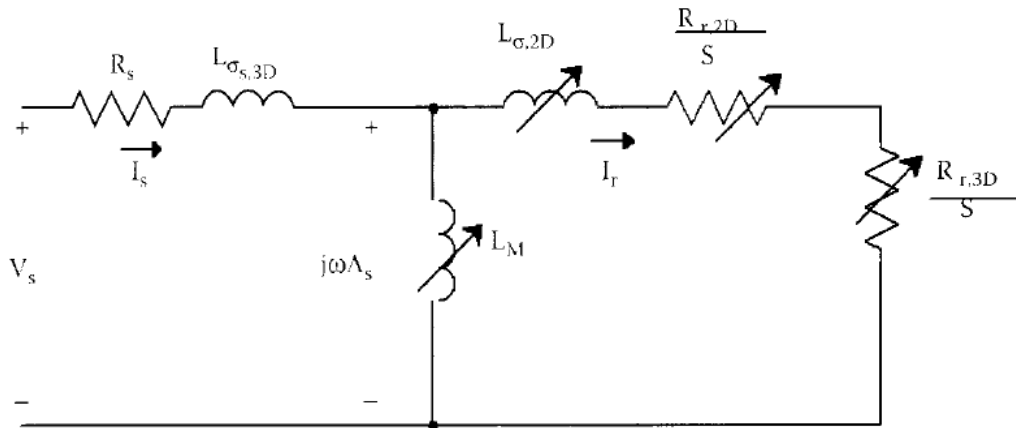
$$R_{r,3D} = \rho \cdot \frac{3 \cdot (k_w \cdot Q_r)^2}{2 \cdot \pi \cdot R_{rt}^2 \cdot S_{ring}} \quad (5.9)$$

,όπου k_w είναι ο συντελεστής τυλίγματος, ο οποίος έχει θεωρηθεί ίσος με 0.95, R_{rt} είναι η ακτίνα του δρομέα και ρ η ειδική αντίσταση του χαλκού που χρησιμοποιείται, $1.72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$.

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

5.1.4 Το ισοδύναμο κύκλωμα

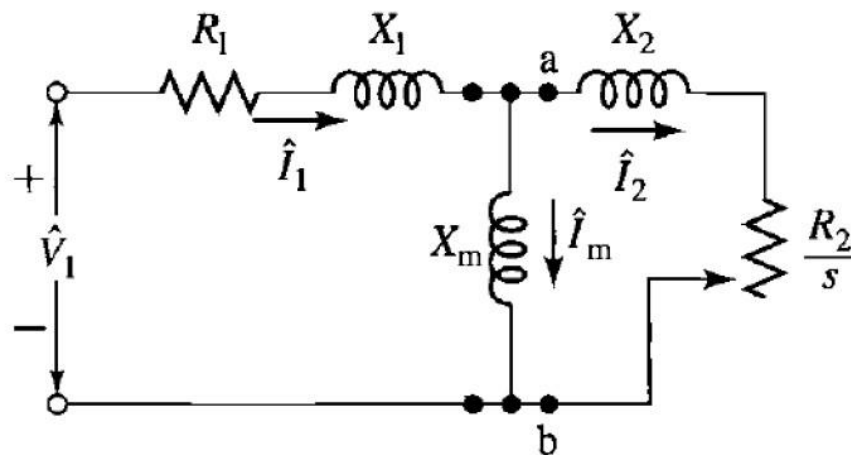
Τελικά το ισοδύναμο κύκλωμα μεταβλητών παραμέτρων που υπολογίστηκε φαίνεται στο σχήμα:



Σχήμα 5.8: Ισοδύναμο κύκλωμα μεταβλητών παραμέτρων τριφασικού κινητήρα επαγωγής. [5]

Στο κύκλωμα του Σχήματος 5.8 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 $R_{r, 2D}(f_r)$ υπολογίστην μέσω των δοκιμών ακινητοποιημένου δρομέα και κενού φορτίου αντίστοιχα, που προσομοιώθηκαν.

Για ευκολία στην περαιτέρω ανάλυση, οι παράμετροι που προσδιορίστηκαν αντιστοιχίζονται στις παραμέτρους του κλασσικού ισοδυναμού κυκλώματος του σχήματος 5.9 :



Σχήμα 5.9: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα επαγωγής. [1]

Από την αντιστοίχιση προκύπτει:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= R_s \\
 X_1 &= \omega L_{\sigma s, 3D} \\
 X_m(\Lambda_s) &= \omega L_M(\Lambda_s) \\
 R_2(f_r) &= R_{r, 3D} + R_{r, 2D}(f_r) \\
 X_2(f_r) &= \omega L_{\sigma s, 2D}(f_r)
 \end{aligned}$$

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]

5.2 Υπολογισμός χαρακτηριστικών επίδοσης κινητήρα

5.2.1 Καμπύλη ρεύματος – ολίσθησης

Από τα σχήματα 5.8 και 5.9 προκύπτει :

$$j\omega\Lambda_s = \widehat{V}_1 \cdot \frac{jX_m // (\frac{R_2}{s} + jX_2)}{R_1 + jX_1 + (jX_m // (\frac{R_2}{s} + jX_2))} \quad (5.10)$$

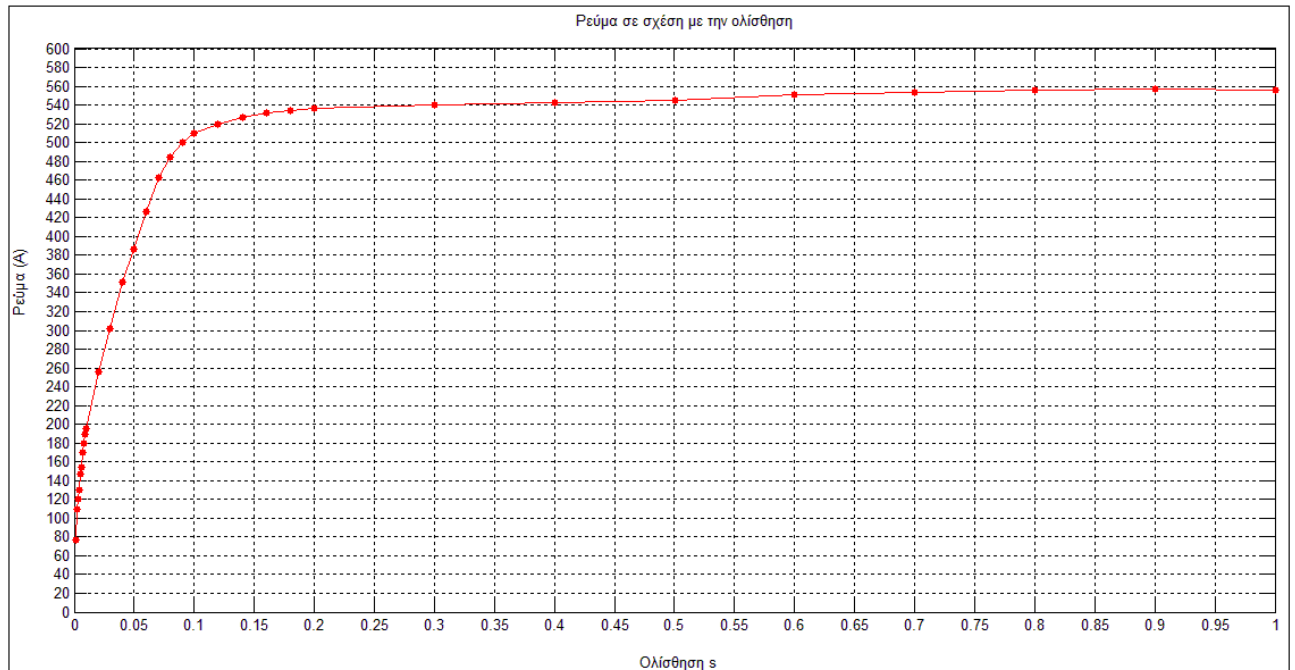
Ωστόσο, $X_m(\Lambda_s) = \omega L_M(\Lambda_s)$, οπότε για κάθε τιμή της ολίσθησης s υπάρχει μια γραμμική εξίσωση με άγνωστο το Λ_s .

Λύνοντας με επαναληπτικό τρόπο την εξίσωση για διάφορες τιμές ολίσθησης, λαμβάνεται η πεπλεγμένη ροή ως συνάρτηση της ολίσθησης $\Lambda_s(s)$. Κατ' επέκταση υπολογίζονται οι τιμές της αντίδρασης μαγνήτισης ως συνάρτηση της ολίσθησης $X_m(s)$.

Από την ανάλυση του σχήματος (5.6) προκύπτει το ρεύμα γραμμής από τη σχέση:

$$\widehat{I}_1 = \frac{\widehat{V}_1}{R_1 + jX_1 + (jX_m // (\frac{R_2}{s} + jX_2))} \quad (5.11)$$

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 του Σχήματος 5.10.



Σχήμα 5.10: Καμπύλη ρεύματος ολίσθησης

Παρατηρώντας την καμπύλη μερικά χρήσιμα συμπεράσματα μπορούν να βγουν. Αρχικά φαίνεται ότι το ρεύμα εκκίνησης είναι περίπου $I_{εκκ} = 560$ A, δηλαδή κάτι λιγότερο από πέντε φορές το ρεύμα ονομαστικής λειτουργίας. Αυτό συμβαίνει διότι η ωμική αντίσταση του τυλίγματος του στάτη είναι σχετικά μικρή.

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

5.2.2 Καμπύλη ροπής ολίσθησης

Για την κατασκευή της καμπύλης ροπής ολίσθησης του κινητήρα, επιστρατεύεται για ακόμη μια φορά το ισοδύναμο του Σχήματος 5.9.

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

$$T_{em} = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{3 \cdot V_{th}^2 \cdot \frac{R_2}{s}}{\left(R_{th} + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_{th} + X_2)^2} \quad (5.12)$$

Για τις διάφορες τιμές της ολίσθησης προκύπτουν οι τιμές της ροπής και χαράσσεται η χαρακτηριστική ροπής ολίσθησης (Σχήμα 5.11).

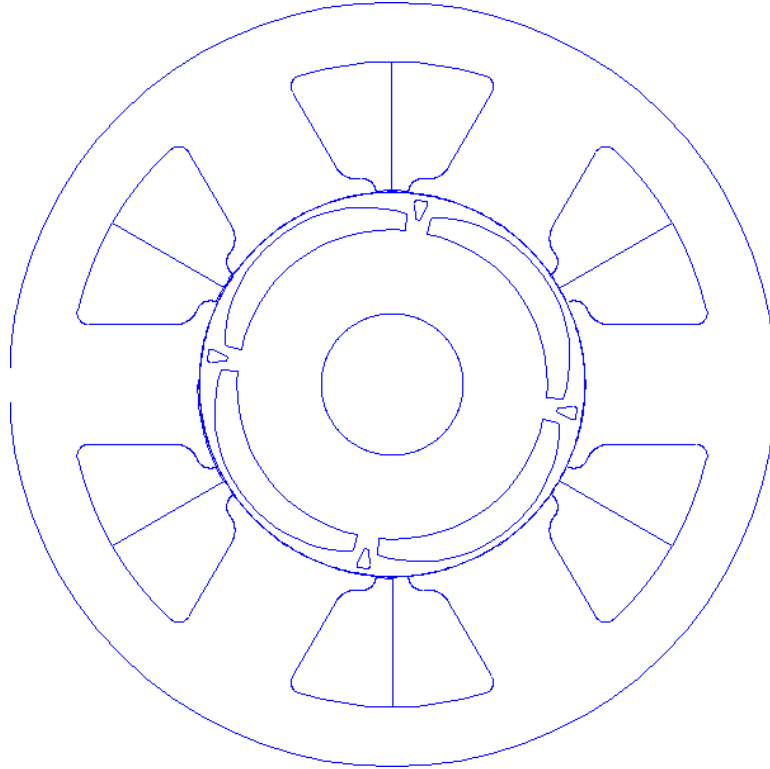
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΣΥΓΧΡΟΝΟ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο επιχειρείται μια σύγκριση του επαγωγικού κινητήρα που σχεδιάστηκε με έναν σύγχρονο κινητήρα εσωτερικών μαγνητών, που έχει σχεδιαστεί ως εναλλακτική επιλογή για το όχημα της εφαρμογής μας. Η σύγκριση αφορά την ονομαστική λειτουργία, όπου αντιπαραβάλλονται ο βαθμός απόδοσης και η πυκνότητα ισχύος των δύο τοπολογιών, και έπειτα τη λειτουργία εξασθένησης πεδίου, όπου συγκρίνεται η συμπεριφορά τους σε ταχύτητες πάνω από την ονομαστική.

6.1 Παρουσίαση εναλλακτικής τοπολογίας

Για την μελέτη της συγκεκριμένης εφαρμογής ηλεκτροκίνησης σχεδιάστηκε μια εναλλακτική τοπολογία ηλεκτρικού κινητήρα. Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκε ένας σύγχρονος κινητήρας εσωτερικών μαγνητών, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 6.1 :



Σχήμα 6.1: Γεωμετρία σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών

Οι βασικές διαστάσεις του κινητήρα αυτού έχουν επιλεγεί:

Διάμετρος διακένου: **D=200mm**

Ενεργό μήκος διακένου: **L=150mm**

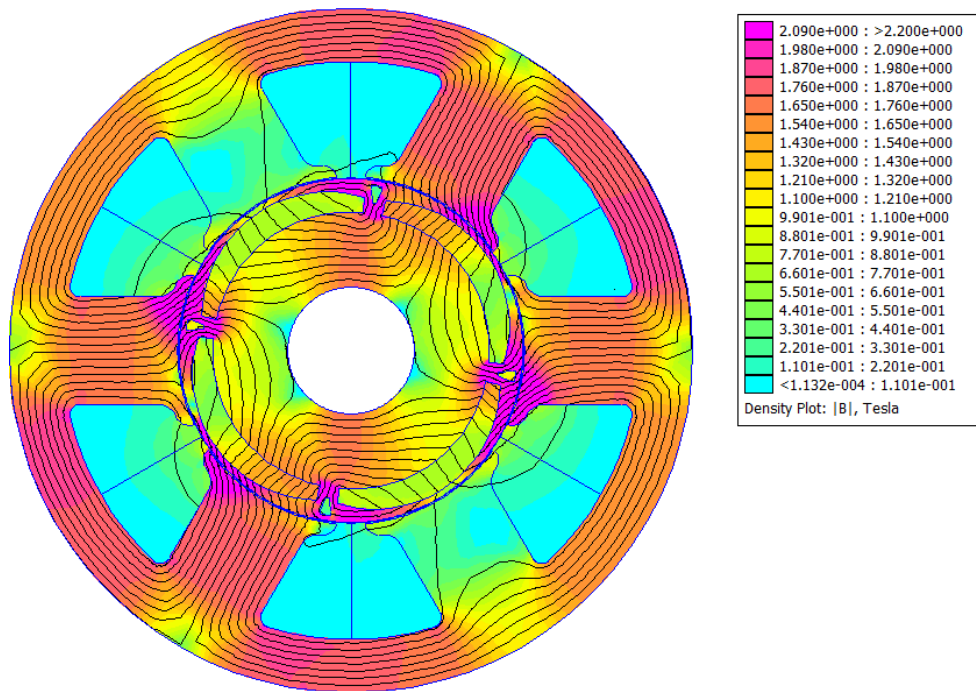
6.2 Ονομαστική κατάσταση λειτουργίας

Στην ονομαστική κατάσταση και οι δύο κινητήρες αποδίδουν ροπή 220Nm σε ταχύτητα περιστροφής 2000 στροφές ανά λεπτό.

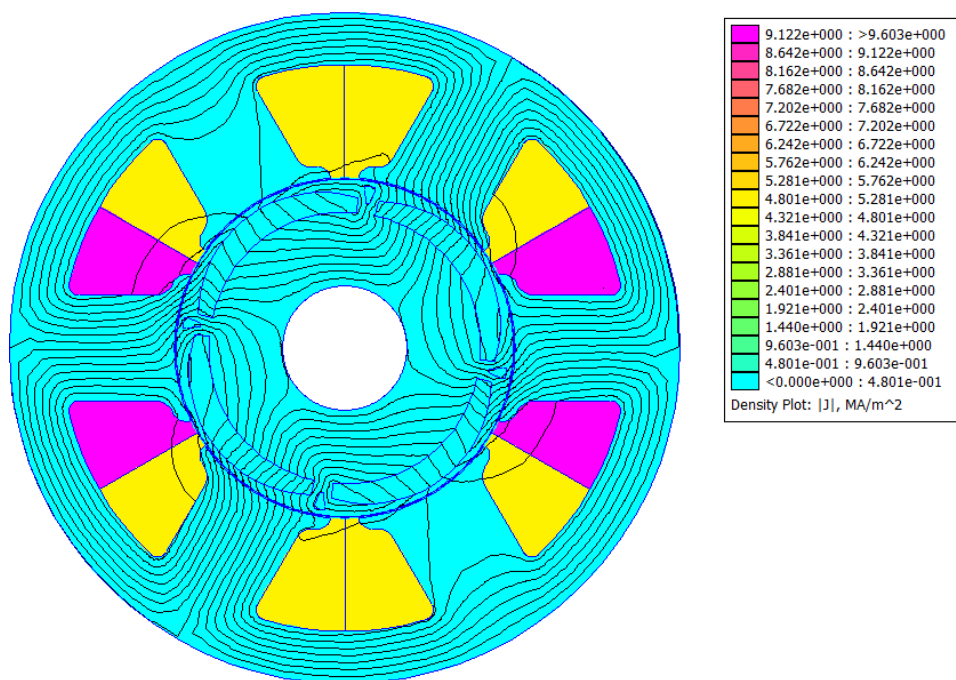
Για τον σύγχρονο κινητήρα μονίμων μαγνητών, έτσι ώστε να πιάσει το σχεδιαστικό στόχο των 220Nm, εφαρμόζεται στις άυλακες του στάτη πυκνότητα ρεύματος $J= 9.7A/mm^2$.

Η πυκνότητα ρεύματος αυτή, παρότι εξαιρετικά υψηλή, θεωρείται αποδεκτή καθώς ο κινητήρας αυτός χρησιμοποιεί εξειδικευμένες μεθόδους εξαναγκασμένης ψύξης, που επιτρέπουν πυκνότητα ρεύματος μεγαλύτερη των $4A/mm^2$.

Στο σχήμα 6.2 φαίνονται οι φορτίσεις του κινητήρα κατά την ονομαστική λειτουργία, όπως προέκυψαν από το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.



(α)



(β)

Σχήμα 6.2: Μέτρο μαγνητικής επαγωγής **(α)** και πυκνότητα ρεύματος **(β)** κινητήρα μόνιμων μαγνητών κατά την ονομαστική κατάσταση

6.2.1 Απώλειες και απόδοση

Οι απώλειες του κινητήρα επαγωγής στην ονομαστική κατάσταση έχουν υπολογιστεί και είναι:

Απώλειες χαλκού στάτη : $P_{Cu\text{stator}} = 967.8 \text{ W}$

Απώλειες χαλκού δρομέα : $P_{Cu\text{rotor}} = 134.37 \text{ W}$

Απώλειες σιδήρου : $P_{Fe} = 123.66 \text{ W}$

Επίσης θεωρούνται μηχανικές απώλειες $P_{m,loss}$ τριβών, ανεμισμού και διαφεύγουσες, 2% της ισχύος εξόδου.

Έτσι, η απόδοση της μηχανής είναι : $\eta = 0.9603$ ή **96.3%**

Έπειτα, υπολογίζονται οι απώλειες για τον κινητήρα μόνιμων μαγνητών:

Απώλειες χαλκού στάτη

Ορίζουμε τα παρακάτω μεγέθη για την αναλυτική επεξήγηση των διαδικασιών.

- Αριθμός πόλων κινητήρα : $p = 4$
- Αριθμός σπειρών ανά πηνίο: $N = 12$
- Ενεργό μήκος κινητήρα : $L = 150mm$
- Εμβαδόν αύλακας στάτη: $S_{slot} = 625.28 mm^2$
- Συντελεστής πληρότητας τυλίγματος : $ff = 0.7$

Το τμήμα της αύλακας που θα καλύπτεται από χαλκό είναι:

$$S_{cu} = S_{slot} \cdot ff \quad (6.1)$$

Το εμβαδό αυτο, εάν διαιρεθεί με τον αριθμό των σπειρών δίνει τη διατομή του κλώνου χαλκού που χρησιμοποιείται για την περιέλιξη:

$$S_{wire} = \frac{S_{cu}}{N} \quad (6.2)$$

Το μέσο μήκος μιας σπείρας είναι το μήκος που αν πολλαπλασιαστεί με τον αριθμό των σπειρών, δίνει το συνολικό μήκος χαλκού ενός πηνίου του στάτη. Το μέσο μήκος σπείρας ισούται με το διπλάσιο του ενεργού μήκους του κινητήρα συν το διπλάσιο του μήκους κεφαλής τυλίγματος. Στην περίπτωση του πλήρους βήματος το μήκος κεφαλής υπολογίζεται ως συνάρτηση των πόλων και της μέσης ακτίνας αύλακας.

Το μήκος μιας σπείρας εκτός ενεργού μήκους είναι:

$$l_{ends} = \frac{2\pi}{p} \cdot \overline{R_{slot}} \quad (6.3)$$

,όπου $\overline{R_{slot}}$ η μέση ακτίνα της αύλακας κατά την περιστροφή της κεφαλής

Άρα, το μέσο μήκος μια σπείρας είναι ίσο με:

$$\overline{l_w} = 2 \cdot olf \cdot l_{ends} + 2 \cdot L \quad (6.4)$$

,όπου $olf=1.2$, ο συντελεστής πλέξης πηνίου,

Το μήκος του αγωγού μιας φάσης είναι:

$$l_{w_phase} = N_c \cdot \overline{l_w} \quad (6.5)$$

,όπου N_c ο αριθμός σπειρών ανά φάση

Έτσι, η αντίσταση του στάτη της μηχανής είναι:

$$R_{w_phase} = \frac{\rho \cdot l_{w_phase}}{S_{wire}} \quad (6.6)$$

Οι απώλειες χαλκού προκύπτουν από τη γνωστή σχέση:

$$P_{cu} = 3 \cdot I^2 \cdot R_{w_phase} \quad (6.7)$$

,όπου $I = J \cdot S_{wire}$.

Έτσι, υπολογίζονται οι απώλειες χαλκού για τον κινητήρα M.M.

$$P_{cu} = 644.5 \text{ W}$$

Απώλειες σιδήρου

Οι απώλειες σιδήρου της σύγχρονης μηχανής M.M. υπολογίζονται όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.3.3, και βρέθηκαν ίσες με:

$$P_{Fe} = 99.75 \text{ W}$$

Λοιπές απώλειες

Όπως και στον κινητήρα επαγωγής, θεωρούνται μηχανικές απώλειες $P_{m,loss}$ τριβών, ανεμισμού και διαφεύγουσες, 2% της ισχύος εξόδου.

Προκύπτει, λοιπόν, για τις δύο τοπολογίες η σύγκριση των απωλειών και της απόδοσης, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

	Κινητήρας επαγωγής	Σύγχρονος κινητήρας M.M.
Απώλειες χαλκού	1102.17 W	644.5 W
Απώλειες σιδήρου	123.7 W	99.75 W
Απόδοση	96.03%	96.51%

Πίνακας 6.1: Απώλειες και απόδοση των δύο μηχανών

Διαπιστώνεται πως ο κινητήρας μονίμων μαγνητών έχει ελαφρώς μεγαλύτερη απόδοση από τον κινητήρα επαγωγής, αλλά και οι δύο μηχανές κρίνονται εξαιρετικά αποδοτικές.

6.2.2 Συντελεστής πυκνότητας ροπής

Ο συντελεστής πυκνότητας ροπής δίνεται από τη σχέση $T_{em} / \sqrt{P_{cu}}$

, όπου T_{em} η ηλεκτρομαγνητική ροπή του κινητήρα και P_{cu} οι απώλειες χαλκού.

Ο συντελεστής αυτός εκφράζει τη δυνατότητα της μηχανής να μετατρέπει την ηλεκτρική τροφοδοσία σε μηχανική ροπή με αποδοτικό τρόπο.

Για τις δυο τοπολογίες έχουμε τους συντελεστές:

Κινητήρας επαγωγής : **6.7325**

Σύγχρονος κινητήρας M.M.: **8.667**

Παρατηρείται λοιπόν πως ο δεύτερος κινητήρας είναι καλύτερος υπό τη διερεύνηση αυτή σε σχέση με τον πρώτο. Αυτό μπορεί να ερμηνευθεί σε ένα βαθμό από τις μειωμένες απώλειες χαλκού, παρά την αυξημένη πυκνότητα ρεύματος, χάρη στις μεγάλες αύλακες στάτη της τοπολογίας, που επιτρέπουν τη χρήση αγωγών μεγάλου πάχους και επιφέρουν εν τέλει μικρότερη αντίσταση τυλίγματος.

6.2.3 Πυκνότητα ισχύος

Η πυκνότητα ισχύος είναι ένας δείκτης της αποδοτικότητας μιας ηλεκτρικής μηχανής όταν υπάρχει ο περιορισμός του μεγέθους. Δύο γεωμετρικά όμοιες μηχανές μπορούν να συγκριθούν ως προς την αποδοτικότητά τους με κριτήριο την παραγόμενη ισχύ και αντίστροφα, δύο μηχανές με ίδια ισχύ εξόδου συγκρίνονται με βάση το βάρος τους.

Προσδιορίζεται διαιρώντας τη μηχανική ισχύ εξόδου με το συνολικό βάρος του ενεργού μέρους της μηχανής και έχει τιμή σε kW/kg.

Για τις δυο τοπολογίες, υπολογίζοντας το συνολικό βάρος τους, προέκυψε:

Κινητήρας επαγωγής : **0.565 kW/kg**

Σύγχρονος κινητήρας M.M.: **1.245 kW/kg**

Όπως ήταν αναμενόμενο, η πυκνότητα ισχύος για τον κινητήρα μόνιμων μαγνητών είναι πολύ μεγαλύτερη από τον κινητήρα επαγωγής. Αυτό συμβαίνει για δύο κυρίως λόγους: αφενός η πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα του στάτη της μηχανής M.M. είναι πολύ μεγαλύτερη, 'πιέζοντας' έτσι τη λαμαρίνα της μηχανής και αυξάνοντας την παραγόμενη ροπή για δεδομένο μέγεθος, αφετέρου λόγω των μόνιμων μαγνητών που φέρει στο δρομέα, οι οποίοι μειώνουν το συνολικό μέγεθος της μηχανής, αφού δε χρειάζονται αύλακες στο δρομέα όπως στη μηχανή επαγωγής, και αυξάνουν την πυκνότητα ισχύος.

6.3 Λειτουργία εξασθένησης πεδίου

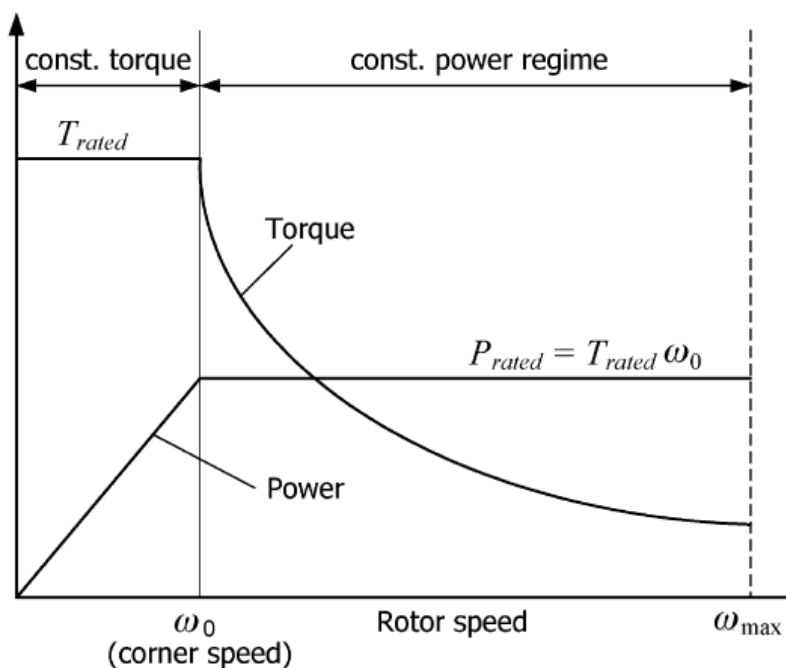
Στην ενότητα αυτή οι δύο μηχανές καλούνται να λειτουργήσουν σε ταχύτητες μεγαλύτερες από την ονομαστική, ώστε να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες υπερτάχυνσης του ηλεκτρικού οχήματος της εφαρμογής.

Η εξασθένηση πεδίου (field weakening), είναι μια λειτουργία ελέγχου που επιβάλλεται στη μηχανή σε συνθήκες μέγιστης τάσης τροφοδοσίας από την έξοδο του αντιστροφέα, και σε ταχύτητες μεγαλύτερες της ταχύτητας βάσης.

Ως ταχύτητα βάσης του κινητήρα ορίζουμε την ταχύτητα εκείνη, μέχρι την οποία η μηχανή είναι σε θέση να αποδίδει την ονομαστική της ροπή. Στο σημείο αυτό, η τάση ακροδεκτών ισούται με τη μέγιστη τάση που μπορεί να παρέχει ο αντιστροφέας, ενώ το ρεύμα λαμβάνει επίσης την ονομαστική του τιμή. Όσο η μηχανή λειτουργεί σε ταχύτητα χαμηλότερη της βασικής, τόσο η τάση ακροδεκτών των μπαταριών, όσο και η ισχύς εξόδου αυξάνονται γραμμικά, ενώ το ρεύμα στάτη παραμένει πάντα ονομαστικό.

Καθώς η ταχύτητα αυξάνει σε τιμές μεγαλύτερες της βασικής, και δεδομένου ότι επιθυμούμε σταθερή ισχύ εξόδου, είμαστε υποχρεωμένοι να μειώσουμε τη ροπή σύμφωνα με τη σχέση ($P=T \cdot \omega$).

Έτσι η οδήγηση του κινητήρα μπορεί να χωριστεί σε δύο διακριτές περιοχές: την περιοχή σταθερής ροπής (**constant torque region**), που φτάνει μέχρι τη βασική ταχύτητα, και την περιοχή σταθερής ισχύος (**constant power region**) που ξεκινά από τη βασική και φτάνει μέχρι τη μέγιστη ταχύτητα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2 [20]:



Σχήμα 6.2: Ροπή και ισχύς σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής [21]

Σε ταχύτητες μεγαλύτερες της βασικής, χρειάζεται να επιβληθεί κατάλληλος έλεγχος για την απομείωση της ροπής.

Ο τρόπος που επιτυγχάνεται αυτό καθώς και οι σχέσεις που διέπουν τη λειτουργία των δύο κινητήρων κατά την εξασθένιση πεδίου αναλύεται παρακάτω.

6.3.1 Σύγχρονος κινητήρας μόνιμων μαγνητών

Παρακάτω παρουσιάζεται το μαθηματικό μοντέλο της μηχανής μόνιμων μαγνητών, με βάση το οποίο θα γίνει η ανάλυση κατά τη λειτουργία εξασθένισης πεδίου για την εξαγωγή των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν.

Σε μια μηχανή με τύλιγμα στο δρομέα, θα μπορούσαμε εύκολα να μειώσουμε το ρεύμα διέγερσης, και να εξασθενήσουμε έτσι το αντίστοιχο πεδίο, και τελικά τη ροπή. Στις μηχανές μόνιμων μαγνητών όμως, η διέγερση του δρομέα είναι σταθερή, και το αντίστοιχο πεδίο δεν μπορεί να απομειωθεί από μόνο του, παρά μόνο από κάποιο άλλο πεδίο αντίθετης φοράς.

Το πεδίο αυτό, θα προέρχεται από το τύλιγμα οπλισμού, και θα προκύπτει με την επιβολή ρεύματος στάτη με αρνητική d συνιστώσα έτσι ώστε η μαγνητική ροή στάτη να αντιτίθεται σε αυτή του μόνιμου μαγνήτη.

Το πλαίσιο αναφοράς d-q

Πριν προταθεί ο μετασχηματισμός του Park (1929), η αναλυτική περιγραφή μιας τριφασικής μηχανής ac, απαιτούσε την επίλυση σύνθετων διαφορικών εξισώσεων με ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενες ποσότητες (ρεύματα, τάσεις, πεπλεγμένες ροές). Ο μετασχηματισμός του Park επιτρέπει τη μεταφορά αυτών των χρονικά μεταβαλλόμενων ποσοτήτων από το ακίνητο πλαίσιο του στάτη, στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα.

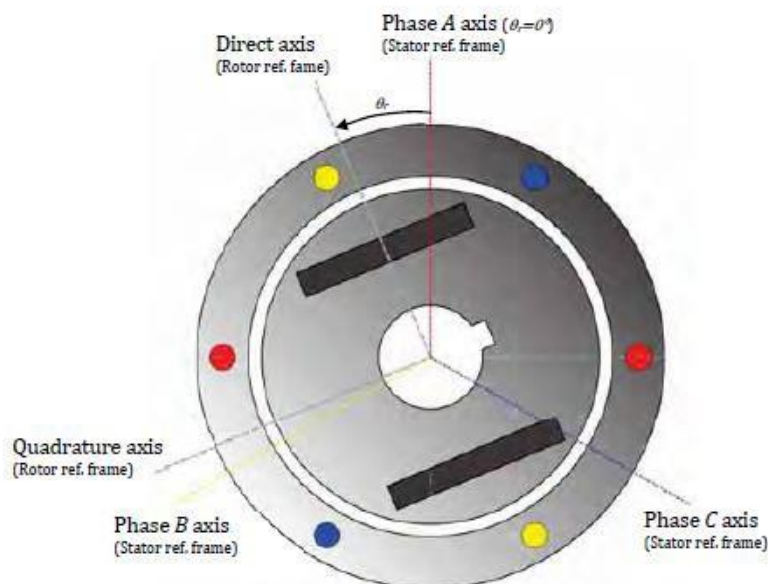
Η μήτρα του μετασχηματισμού Park, η οποία πολλαπλασιάζει τα τριφασικά μεγέθη για να προκύψουν ποσότητες d-q, παρουσιάζεται παρακάτω:

$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται η μετατροπή των τριφασικών μεγεθών σε ποσότητες DC ευθέως (d-axis) και εγκάρσιου (q-axis) άξονα. Οι δύο αυτοί άξονες ορίζονται ως εξής:

- Ο **d-άξονας** ή **άξονας ροής**, ευθυγραμμίζεται με το μαγνητικό άξονα της φάσης A του τυλίγματος στάτη.
- Ο **q-άξονας** είναι μετατοπισμένος κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες σε σχέση με τον d-άξονα.

Στο σχήμα 6.3 φαίνεται μια διπολική IPM μηχανή, στην οποία είναι σχεδιασμένοι οι άξονες του d-q πλαισίου αναφοράς.



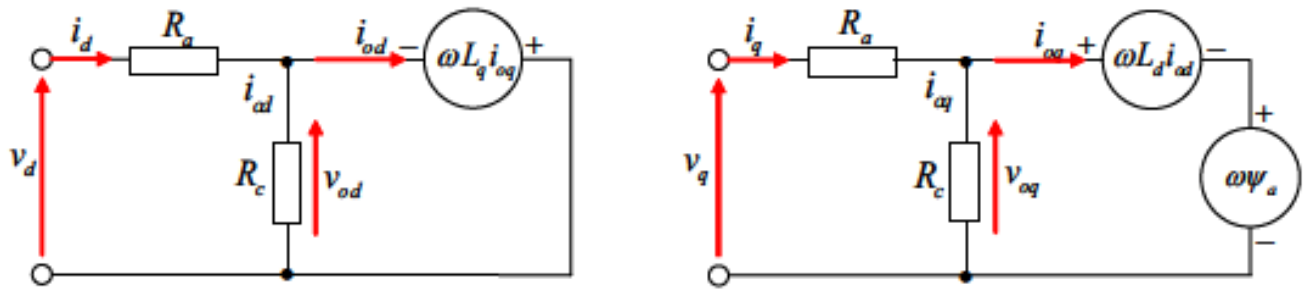
Σχήμα 6.3: Το d-q πλαίσιο αναφοράς [21]

Η ανάλυση που ακολουθεί, χρησιμοποιεί το μετασχηματισμό σε στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς, προκειμένου να εξαχθεί το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα, και οι αναλυτικές σχέσεις περιγραφής της μηχανής Μ.Μ.

Ισοδύναμο κύκλωμα

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα που προκύπτει από τη μαθηματική μοντελοποίηση της μηχανής Μ.Μ. στο d-q πλαίσιο αναφοράς[21].

Στο σχήμα 6.4a παρουσιάζεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα για τον d-άξονα, ενώ στο σχήμα 6.4b παρουσιάζεται το αντίστοιχο κύκλωμα για τον q-άξονα της μηχανής.



(a)

(b)

Σχήμα 6.4: Ισοδύναμο κύκλωμα d-άξονα (a) και q-άξονα (b) μηχανής IPM. [21]

Όπου :

- V_d, V_q οι φασικές τάσεις εισόδου d-άξονα και q-άξονα αντίστοιχα.
- i_d, i_q τα ρεύματα d-άξονα και q-άξονα αντίστοιχα.
- L_d, L_q οι αυτεπαγωγές d-άξονα και q-άξονα αντίστοιχα.
- η ισοδύναμη αντίσταση R_c , χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση των απωλειών σιδήρου.
- I_{cd}, i_{cq} τα ρεύματα απωλειών πυρήνα d-άξονα και q-άξονα αντίστοιχα.
- R_a η ισοδύναμη ανά φάση αντίσταση.
- ω είναι η γωνιακή συχνότητα.
- ψ_a ή Φ_{mag} είναι η ροή του μόνιμου ανά πόλο.

Αναλυτικές σχέσεις μηχανής IPM

Αγνοώντας τον κλάδο των απωλειών πυρήνα, η κυκλωματική ανάλυση διευκολύνεται σημαντικά, και προκύπτει τελικά η αναλυτική περιγραφή του συστήματος, με τη χρήση των βασικών νόμων του Kirchhoff.

Προκύπτουν έτσι οι ακόλουθες σχέσεις:

$$V_d = R_a I_d - \omega \Phi_q = R_a I_d - \omega L_q I_q \quad (6.8)$$

$$V_q = R_a I_q + \omega \Phi_d = R_a I_q + \omega L_d I_d + \omega \Phi_{mag} \quad (6.9)$$

Όπου:

$$I_d = -I_a \sin \gamma \quad (6.10)$$

$$I_q = I_a \cos \gamma \quad (6.11)$$

β η γωνία μεταξύ του διανύσματος του ρεύματος στάτη και του q-άξονα.

$$\Phi_d = L_d I_d + \Phi_{mag} \quad (6.12)$$

$$\Phi_q = L_q I_q \quad (6.13)$$

Τα ρεύματα και οι τάσεις d-άξονα και q-άξονα, μπορούν να υπολογιστούν από τη θεμελιώδη πολική τάση και το ρεύμα οπλισμού που υπολογίζονται από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Femm, ή μπορούν να μετρηθούν σε μια φυσική πειραματική διάταξη. Ισχύουν κατά τα γνωστά οι σχέσεις:

$$V_a = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (6.14)$$

$$I_a = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (6.15)$$

Οι αυτεπαγωγές L_d, L_q και η ροή του μόνιμου μαγνήτη Φ_{mag} μπορούν να υπολογιστούν εύκολα από το Femm, αν προσομοιώσουμε διαδοχικά τη λειτουργία της μηχανής με ρεύμα μόνο d- άξονα, q-άξονα και σε κενό φορτίο, αντίστοιχα.

Χρειάζεται να επισημάνουμε στο σημείο αυτό ότι τόσο οι αυτεπαγωγές L_d, L_q όσο και η ροή μαγνήτη Φ_{mag} , δεν αποτελούν σταθερές παραμέτρους της μηχανής. Συγκεκριμένα, οι αυτεπαγωγές μεταβάλλονται ανάλογα με το φορτίο της μηχανής, και τείνουν γενικά να μειώνονται, καθώς το ρεύμα οπλισμού (στάτη) αυξάνει. Η ροή μαγνήτη επίσης μεταβάλλεται με το φορτίο, καθώς σε συνθήκες υψηλού φορτίου επέρχεται μαγνητικός κορεσμός στον πυρήνα της μηχανής.

Με τις ποσότητες αυτές γνωστές, μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε τη ροπή σύμφωνα με τη σχέση:

$$T = p \Phi_{mag} I_q + p (L_d - L_q) I_d I_q \quad (6.16)$$

Όπου με p συμβολίζουμε τα ζεύγη πόλων της μηχανής.

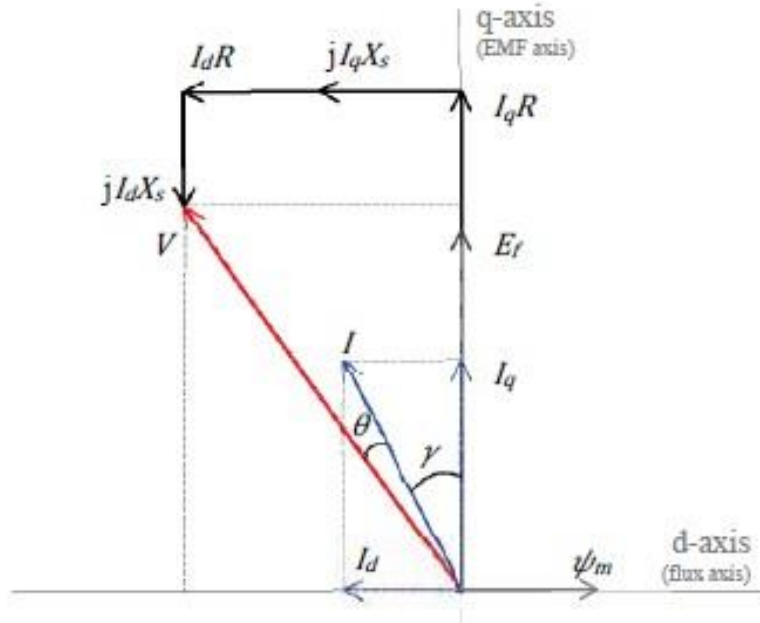
Παρατηρούμε ότι η αναλυτική σχέση της ροπής αποτελείται από 2 όρους:

- **ο πρώτος όρος** αφορά τη ροπή μαγνήτισης (**magnet torque**) και είναι ανάλογος της ροής του μόνιμου μαγνήτη, του αριθμού των πόλων της μηχανής και του ρεύματος του q-άξονα.
- **Ο δεύτερος όρος** αφορά τη ροπή ευθυγράμμισης (**reluctance torque**), και είναι ανάλογος των ρευμάτων του d-q πλαισίου αναφοράς, του αριθμού των πόλων και της διαφοράς ($L_d - L_q$) των αυτεπαγωγών της μηχανής. Παρατηρούμε επομένως ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ανισοτροπία του δρομέα, η διαφορά ($L_d - L_q$) αυξάνει σε απόλυτη τιμή, αυξάνοντας έτσι και την ικανότητα παραγωγής ροπής ευθυγράμμισης για τη μηχανή. Σημειώνουμε ότι προκειμένου η ροπή ευθυγράμμισης να προστείθεται στη ροπή μαγνήτισης, χρειάζεται το ρεύμα i_d να είναι αρνητικό, καθώς στις μηχανές IPM ισχύει γενικά :

$$L_d < L_q \quad (6.17)$$

Διανυσματικό διάγραμμα μηχανής IPM

Παρουσιάζεται στη συνέχεια το διανυσματικό διάγραμμα που προκύπτει για τη μηχανή M.M., με βάση τις παραπάνω αναλυτικές σχέσεις.



Σχήμα 6.5: Διανυσματικό διάγραμμα μηχανής M.M. [21]

Παρατηρούμε τα εξής:

- Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση \mathbf{R}_a του ισοδύναμου κυκλώματος, έχει αναλυθεί στο διανυσματικό διάγραμμα σε μια ωμική συνιστώσα \mathbf{R} και σε μια επαγωγική \mathbf{X}_s .
- το ρεύμα i_d λαμβάνει πράγματι **αρνητικές τιμές**. Η φυσική σημασία του αρνητικού προσήμου είναι ότι τα κύματα ΜΕΔ που παράγει αυτή η συνιστώσα του ρεύματος, αντιτίθενται στο πεδίο του μόνιμου μαγνήτη και τείνουν να το συμπίεσουν.

Γίνεται εμφανής ο ρόλος της **γωνίας γ** . Σε ταχύτητες μικρότερες της βασικής, η γωνία θα πρέπει να λαμβάνει τιμές κοντά στο μηδέν. Όμως κατά τον έλεγχο εξασθένισης πεδίου, η γωνία γ θα πρέπει να λαμβάνει αρκετά μεγάλες τιμές, έτσι ώστε να απομειώνεται η q-συνιστώσα του ρεύματος στάτη, και να ενισχύεται η επιθυμητή d-συνιστώσα, η οποία τείνει να συμπίεσει το πεδίο μαγνήτη.

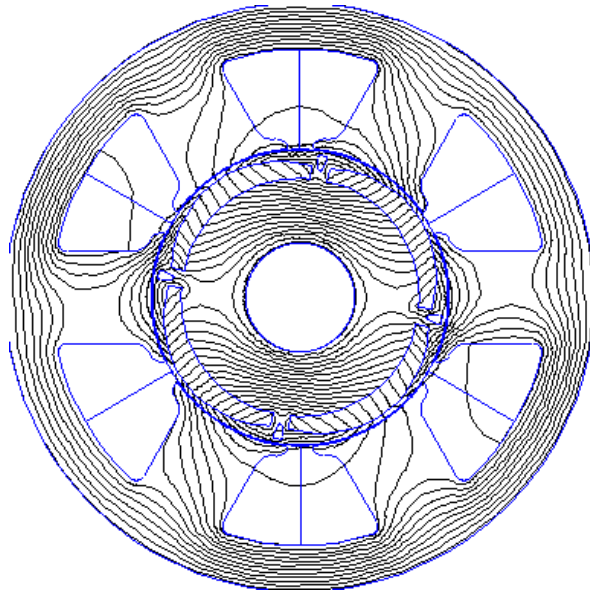
Υπολογισμός αυτεπαγωγών d-q άξονα

Στο σημείο αυτο υπολογίζονται οι αυτεπαγωγές των αξόνων d,q καθώς και η ροή των μαγνητών.

- **Υπολογισμός ροής μαγνήτη Φ_{mag}**

Για να υπολογίσουμε τη ροή του μαγνήτη μηδενίζουμε τα ρεύματα στο στάτη, ώστε η μηχανή να λειτουργεί εν κενώ. Στη συνέχεια, μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων υπολογίζεται η πεπλεγμένη ροή.

Η κατανομή του μαγνητικού πεδίου στη λειτουργία εν κενώ φαίνεται στο Σχήμα 6.6:



Σχήμα 6.6: Κατανομή του μαγνητικού πεδίου στην εν κενώ λειτουργία

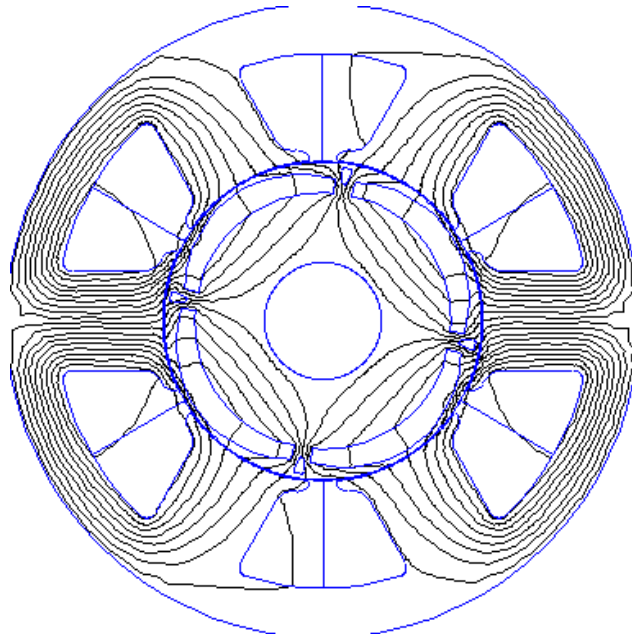
Τελικά υπολογίστηκε:

$$\Phi_{\text{mag}} = 0.2155 \text{ Wb} \cdot \text{turns} \quad (6.18)$$

- **Υπολογισμός αυτεπαγωγής ευθέως άξονα, L_d**

Για τον υπολογισμό της αυτεπαγωγής L_d , ο μαγνητικός άξονας της φάσης A ευθυγραμμίζεται με το d-άξονα της μηχανής. Έτσι, το ρεύμα της φάσης A γίνεται μέγιστο, ενώ των φάσεων B και C θα είναι το μισό σε μέγεθος και αντίθετου προσήμου. Επίσης, ο μαγνήτης της μηχανής αφαιρείται.

Η κατανομή του μαγνητικού πεδίου κατά τη λειτουργία αυτή φαίνεται στο Σχήμα 6.7:



Σχήμα 6.7: Κατανομή του μαγνητικού πεδίου κατά τον υπολογισμό της αυτεπαγωγής ευθέως άξονα

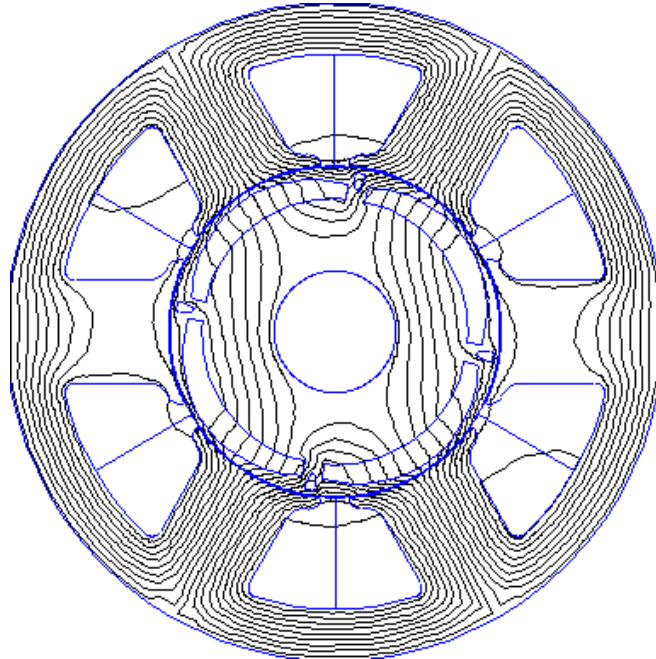
Υπολογίζοντας την πεπλεγμένη ροή, μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, προκύπτει η αυτεπαγωγή ευθέως άξονα, ως εξής:

$$L_d = \frac{\Psi_d}{I_d} = 4.5 \text{ mH} \quad (6.19)$$

- **Υπολογισμός αυτεπαγωγής εγκάρσιου άξονα, L_d**

Για τον υπολογισμό της αυτεπαγωγής L_q , ο μαγνητικός άξονας της φάσης A ευθυγραμμίζεται με το q-άξονα της μηχανής. Έτσι, το ρεύμα της φάσης A τίθεται ίσο με μηδέν, ενώ για τις φάσεις B και C ισχύει: $I_b = -I_c = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_n$. Επίσης, όμοια με πριν, ο μαγνήτης της μηχανής αφαιρείται.

Η κατανομή του μαγνητικού πεδίου κατά τη λειτουργία αυτή φαίνεται στο Σχήμα 6.8:



Σχήμα 6.8: Κατανομή του μαγνητικού πεδίου κατά τον υπολογισμό της αυτεπαγωγής εγκάρσιου άξονα

Υπολογίζοντας την πεπλεγμένη ροή, μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, προκύπτει η αυτεπαγωγή εγκάρσιου άξονα, ως εξής:

$$L_q = \frac{\Psi_q}{I_q} = 6.16 \text{ mH} \quad (6.19)$$

Όπως αναμέναμε, η αυτεπαγωγή του q-άξονα είναι μεγαλύτερη από την αυτεπαγωγή του d-άξονα.

Στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός των ρευμάτων ευθέως και εγκάρσιου άξονα, που πρέπει να επιβληθούν στον κινητήρα, ώστε αυτός να λειτουργήσει για ταχύτητα 3500 ΣΑΛ και 5000 ΣΑΛ. Επιπλέον, για κάθε μία από τις λειτουργικές αυτές καταστάσεις υπολογίζεται η απόδοση της μηχανής και παρατίθενται στιγμιότυπα της κατανομής του μαγνητικού πεδίου

- **Ταχύτητα περιστροφής 3500rpm**

Με βάση τις σχέσεις (6.8), (6.9) και (6.14)-(6.16) υπολογίστηκαν τα ρεύματα (σε peak τιμές) $I_d = 180\text{A}$ και $I_q = 110\text{A}$. Από το Σχήμα 6.5 εύκολα εξάγεται ότι:

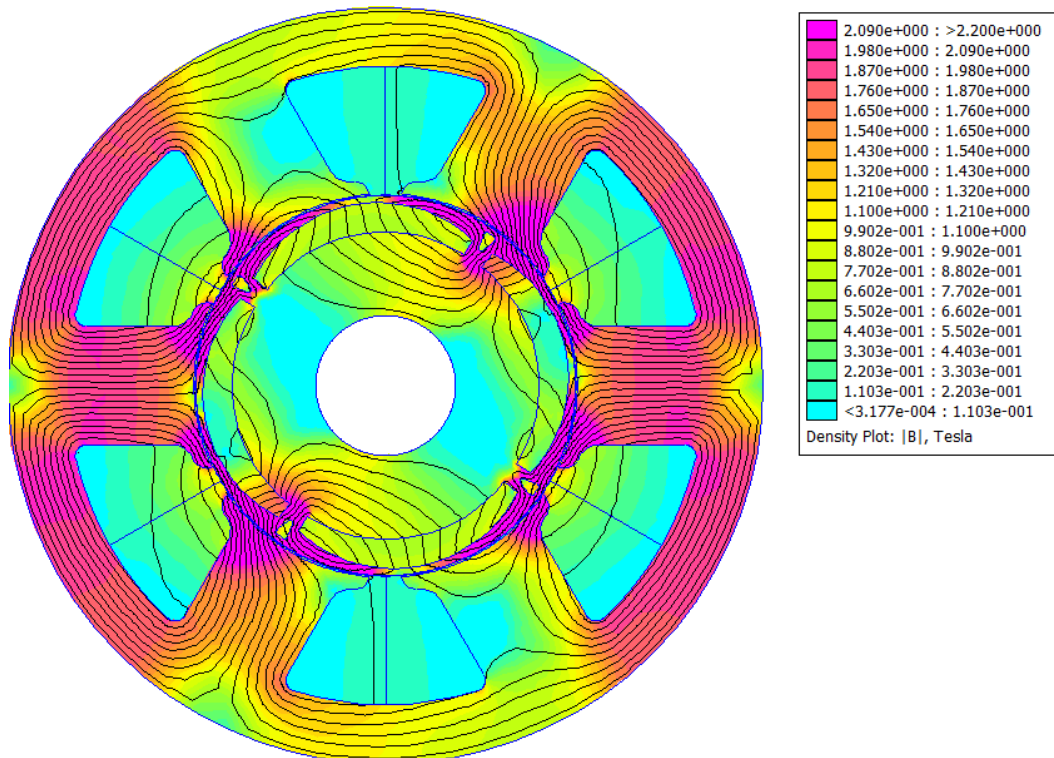
$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{I_d}{I_q}\right) \quad (6.20)$$

Έτσι, προκύπτει η γωνία $\gamma=58.6^\circ$.

Η γωνία αυτή είναι συμπληρωματική της γωνίας ροπής δ και ισχύει:

$$\delta = 90^\circ - \gamma \quad (6.21)$$

Βλέπουμε, δηλαδή, πως η γωνία ροπής μετατοπίζεται από το σημείο μέγιστης ροπής, όπως αυτό υπολογίζεται στην παράγραφο 4.1.1, και πλέον ο κινητήρας λειτουργεί σε μία υποβέλτιστη γωνία ροπής. Προσομοιώνοντας την κατάσταση αυτή στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για λειτουργία εξασθένισης πεδίου, προκύπτει η κατανομή του πεδίου, όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 6.9: Κατανομή του μαγνητικού πεδίου της μηχανής για λειτουργία στις 3500 ΣΑΛ

Η ροπή της μηχανής κατά την προσομοίωση υπολογίζεται 119Nm, πολύ κοντά σε αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των ρευμάτων με αναλυτικές σχέσεις, ήτοι 125.5Nm. Η ροπή αυτή είναι πολύ χαμηλότερη από την ονομαστική, καθώς βρισκόμαστε πλέον στην περιοχή σταθερής ισχύος, όπου ο κινητήρας καλείται να μειώσει τη ροπή ώστε να επιταχύνει.

Έπειτα, υπολογίζονται οι απώλειες του κινητήρα για την κατάσταση αυτή και είναι:

$$\text{Απώλειες χαλκού : } P_{Cu} = 927.4 \text{ W}$$

$$\text{Απώλειες σιδήρου : } P_{Fe} = 623.9 \text{ W}$$

Προκύπτει λοιπόν η απόδοση του κινητήρα M.M. στις 3500 στροφές ανά λεπτό:

$$\eta = 94.9 \%$$

Παρατηρείται αύξηση των απωλειών χαλκού, που οφείλεται στην αύξηση του μέτρου του

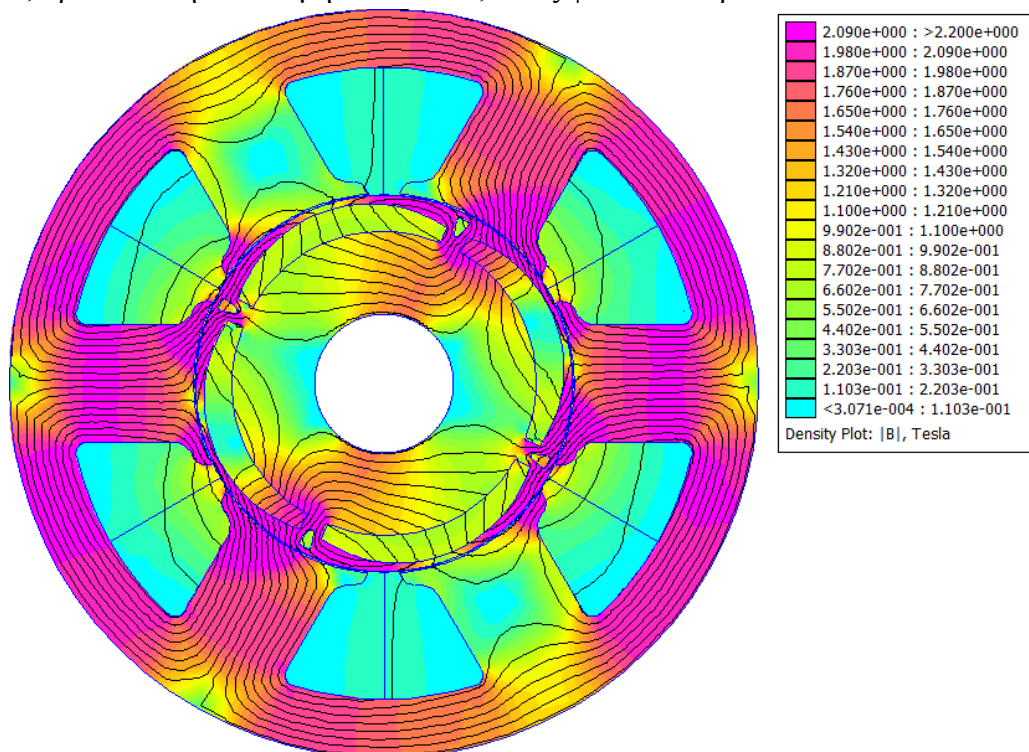
ρεύματος στάτη πάνω από την ονομαστική του τιμή, ενώ και οι απώλειες σιδήρου αυξάνονται για τον ίδιο λόγο, καθώς και λόγω αύξησης της ηλεκτρικής συχνότητας.

- **Ταχύτητα περιστροφής 5000rpm**

Όμοια με πριν, υπολογίστηκαν τα ρεύματα (σε peak τιμές) $I_d = 195A$ και $I_q = 75A$.

Έτσι, προκύπτει η γωνία $\gamma = 69^\circ$.

Αντίστοιχα με προηγουμένως, η γωνία ροπής μετατοπίζεται από το σημείο μέγιστης ροπής και πλέον ο κινητήρας λειτουργεί σε μία νέα υποβέλτιστη γωνία ροπής. Προσομοιώνοντας την κατάσταση αυτή στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για λειτουργία εξασθένισης πεδίου, προκύπτει η κατανομή του πεδίου, όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 6.10: Κατανομή του μαγνητικού πεδίου της μηχανής για λειτουργία στις 5000 ΣΑΛ

Η ροπή της μηχανής κατά την προσομοίωση υπολογίζεται 80.8Nm, πολύ κοντά σε αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των ρευμάτων με αναλυτικές σχέσεις, ήτοι 87.9 Nm.

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι απώλειες του κινητήρα για την κατάσταση αυτή και είναι:

$$\text{Απώλειες χαλκού : } P_{Cu} = 942.6 \text{ W}$$

$$\text{Απώλειες σιδήρου : } P_{Fe} = 1063.6 \text{ W}$$

Προκύπτει λοιπόν η απόδοση του κινητήρα M.M. στις 5000 στροφές ανά λεπτό:

$$\eta = 94.02 \%$$

6.3.2 Ασύγχρονος κινητήρας

Για την ανάλυση του ασύγχρονου κινητήρα σε ταχύτητες μεγαλύτερες της ονομαστικής, μέσω της τεχνικής εξασθένησης πεδίου, γίνεται χρήση των παρακάτω εξισώσεων για τον υπολογισμό των ρευμάτων στο d-q πλαίσιο αναφοράς [23]:

$$T_{em} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \cdot \frac{L_M^2}{L_r} \cdot I_q \cdot I_d \quad (6.22)$$

όπου: p ο αριθμός των πόλων της μηχανής

L_M η αντίδραση μαγνήτισης

L_r η αυτεπαγωγή του δρομέα

Επίσης, ισχύει:

$$I_d^2 + I_q^2 = I_{max}^2 \quad (6.23)$$

όπου: I_{max} το μέγιστο ρεύμα του αντιστροφέα

Για την εξασθένηση πεδίου, η πιο σύνηθης τακτική είναι η απομείωση της ροής του δρομέα αντιστρόφως ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής του. Έτσι, για ταχύτητες πάνω από την ονομαστική το ρεύμα του εγκάρσιου άξονα θα είναι ίσο με:

$$I_d = \frac{\omega_{base}}{\omega_r} \cdot I_{dN} \quad (6.24)$$

όπου: ω_{base} η ονομαστική ταχύτητα του δρομέα

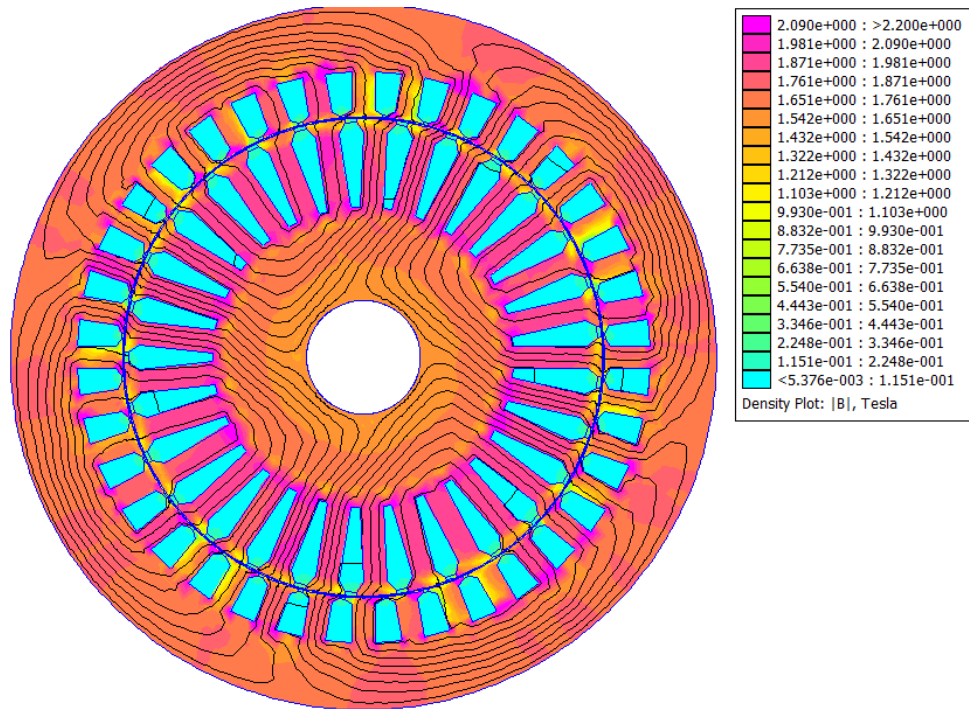
ω_r η ταχύτητα του δρομέα πάνω από την ονομαστική

I_{dN} το ονομαστικό ρεύμα μαγνήτισης

- **Ταχύτητα περιστροφής 3500rpm**

Με βάση τις σχέσεις (6.22), (6.23) και (6.24) υπολογίστηκαν τα ρεύματα (σε peak τιμές) $I_d=92.9A$ και $I_q=199A$.

Προσομοιώνοντας την κατάσταση αυτή στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για λειτουργία εξασθένησης πεδίου, προκύπτει η κατανομή του πεδίου, όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 6.11: Κατανομή του μαγνητικού πεδίου του ασύγχρονου κινητήρα για λειτουργία στις 3500 ΣΑΛ

Η ροπή της μηχανής κατά την προσομοίωση υπολογίζεται 124Nm. Η ροπή αυτή είναι πολύ χαμηλότερη από την ονομαστική, καθώς βρισκόμαστε πλέον στην περιοχή σταθερής ισχύος, όπου ο κινητήρας καλείται να μειώσει τη ροπή ώστε να επιταχύνει. Παρατηρείται ότι ο ασύγχρονος κινητήρας έχει ελαφρώς μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής ροπής από τον σύγχρονο κινητήρα M.M.

Έπειτα, υπολογίζονται οι απώλειες του κινητήρα για την κατάσταση αυτή και είναι:

Απώλειες χαλκού στάτη : $P_{Cu\text{stator}} = 976.2 \text{ W}$

Απώλειες χαλκού δρομέα : $P_{Cu\text{rotor}} = 94.7 \text{ W}$

Απώλειες σιδήρου : $P_{Fe} = 135.1 \text{ W}$

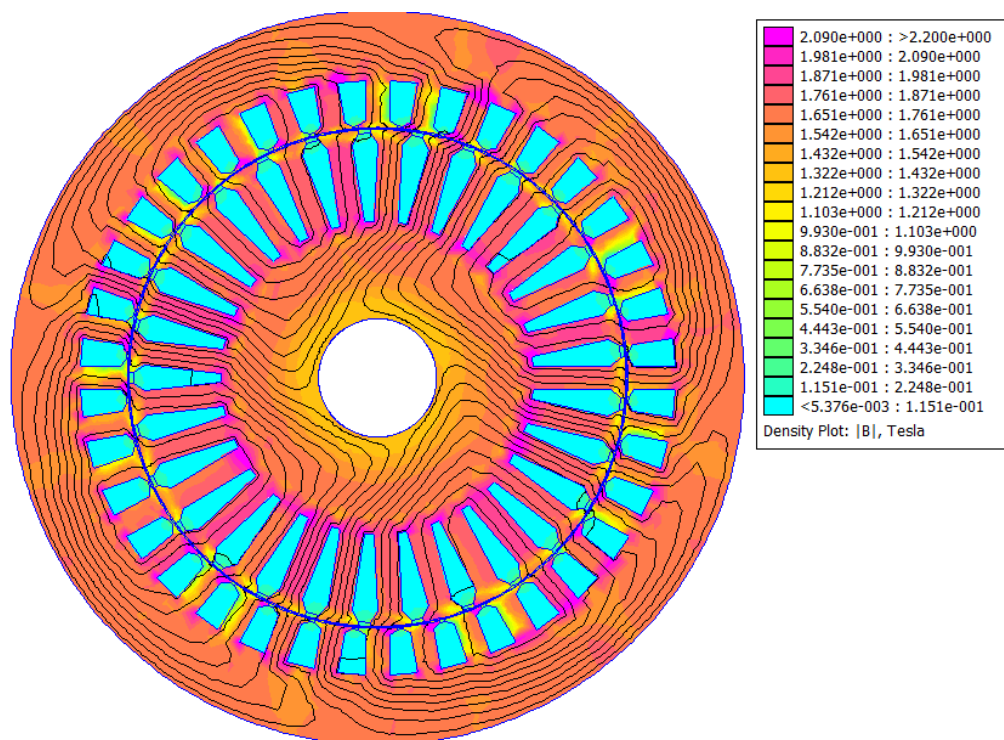
Προκύπτει λοιπόν η απόδοση του ασύγχρονου κινητήρα στις 3500 στροφές ανά λεπτό:

$$\eta = 95.78 \%$$

- **Ταχύτητα περιστροφής 5000rpm**

Όμοια με πριν, υπολογίστηκαν τα ρεύματα (σε peak τιμές) $I_d = 65$ και $I_q = 210\text{A}$.

Προσομοιώνοντας την κατάσταση αυτή στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για λειτουργία εξασθένισης πεδίου, προκύπτει η κατανομή του πεδίου, όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 6.12: Κατανομή του μαγνητικού πεδίου του ασύγχρονου κινητήρα για λειτουργία στις 5000 ΣΑΛ

Η ροπή της μηχανής κατά την προσομοίωση υπολογίζεται 85.2Nm. Και πάλι η παραγόμενη ροπή είναι υψηλότερη από τον σύγχρονο κινητήρα M.M.

Οι απώλειες του κινητήρα για την κατάσταση αυτή και είναι:

Απώλειες χαλκού στάτη : $P_{Cu\text{stator}} = 984.6 \text{ W}$

Απώλειες χαλκού δρομέα : $P_{Cu\text{rotor}} = 86.3 \text{ W}$

Απώλειες σιδήρου : $P_{Fe} = 128.3 \text{ W}$

Προκύπτει λοιπόν η απόδοση του ασύγχρονου κινητήρα στις 5000 στροφές ανά λεπτό:

$$\eta = 95.8 \%$$

Συμπεράσματα

Παρατηρείται ότι σε ταχύτητες πάνω από την ονομαστική ο κινητήρας επαγωγής είναι πιο αποδοτικός από τον σύγχρονο κινητήρα M.M., καθώς οι φορτίσεις της σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας του παραμένουν σε χαμηλό σημείο, ενώ παρουσιάζει και μεγαλύτερη παραγόμενη ροπή.

Γενικά, αποδεικνύεται η μεγάλη δυνατότητα εξασθένισης πεδίου του κινητήρα επαγωγής, καθώς και η άκρως αποδοτική λειτουργία του σε ταχύτητες μεγαλύτερες της ονομαστικής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση της εργασίας και αναφέρονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν. Ακόμη εντοπίζονται τα κυριότερα σημεία στα οποία κρίνεται ότι η εργασία αυτή συνεισφέρει στην προαγωγή της επιστήμης και επισημαίνονται θέματα που αναδείχθηκε κατά την εκπόνησή πως χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

7.1 Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε αρχικά η προκαταρκτική σχεδίαση ενός κινητήρα επαγωγής δρομέα κλωβού ισχύος 45 kW ακολουθώντας τις κλασσικές αρχές σχεδίασης. Με βάση τις κύριες διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά που προέκυψαν πραγματοποιήθηκε η οριστική σχεδίαση μέσω αριθμητικής ανάλυσης των εξισώσεων του μαγνητικού πεδίου με χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων. Επιχειρήθηκε η σύγκριση δύο διαφορετικών τοπολογιών για το τύλιγμα του στάτη, με συγκεντρωμένο και διανεμημένο τύλιγμα. Υπολογίστηκαν και για τις δύο μηχανές η παραγόμενη ροπή, η κυμάτωσή της, η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής και οι συνολικές απώλειες. Για την τοπολογία διανεμημένου τυλίγματος που εν τέλει επιλέχθηκε πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας των γεωμετρικών παραμέτρων της και προέκυψε γεωμετρία του κινητήρα που μεγιστοποιεί την παραγόμενη ροπή.

Έχοντας προσδιορίσει την τοπολογία του κινητήρα και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που ικανοποιούν τις προδιαγραφές της σχεδίασης, διατηρώντας τις φορτίσεις του κινητήρα σε επιθυμητά επίπεδα, επιχειρήθηκε ακριβέστερη πρόβλεψη της επίδοσης του κινητήρα υπό διαφορετικές φορτίσεις και καταστάσεις λειτουργίας. Για τον λόγο αυτόν αναπτύχθηκε κατάλληλη διαδικασία κατασκευής ενός ισοδύναμου κυκλώματος με μεταβλητές παραμέτρους. Οι παράμετροι υπολογίστηκαν από μια σειρά αριθμητικών δοκιμών που προσομοιώθηκαν με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Ως αποτέλεσμα, έγινε δυνατή η ακριβέστερη ανάλυση της προβλεπόμενης συμπεριφοράς του κινητήρα στην περιοχή της εκκίνησης.

7.2 Κυριότερα Συμπεράσματα

- Από την προκαταρκτική σχεδίαση που βασίζεται σε κλασσικές αρχές προσδιορίζονται προσεγγιστικά τα κυριότερα επιμέρους γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα. Με επιπλέον θεωρήσεις μπορούν να προκύψουν όλες οι διαστάσεις του κινητήρα. Ο κινητήρας που προκύπτει από την προκαταρκτική σχεδίαση παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα, όπως η δυσανάλογη κατανομή των μαγνητικών φορτίσεων στα δόντια του στάτη και του δρομέα, τα οποία επιβεβαιώνονται με την ανάλυση της μηχανής με βάση τα πεπερασμένα στοιχεία. Για τον λόγο αυτόν κρίνεται απαραίτητο να πραγματοποιηθεί μία φάση οριστικής σχεδίασης ακολουθώντας διαδικασία βελτιστοποίησης των γεωμετρικών παραμέτρων μέσω της τεχνικής ανάλυσης ευαισθησίας. Μετά την ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων παρατηρείται σημαντική βελτίωση των επιδόσεων της μηχανής.
- Συγκεκριμένα, στην παρούσα εφαρμογή η μέγιστη ροπή της μηχανής μετά από την ανάλυση ευαισθησίας αυξήθηκε κατά 36.8 τοις εκατό σε σχέση με τη γεωμετρία της προκαταρκτικής σχεδίασης.
- Παρατηρήθηκε ότι η μεταβολή κάποιων μεγεθών επηρεάζει σημαντικά τη ροπή, ενώ μεταβάλλει και τη συχνότητα στην οποία γίνεται μέγιστη. Αυτά είναι το πάχος των δοντιών στάτη και δρομέα καθώς και το ύψος του σώματος επιστροφής του στάτη.

Αντιθέτως, το ύψος των δοντιών στάτη και δρομέα έχουν μικρή επιρροή στην παραγόμενη ροπή, ενώ το μέγεθος του ανοίγματος των αυλάκων στάτη και δρομέα μεταβάλλει ακανόνιστα τη ροπή, λόγω των έντονων αρμονικών χώρου.

- Κρίνεται σκόπιμη για τη μηχανή της εφαρμογής μας η χρήση διανεμημένου τυλίγματος στο στάτη, καθώς οι επιλογές για το συγκεντρωμένο τύλιγμα, λόγω του αριθμού των πόλων του κινητήρα, είναι πολύ περιορισμένες και παρουσιάζονται αρκετές αδυναμίες. Συγκεκριμένα, η τοπολογία συγκεντρωμένου τυλίγματος εμφανίζει μειωμένη ροπή, κάτω και από το απαιτούμενο όριο από τις προδιαγραφές της σχεδίασης, υψηλή κυμάτωση ροπής, που αναμένεται να δημιουργήσει προβλήματα κατά τη λειτουργία του κινητήρα, και έντονη αρμονική παραμόρφωση του πεδίου στο διάκενο.
- Η απόδοση της μηχανής που σχεδιάστηκε είναι πολύ ικανοποιητική, καθώς ξεπερνάει το 95%, με ιδιαίτερα χαμηλές απώλειες πυρήνα, που καταδεικνύει ότι οι φορτίσεις στο σίδηρο της μηχανής είναι χαμηλές και εντός των ορίων που τέθηκαν.
- Επίσης, από τη διαδικασία προσδιορισμού της επίδοσης της μηχανής φάνηκε πως είναι εφικτή η κατασκευή της χαρακτηριστικής ροπής στροφών από ισοδύναμο κύκλωμα μεταβλητών παραμέτρων, οι τιμές των οποίων υπολογίζονται με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων.

7.3 Συγκριτικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα προτεινόμενης μηχανής σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης οχημάτων

Με βάση τη διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε προέκυψαν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης ασύγχρονης μηχανής έναντι αντίστοιχης μονίμων μαγνητών σε εφαρμογές ηλεκτροκίνητων οχημάτων:

- Σημαντική δυνατότητα εξασθένησης πεδίου και βελτιωμένη απόδοση σε λειτουργικές ταχύτητες μεγαλύτερες της ονομαστικής
- Αυξημένος βαθμός απόδοσης σε συνθήκες φόρτισης χαμηλού φορτίου (οικονομική λειτουργία οχήματος)
- Μειωμένη ισχύς βραχυκύκλωσης

Τα αντίστοιχα συγκριτικά μειονεκτήματα έναντι μηχανών μονίμων μαγνητών είναι:

- Μειωμένος βαθμός απόδοσης σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας
- Μειωμένος βαθμός απόδοσης σε συνθήκες υπερφόρτισης

Με βάση τα προαναφερθέντα συγκριτικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αναδεικνύεται ότι η ασύγχρονη μηχανή υπερτερεί σε περιπτώσεις ηλεκτροκίνητων οχημάτων που απαιτούν μεγάλη μεταβλητότητα ροπής κατά τη λειτουργία τους.

7.4 Σημεία επιστημονικής συνεισφοράς

Στην παρούσα εργασία προτείνεται και παρουσιάζεται ένας ολοκληρωμένος

τρόπος σχεδίασης και ανάλυσης κινητήρα επαγωγής για εφαρμογές υψηλής ταχύτητας.

Κατά τη σχεδίαση της μηχανής αναπτύχθηκαν οι εξής πρακτικές:

- Η παραμετροποιημένη σχεδίαση του κινητήρα σε περιβάλλον Matlab, που εξασφαλίζει την ικανότητα μεταβολής των επιμέρους γεωμετρικών παραμέτρων της μηχανής σε σχέση με κάποια βασικά μεγέθη που προκύπτουν από την προκαταρκτική σχεδίαση.

- Η ανάλυση ευαισθησίας με σκοπό τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της μηχανής, σε στάτη και δρομέα. Κατά τη διαδικασία αυτή επιχειρείται η μεγιστοποίηση της ροπής και η διατήρηση των φορτίσεων του κινητήρα σε αποδεκτά επίπεδα, όπως αυτά έχουν οριστεί, και ο περιορισμός των απωλειών της μηχανής.

- Η ανάλυση της λειτουργίας του κινητήρα με χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων για την εξαγωγή ενός ισοδύναμου κυκλώματος, το οποίο αποδίδει με σχετική ακρίβεια τα χαρακτηριστικά επίδοσης της μηχανής.

7.4 Εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση

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

- Πειραματική επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών του κινητήρα που υπολογίστηκαν.

- Επέκταση της μεθοδολογίας βελτιστοποίησης, με σκοπό την αλληλοσυσχέτιση των μεταβαλλόμενων μεγεθών και την αναζήτηση ολικού βέλτιστου.

Βιβλιογραφία

- [1] I.A. Τεγόπουλος, *Ηλεκτρικές Μηχανές Μέρος Β'*, Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 1991
- [2] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr., Stephen Umans, *Electric Machinery*, 6th Edition, McGraw-Hill
- [3] Stephen J. Chapman, *Ηλεκτρικές Μηχανές, 3^η Έκδοση*, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003
- [4] Juha Pyhonen, Tapani Jokinen, Valeria Hrabovcova, *Design of Rotating Electrical Machines*, John Wiley & Sons
- [5] Nicola Bianchi, *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements*, CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2005.
- [6] Hamdi, E. S., *Design of small electrical machines*, Chichester: 1998(1994), John Wiley & Sons.
- [7] Ion Boldea, Syed A. Nasar, *The Induction Machines Design Handbook, Second Edition*, CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2010.
- [8] Άγγελος Α. Χριστοφή, *Σχεδίαση και Βελτιστοποίηση Δρομέα Ηλεκτρικής Μηχανής Επαγωγής Ισχύος 2HP*, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Ιούλιος 2010
- [9] Αναστάσιος Γ. Βήχος, *Σχεδίαση και βελτιστοποίηση κινητήρα μονίμων μαγνητών για εφαρμογή ηλεκτροκίνησης*, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Ιούνιος 2009
- [10] James Larminie, John Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*, 2003 edition, John Wiley and Sons
- [11] Σ.Ν. Μανιάς, *Ηλεκτρονικά Ισχύος*, Συμεών, Αθήνα 2000.
- [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] William R. Finley, Mark M., Hodowane C., *Selection of Copper vs. Aluminium Rotors for Induction Motors*, Petroleum and Chemical Industry Conference, 2000
- [14] M.G Say, *Alternating current machines*, Essex 1986, Longman Scientific & Technical
- [15] David Meeker, *“Finite Element Method Magnetics, User’s Manual”*, Μάιος 2008.

[16] *Winding Calculator* , www.emetor.com

[17] Γεώργιος Ι. Τσεκούρας, *Μελέτη κατασκευής, Ανάλυση κυκλωματικής και πεδιακής συμπεριφοράς δοκιμίου 2,5kW και ανεμογεννήτριας 25kW*, Μεταπτυχιακή εργασία, Αθήνα 2000, Ε.Μ.Π.

[18] Florence Meier, *Permanent-Magnet Synchronous Machines with Non-Overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications*, 2008

[19] Soon-O Kwon, Sung-II Kim, Peng Zhang, Jung-Pyo Hong, *Performance comparison of IPMSM with distributed and concentrated windings*, Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting Conference Record of the 2006 IEEE (Volume: 4)

[20] Damir Zarko, Drago Ban, Ratko Klaric, *Finite Element Approach to Calculation of Parameters of an Interior Permanent Magnet Motor*, 2006

[21] Ji-Young Lee, Sang-Ho Lee, Geun-Ho Lee, and Jung-Pyo Hong, *Determination of Parameters Considering Magnetic Nonlinearity in Interior Permanent Magnet Synchronous Motors*, ECAD Lab., Dept. of Electrical Engineering, Changwon National University, June 26-30 2005

[22] Κωνσταντίνος Ι. Λάσκαρης, *Σχεδιασμός και Κατασκευή Κινητήρων Μονίμων Μαγνητών για Ηλεκτρικά Οχήματα*, Διδακτορική Διατριβή Ε.Μ.Π., Δεκέμβριος 2011

[23] Sang-Hoon Kim, Seung-Ki Sul, *Maximum Torque Control of an Induction Machine in the Field Weakening Region*, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, Vol. 31, No. 4, July/August 1995

