



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση γεωμετρίας κινητήρα
επαγωγής ισχύος 10MW για εφαρμογή σε
ηλεκτροπρόωση πλοίου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΛΕΝΗ Δ. ΜΗΤΣΗ

Επιβλέπων : Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016



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

Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση γεωμετρίας κινητήρα επαγωγής ισχύος 10MW για εφαρμογή σε ηλεκτροπρόωση πλοίου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΛΕΝΗ Δ. ΜΗΤΣΗ

Επιβλέπων : Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25η Οκτωβρίου 2016.

Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Στέφανος Μανιάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σταύρος Παπαθανασίου
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2016

(Υπογραφή)

.....

ΕΛΕΝΗ Δ. ΜΗΤΣΗ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Υπότροφος του κληροδοτήματος «Α. Σαράφη»

Υπότροφος του κληροδοτήματος « Γρ. Φαράκου»

Copyright © Ελένη Δ. Μήτση, 2016

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 το 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

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί την ολοκλήρωση ενός κύκλου σπουδών στη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Με την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν κατά την εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά, τον Καθηγητή μου κ. Αντώνιο Κλαδά για την ευκαιρία που μου παρείχε να εκπονήσω τη διπλωματική μου εργασία στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την καθοδήγηση του και την άψογη συνεργασία για την περάτωση της εργασίας, διαφωτίζοντας τις όποιες απορίες επί του θέματος της σχεδίασης και λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών.

Ευχαριστώ επίσης θερμά, τον Διδάκτορα κ. Σαρηγιαννίδη Αθανάσιο για την πολύτιμη γνώση και υποστήριξη που πρόθυμα μου προσέφερε σε κάθε στάδιο υλοποίησης της παρούσας εργασίας καθώς και για την άψογη συνεργασία και καθοδήγησή του.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη της ομάδας «Προμηθέας» για τις ευχάριστες στιγμές και εμπειρίες που έζησα μαζί τους τον τελευταίο χρόνο.

Τέλος, ιδιαιτέρως ευχαριστώ τους γονείς μου και τα αδέρφια μου για όλη την στήριξη που μου παρέχουν όλα αυτά τα χρόνια. Φυσικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους σημαντικούς μου φίλους και τα κοντινά μου πρόσωπα που ήταν δίπλα μου και μου προσέφεραν απλόχερα γνώση, αγάπη και ψυχολογική υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου .

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί τη λεπτομερή σχεδίαση και βελτιστοποίηση της γεωμετρίας ενός κινητήρα επαγωγής για εφαρμογή σε σύστημα ηλεκτροπρόωσης διπλού καυσίμου σε πλοίο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου. Συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα σύστημα που αποτελείται από μηχανές διπλού καυσίμου που χρησιμοποιούν ως καύσιμο ατμοποιημένο φυσικό αέριο και βαρύ πετρέλαιο, εναλλάκτες που μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική ενώ στη συνέχεια μέσω μετατροπών τροφοδοτούν τους ασύγχρονους κινητήρες κύριας πρόωσης. Οι κινητήρες πρόωσης που χρησιμοποιούνται στην εφαρμογή αυτή χαρακτηρίζονται από υψηλή ισχύ της τάξης των 10 MW και άνω, και χαμηλή ταχύτητα περιστροφής.

Στο πρώτο στάδιο της εργασίας πραγματοποιείται βιβλιογραφική διερεύνηση σχετικά με την ηλεκτροπρόωση πλοίων, των επιλογών που υπάρχουν, τις νέες τάσεις καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτής. Στη συνέχεια, διερευνάται η συγκεκριμένη εφαρμογή, η οποία αφορά ηλεκτροπρόωση πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου. Επιπλέον, πραγματοποιείται μια σύντομη περιγραφή της διαμόρφωσης και των χαρακτηριστικών των κινητήρων επαγωγής.

Σε δεύτερο στάδιο, παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία της προκαταρκτικής σχεδίασης του κινητήρα μέσω αναλυτικών σχέσεων της κλασικής σχεδίασης, ενώ επιλέγονται τα υλικά κατασκευής. Στη συνέχεια, επιλέγεται τόσο η γεωμετρία του στάτη όσο και του δρομέα, ενώ πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ διανεμημένου τυλίγματος μονής στρώσης πλήρους βήματος και διπλής στρώσης κλασματικού βήματος. Η διαδικασία ολοκληρώνεται, μέσω της οριστικής σχεδίασης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης για την αρχικά επιλεγείσα γεωμετρία, καθώς επίσης και οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος, προκειμένου να είναι δυνατή η εισαγωγή της σχεδιασμένης μηχανής σε δυναμικό μοντέλο ελέγχου.

Στο τελικό στάδιο, πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του κινητήρα για την ονομαστική κατάσταση λειτουργίας με την τεχνική ανάλυσης ευαισθησίας γεωμετρικών παραμέτρων τόσο του στάτη όσο και του δρομέα. Η βελτιστοποίηση βασίζεται σε κριτήρια ελαχιστοποίησης απωλειών του κινητήρα προκειμένου να δημιουργηθεί ένα σύστημα πρόωσης υψηλής απόδοσης. Συνεπώς, προκύπτει ελαχιστοποίηση των συνολικών απωλειών, μέσω της αναζήτησης ενός βέλτιστου συνδυασμού των μεταβλητών συνιστωσών των απωλειών πυρήνα και χαλκού, αντίστοιχα. Με την επιλογή της βέλτιστης γεωμετρίας, υπολογίζονται εκ νέου τα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης της τελικής γεωμετρίας, καθώς επίσης και το ισοδύναμο κύκλωμα μεταβλητών παραμέτρων.

Λέξεις Κλειδιά: Ηλεκτροπρόωση πλοίων, συστήματα ηλεκτροπρόωσης πλοίων υγροποιημένου φυσικού αερίου, ασύγχρονος κινητήρας, προκαταρκτική σχεδίαση, παραμετρική σχεδίαση, ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.

Abstract

This thesis undertakes the design and geometrical optimization of an induction motor for applications involving dual fuel electric propulsion system for LNG Carriers. More specifically, the system considered is consisted of dual engines fueled with boil off gas and heavy oil, alternators, that convert mechanical energy into electrical energy. These alternators supply the main propulsion induction motor by using an appropriate inverter. The motors implemented in this class of applications are characterized by a high power value of 10 MW and low speed operation.

In a first step, a bibliographic research is performed on electric ship propulsion systems, emphasizing on new trends, their advantages and disadvantages. Then, a survey on the specific application on electric propulsion of LNG carriers is undertaken. Finally, the case study configuration and the geometrical and operational specifications for the induction motor are reported.

In a second step, the detailed motor preliminary design process is performed, by using classical analytical design tools. This involves the selection of materials, the selection of stator's geometry, the selection of rotor's geometry and the selection of stator windings configuration. Particularly, for the stator windings, a comparative analysis between single layer full pitch and double layer fractional slot distributed windings is presented. Then, the performance and efficiency indexes, as well as the equivalent circuit parameters are calculated by using the finite element method for the initial geometry, in order to provide a dynamic control model for the designed machine.

Finally, the geometrical optimization at nominal operation for the investigated induction motor is implemented, by using an extended sensitivity analysis technique for both stator's and rotor's geometric parameters. The optimization criteria are based on the minimization of the motor total losses, in order to achieve a high efficient propulsion drive system. Hence, the proposed methodology leads to the minimization of motor total losses, through the search of an optimal combination of core and copper losses, respectively. For the final optimized design, the performance and efficiency indexes as well as the equivalent circuit parameters are calculated.

Key words: Marine electric propulsion, LNG carriers electric propulsion systems, induction motor, preliminary design, parametric design, sensitivity analysis technique, finite element method.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή	1
1.1	Ηλεκτροπρόωση	1
1.1.1	Εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης.....	2
1.1.2	Συστήματα ηλεκτρικής ισχύος πλοίου.....	5
1.1.3	Ηλεκτροπρόωση σε πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου	10
1.2	Σκοπός της εργασίας.....	14
1.3	Δομή της εργασίας.....	14
2	Διαμόρφωση και λειτουργικά χαρακτηριστικά ηλεκτρικών κινητήρων επαγωγής	17
2.1	Εισαγωγή.....	17
2.2	Ιστορική αναδρομή.....	17
2.3	Κατασκευαστικά στοιχεία.....	18
2.3.1	Στάτης	19
2.3.2	Δρομέας.....	19
2.3.3	Τυλίγματα	20
2.4	Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα.....	21
2.5	Ανάλυση ισοδυνάμου κυκλώματος και χαρακτηριστική ροπής στροφών	26
2.5.1	Ανάλυση Ισοδυνάμου Κυκλώματος.....	26
2.5.2	Χαρακτηριστική ροπής-στροφών	28
2.6	Κατάταξη κινητήρων επαγωγής.....	31
3	Μεθοδολογία σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών	37
3.1	Κατασκευαστικά υλικά ηλεκτρικών μηχανών	37
3.2	Προκαταρκτική σχεδίαση	38
3.2.1	Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης.....	39
3.2.2	Βήματα της προκαταρκτικής σχεδίασης.....	42
3.2.3	Προσδιορισμός κύριων χαρακτηριστικών στάτη	44
3.2.4	Προσδιορισμός κύριων χαρακτηριστικών δρομέα.....	48
3.3	Υπολογισμός απωλειών	49
3.3.1	Απώλειες χαλκού	49

3.3.2	Απώλειες πυρήνα	51
3.4	Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία	51
3.4.1	Μαγνητοστατικά προβλήματα	52
3.4.2	Οριακές συνθήκες	54
3.4.3	Το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων FEMM	54
3.5	Υπολογισμός παραμέτρων ισοδύναμου κυκλώματος.....	55
3.5.1	Δοκιμή κενού φορτίου.....	56
3.5.2	Δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα.....	57
3.5.3	Υπολογισμός παραμέτρων 3D φαινομένων	58
4	Σχεδίαση κινητήρα επαγωγής 10MW Για συστημα ηλεκτροπρωσησ LNG Carrier, ανάλυση λειτουργίας και υπολογισμός ισοδύναμου κυκλώματος.....	61
4.1	Προδιαγραφές κινητήρα επαγωγής	61
4.2	Προκαταρκτική σχεδίαση	64
4.2.1	Διαστασιολόγηση διακένου.....	64
4.2.2	Προσδιορισμός χαρακτηριστικών στάτη.....	65
4.2.3	Προσδιορισμός χαρακτηριστικών δρομέα	67
4.2.4	Τελική γεωμετρία	68
4.2.5	Υλικά κατασκευής.....	70
4.2.6	Παραμετροποιημένη σχεδίαση	71
4.3	Οριστική σχεδίαση του κινητήρα	71
4.3.1	Σύγκριση τοπολογιών τυλίγματος μονής και διπλής στρώσης.....	71
4.3.2	Επίδοση και απόδοση αρχικής οριστικής σχεδίασης	74
4.3.3	Υπολογισμός ισοδύναμου κυκλώματος.....	76
5	Βελτιστοποίηση κινητήρα επαγωγής 10MW για συστημα ηλεκτροπρωσησ LNG Carrier βάσει κριτηρίων ελαχιστοποίησης απωλειών	81
5.1	Κριτήρια βελτιστοποίησης.....	81
5.2	Αλγόριθμος βελτιστοποίησης.....	82
5.3	Ανάλυση ευαισθησίας γεωμετρικών παραμέτρων για βελτιστοποίηση γεωμετρίας αυλάκων στάτη και δρομέα	89
5.3.1	Μεταβολή γεωμετρικών παραμέτρων αυλάκων στάτη.....	89
5.3.2	Μεταβολή γεωμετρικών παραμέτρων δοντιών δρομέα.....	93
5.4	Επιλογή γεωμετρίας κινητήρα.....	95

5.4.1	Επίδοση και απόδοση τελικής γεωμετρίας.....	96
5.4.2	Υπολογισμός ισοδυνάμου κυκλώματος.....	100
6	Συμπεράσματα	105
6.1	Ανακεφαλαίωση	105
6.2	Κυριότερα συμπεράσματα	105
6.3	Συνεισφορά στην προαγωγή της επιστήμης	106
6.4	Εργασίες για περαιτέρω διερεύνηση	107
7	Βιβλιογραφία	109
8	Παραρτημα.....	113

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ

Ως ηλεκτροπρόωση ορίζεται η πρόωση στην οποία οι άξονες του πλοίου κινούνται απ' ευθείας (ή σπανιότερα μέσω μειωτήρων) από ηλεκτρικούς κινητήρες και όχι από άλλες κινητήριες μηχανές, όπως ντίζελ, αεριοστρόβιλους και ατμοστρόβιλους. Φυσικά οι κινητήρες ντίζελ, οι αεριοστρόβιλοι και οι ατμοστρόβιλοι εξακολουθούν να υπάρχουν στις εγκαταστάσεις της ηλεκτροπρόωσης, ωστόσο δεν κινούν απ' ευθείας το αξονικό σύστημα με έλικα αλλά κινούν ηλεκτρικές γεννήτριες προώσεως, οι οποίες αναφέρονται και στη βιβλιογραφία ως "primemovers" ("κινητήριες μηχανές"). [1] [2] [3]

Η ηλεκτροπρόωση δεν είναι μια νέα έννοια, η πρώτη ιδέα γεννήθηκε πάνω από 100 χρόνια πριν. Ωστόσο, με τη δυνατότητα ελέγχου ηλεκτρικών κινητήρων με μεταβλητή συχνότητα σε μεγάλο εύρος ισχύος με συμπαγή, αξιόπιστα, και οικονομικά συστήματα, η χρήση της ηλεκτρικής πρόωσης εμφανίστηκε σε νέες εφαρμογές μετά τη δεκαετία του 1980.

Δεδομένης της ραγδαίως αναπτυσσόμενης έρευνας στην ηλεκτρική πρόωση των πλοίων, κρίνεται σκόπιμο να αναλυθούν οι παρακάτω όροι σχετικά με αυτή: [1] [2] [3]

- Πλήρης Ηλεκτροπρόωση (Full Electric Propulsion): Η εγκατάσταση προώσεως κατά την οποία το πλοίο κινείται αποκλειστικά από ηλεκτρικούς κινητήρες. Τα ζεύγη κινητήριων μηχανών-γεννητριών που τροφοδοτούν τους κινητήρες προώσεως υπάρχουν αποκλειστικά για τον σκοπό αυτό (δεν τροφοδοτούν δηλαδή άλλα φορτία). Η ηλεκτρική ισχύς για όλους τους άλλους καταναλωτές του πλοίου παράγεται από άλλες γεννήτριες.
- Ολοκληρωμένη Πλήρης Ηλεκτροπρόωση (Integrated Full Electric Propulsion-I.F.E.P.): Η εγκατάσταση ηλεκτροπρόωσης στην οποία τα ίδια ζεύγη κινητήριων μηχανών-γεννητριών, τροφοδοτούν τόσο τους ηλεκτρικούς κινητήρες προώσεως, όσο και τα υπόλοιπα ηλεκτρικά φορτία του πλοίου.
- Πλήρως Εξηλεκτρισμένο πλοίο (All Electric Ship-A.E.S.): Το πλοίο που διαθέτει ολοκληρωμένη πλήρη ηλεκτροπρόωση και επιτελεί σε ευρεία έκταση τις λειτουργίες του μέσω ηλεκτρικών μηχανημάτων και συστημάτων.

Η ηλεκτροπρόωση με αεριοστρόβιλο ή ντιζελογεννήτρια χρησιμοποιείται σε εκατοντάδες πλοία διαφόρων τύπων. Η εγκατεστημένη ισχύς ηλεκτρικών κινητήρων σε εμπορικά σκάφη ήταν της τάξης των 6-7 GW το 2002, επιπρόσθετα σε σημαντικό πλήθος εγκατάστασης τόσο σε υποβρύχια όσο και σε πολεμικά πλοία.

Με την εισαγωγή των αζιμουθιακών προωστήρων, δηλαδή περιστρεφόμενων εξωλέμβιων κινητήρων (azimuth thrusters ή Azipods, brand name της ABB), οι διατάξεις πρόωσης για την πορεία, την αλλαγή κατεύθυνσης και τη διατήρηση θέσης έχουν συγχωνευτεί ώστε να χρησιμοποιούνται βέλτιστα οι εγκατεστημένες μονάδες πρόωσης.

Η ηλεκτροπρόωση, σήμερα, εφαρμόζεται κυρίως στους ακόλουθους τύπους πλοίων: κρουαζιερόπλοια, φέρι μποτ, σκάφη γεωτρήσεων, τάνκερ, παγοθραυστικά και πολεμικά πλοία. Επιπλέον, διεξάγεται σημαντική έρευνα για τη χρήση της ηλεκτροπρόωσης σε νέα σχέδια σκαφών για υπάρχοντα και νέα πεδία εφαρμογών.

Τα ακόλουθα χαρακτηριστικά συνοψίζουν τα κύρια πλεονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης σε αυτούς τους τύπους σκαφών: [4]

- Βελτιωμένο κόστος στο σύνολο του κύκλου ζωής λόγω μειωμένης κατανάλωσης καυσίμου και συντήρησης, ιδιαίτερα όταν υπάρχει μεγάλη μεταβλητότητα φορτίου.
- Μειωμένη ευαισθησία σε βλάβες του συστήματος και δυνατότητα και βελτιστοποιηθεί το φορτίο των κινητήριων μηχανών (ντίζελ ή αεριοστροβίλοι).
- Χρήση ελαφρών κινητήρων ντίζελ μεσαίας ή μεγάλης ταχύτητας.
- Ο μικρότερος όγκος και η ευελιξία στην εκμετάλλευση του χώρου αυξάνουν το ωφέλιμο φορτίο του πλοίου.
- Ευελιξία στην τοποθέτηση των κινητήρων επειδή τροφοδοτούνται με ισχύ μέσω καλωδίων, επομένως μπορούν να τοποθετηθούν ανεξάρτητα από τη γεννήτρια.
- Βελτιωμένη ευκολία χειρισμού του σκάφους με τη χρήση περιστρεφόμενων εξωλέμβιων κινητήρων.
- Λιγότερος θόρυβος και δονήσεις αφού οι άξονες μετάδοσης είναι μικρότερου μήκους, οι κινητήριες μηχανές λειτουργούν σε σταθερή ταχύτητα.

Αυτά τα πλεονεκτήματα θα πρέπει να συγκριθούν με τα παρόντα μειονεκτήματα, όπως:

- Αυξημένο κόστος επένδυσης, το οποίο όμως αναθεωρείται συνεχώς εφόσον το κόστος τείνει να μειώνεται όσο αυξάνονται οι μονάδες που παράγονται.
- Τα επιπρόσθετα εξαρτήματα της κινητήριας μηχανής και της προπέλας (ηλεκτρικός εξοπλισμός - γεννήτριες, μετασχηματιστές και κινητήρες) αυξάνουν τις απώλειες μετάδοσης σε πλήρες φορτίο.
- Για τους νεοεισερχόμενους στην ηλεκτρική πρόωση ο μεγαλύτερος αριθμός εξοπλισμού νέου τύπου απαιτεί διαφορετική λειτουργία, επάνδρωση και στρατηγική συντήρησης.

1.1.1 Εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης

Γενικά, η ηλεκτροπρόωση μπορεί να αποδειχθεί η καταλληλότερη λύση στις ακόλουθες κατηγορίες εφαρμογών: [4]

- Σκάφη με υψηλές απαιτήσεις ελκτικών ικανοτήτων
- Σκάφη με μεγάλη ισχύ βοηθητικών μηχανημάτων
- Σκάφη με μεγάλα φορτία ενδιαίτησης και έντονη διακύμανση της ισχύος πρόωσης
- Σκάφη εξοπλισμένα με πολλές ταχύστροφες μη αναστρέψιμες μηχανές
- Υποβρύχια και βαθυσκάφη.

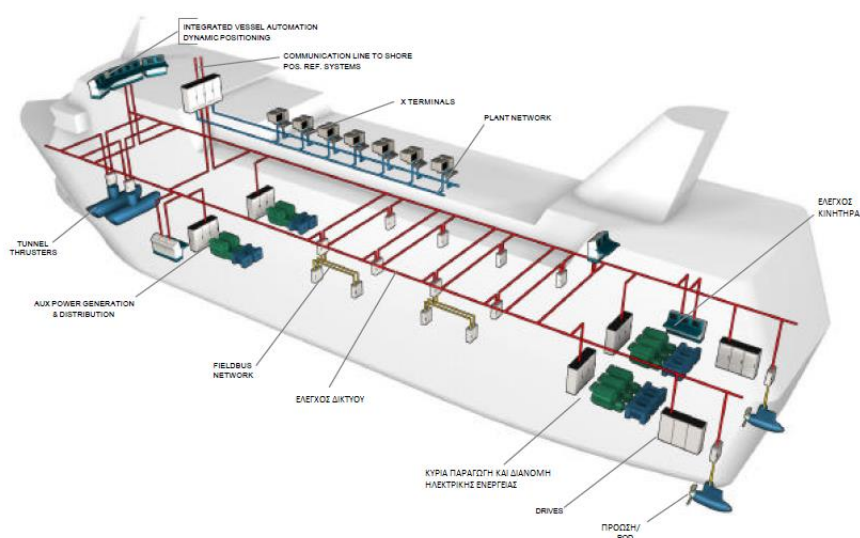
Αναλυτικότερα, παρουσιάζεται στη συνέχεια η εφαρμογή της ηλεκτροπρόωσης σε διάφορα είδη πλοίων.

1.1.1.1 Επιβατικά σκάφη – Κρουαζιερόπλοια και φέρι μποτ

Τα επιβατικά σκάφη έχουν απαιτήσεις για άνεση σχετικές με το θόρυβο και τις δονήσεις. Επιπλέον, η αξιοπιστία είναι πολύ σημαντική για την ασφάλεια των επιβατών και του σκάφους. Ως εκ τούτου, τα πλεονεκτήματα της ηλεκτροπρόωσης εκτιμήθηκαν από νωρίς.

Η λίστα των κρουαζιερόπλοιων με ηλεκτροπρόωση μεγαλώνει συνεχώς. Ένα μεγάλο ποσοστό των καινούριων πλοίων εξοπλίζονται με συστήματα ηλεκτροπρόωσης λόγω της καλύτερης ευελιξίας και εξοικονόμησης καυσίμων μέσω της αύξησης της απόδοσης της πρόωσης μέχρι 10%.

Η ισχύς πρόωσης μεταβάλλεται με το μέγεθος του σκάφους, από λίγα MW για μικρά φέρι μποτ μέχρι 30-40 MW για μεγάλα κρουαζιερόπλοια. Το ηλεκτρικό φορτίο εκτός των κινητήρων (π.χ. φωτισμός) μπορεί να είναι σημαντικό μέρος της εγκατεστημένης ισχύος, ιδιαίτερα για ένα μεγάλο κρουαζιερόπλοιο μπορεί να είναι της τάξης των 10-15 MW.



Σχήμα 1.1: Παράδειγμα σχεδίου πρόωσης και συστήματος ελέγχου κρουαζιερόπλοιου. [4]

1.1.1.2 Εξόρυξη πετρελαίου και φυσικού αερίου: Μονάδες γεώτρησης, τάνκερ

Τα σκάφη αυτού του τύπου έχουν μεγάλη ισχύ πρόωσης, τυπικά 10-50 MW. Μαζί με τον εξοπλισμό γεώτρησης και τα λοιπά φορτία η συνολική εγκατεστημένη ισχύς είναι 25-55 MW. Η εγκατάσταση έχει έναν κοινό σταθμό παραγωγής για όλα τα φορτία, που επιτρέπει ευελιξία στην λειτουργία, υψηλή αποδοτικότητα και υψηλή διαθεσιμότητα ισχύος.

1.1.1.3 Γιοτ και σκάφη αναψυχής

Μια μικρή περιοχή εφαρμογής της ηλεκτροπρόωσης είναι η αγορά των γιοτ. Η άνεση και η φιλικότητα προς το περιβάλλον είναι βασικά κριτήρια σχεδίασης για αυτά τα πλοία, επομένως αυτοί είναι οι λόγοι που κάνουν την ηλεκτροπρόωση να χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο. Η εγκατεστημένη ισχύς πρόωσης είναι της τάξης των 500 kW με 2 MW, και για τα μεγαλύτερα πλοία ακόμα μεγαλύτερης τιμής.

1.1.1.4 Παγοθραυστικά

Οι απαιτήσεις για μετατροπείς συχνότητας στις εφαρμογές πρόωσης είναι χαμηλές σε σχέση με άλλες βιομηχανικές εφαρμογές. Παρόλα αυτά στα παγοθραυστικά πλοία, οι μεταβολές του φορτίου μπορεί να είναι σημαντικές και γρήγορες. Για το λόγο αυτό το σύστημα πρόωσης πρέπει να έχει υψηλή δυναμική επίδοση ώστε να αποφεύγεται η υπερφόρτιση του εξοπλισμού. Η ηλεκτρική πρόωση χρησιμοποιείται στην πλειοψηφία των νέων παγοθραυστικών πλοίων από την δεκαετία του 1980. Η εγκατεστημένη ισχύς πρόωσης μπορεί να είναι της τάξης των 5-55 MW, ανάλογα με τις δυνατότητες του σκάφους.



Σχήμα 1.2: “M/S Botnica”, Παγοθραυστικό που χρησιμεύει ως σκάφος εφοδιασμού την θερινή περίοδο, εξοπλισμένο με αζιμουθιακούς προωστήρες (Azipod propulsion). [4]

1.1.1.5 Πολεμικά πλοία

Παρόλο που υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον στην εφαρμογή της ηλεκτροπρόωσης σε πολεμικά πλοία, έχουν κατασκευαστεί λίγα ηλεκτρικά πολεμικά πλοία. Για τα υποβρύχια, εφαρμόζεται ηλεκτροπρόωση με πυρηνική ενέργεια, κυψέλες καυσίμου ή με ντιζελογεννήτρια και αποθήκευση ενέργειας με μπαταρίες.

Η ηλεκτρική πρόωση για πολεμικά πλοία δεν διαφέρει ως σύνολο από αυτή των εμπορικών πλοίων, αλλά οι λύσεις που εφαρμόζονται μπορεί να διαφέρουν αφού οι απαιτήσεις για διαθεσιμότητα ισχύος συνήθως είναι αυστηρότερες. Επιπλέον, η δυνατότητα αντοχής κραδασμών και ο χαμηλός παραγόμενος θόρυβος είναι προαπαιτούμενα για την εφαρμογή της ηλεκτροπρόωσης σε ένα πολεμικό πλοίο.

1.1.1.6 Ερευνητικά πλοία

Γεωτεχνικά ερευνητικά πλοία, ωκεανογραφικά και σκάφη αλιευτικής έρευνας έχουν πολύ αυστηρές απαιτήσεις για χαμηλό υποβρύχιο θόρυβο, τυπικά αρκετές δεκάδες dB κάτω από τα επίπεδα άλλων εφαρμογών. Αυτό παραδοσιακά επιτυγχανόταν με χρήση άμεσης πρόωσης με κινητήρες ΣΡ, με ειδικές προβλέψεις για φιλτράρισμα και μείωση των δονήσεων και των μεταβολών της ροπής. Με τη χρήση μοντέρνων μετατροπέων συχνότητας και τεχνικών φιλτραρίσματος οι κινητήρες ΕΡ έγιναν επίσης κατάλληλοι για τέτοιες απαιτητικές εφαρμογές, έτσι έχουν ενταχθεί στη σχεδίαση νέων πλοίων.

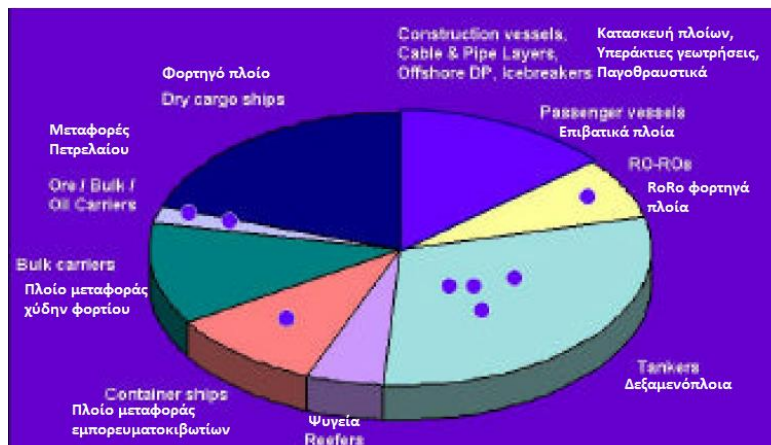
1.1.1.7 Πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG Carriers)

Τα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου αποτελούν, τα τελευταία χρόνια, μια κατηγορία ιδιαίτερου ενδιαφέροντος για χρήση της ηλεκτροπρόωσης. Πιο συγκεκριμένα, η αγορά των LNG carriers έχει στραφεί στη χρήση ηλεκτροπρόωσης με μηχανές διπλού καυσίμου, καθώς η τεχνολογία της ηλεκτροπρόωσης είναι πιο αποδοτική και ιδιαίτερα στην συγκεκριμένη εφαρμογή έχει μικρότερη επίπτωση στο περιβάλλον λόγω χαμηλότερης κατανάλωσης καυσίμου και χαμηλότερων εκπομπών. Επιπλέον, το σύστημα ηλεκτροπρόωσης με μηχανές διπλού καυσίμου είναι πιο συμπαγές, με αποτέλεσμα να επιτρέπει τη μεταφορά περισσότερου φορτίου.

1.1.1.8 Τάσεις και νέες εφαρμογές

Η ηλεκτροπρόωση συνεχώς ερευνάται και αξιολογείται για νέες εφαρμογές. Υγραεριοφόρα πλοία, δεξαμενόπλοια μεταφοράς χημικών προϊόντων, Ro-Ro φορτηγά πλοία ("Ro-Ro vessels"), πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, αλιευτικά σκάφη είναι τυπικά παραδείγματα πλοίων μεγάλου όγκου όπου η ηλεκτρική πρόωση ακόμη δεν έχει τεθεί σε λειτουργία λόγω του αυξημένου κόστους επένδυσης.

Παρόλα αυτά, μικρές αλλαγές στα κριτήρια λειτουργίας και σχεδιασμού, όπως αυξημένα κόστη καυσίμων ή εκπομπών, ρυθμιστικών περιορισμών, και μείωση του κόστους του εξοπλισμού μπορούν να δώσουν μια τεράστια αλλαγή στους τρόπους εφαρμογής της τεχνολογίας για πολλά από τα επόμενα χρόνια.



Σχήμα 1.3: Ο κόσμος της νέας αγοράς για την κατασκευή πλοίων. Η ηλεκτροπρόωση κυριαρχεί στον τομέα της κατασκευής πλοίων, των υπεράκτιων γεωτρήσεων, των παγοθραυστικών και των επιβατικών πλοίων. Στους άλλους τομείς, η ηλεκτροπρόωση χρησιμοποιείται λιγότερο, παρόλα αυτά υπάρχει σημαντική αύξηση του ενδιαφέροντος για μελέτες και σχεδιασμό. [4]

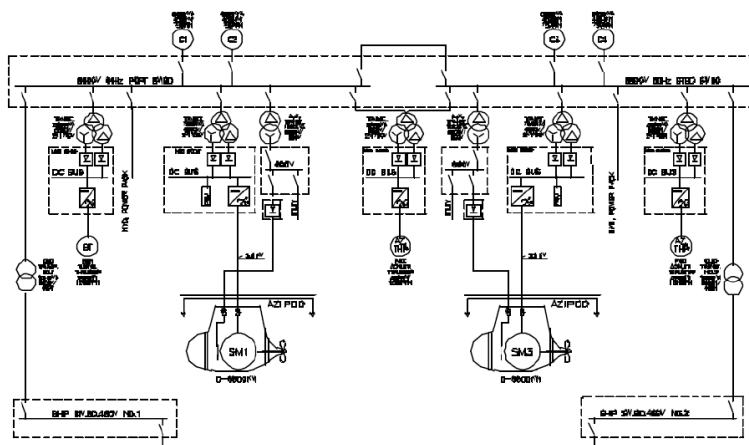
1.1.2 Συστήματα ηλεκτρικής ισχύος πλοίου

1.1.2.1 Εισαγωγή

Η κύρια διαφορά μεταξύ ενός επίγειου συστήματος ηλεκτρικής ισχύος κι ενός άλλου συστήματος σε πλοίο είναι ότι το δεύτερο είναι ένα απομονωμένο σύστημα με μικρές

αποστάσεις από την παραγόμενη ισχύ στους καταναλωτές, σε αντίθεση με τα επίγεια συστήματα όπου οι αποστάσεις αυτές μπορεί να είναι εκατοντάδες χιλιόμετρα, με μακριές γραμμές μεταφοράς και πολλούς μετασχηματιστές τάσης μεταξύ τους. Η ποσότητα της εγκατεστημένης ισχύος στα σκάφη μπορεί να είναι μεγάλη και αυτό δημιουργεί προκλήσεις για τους μηχανικούς. Τα υψηλότερα ρεύματα βραχυκύκλωσης πρέπει να αντιμετωπιστούν με ασφάλεια. Το σύστημα ελέγχου στα επίγεια συστήματα είναι διαιρεμένο με αρκετά υποσυστήματα, ενώ στο σκάφος υπάρχει η δυνατότητα για περισσότερη ενσωμάτωση.

Η εικόνα 1.4 δείχνει το μονογραμμικό σχέδιο της εγκατάστασης ενός πλοίου με ηλεκτροπρόωση:



Σχήμα 1.4: Μονογραμμικό σχέδιο εγκατάστασης πλοίου με Azipod. G1-G4: Γεννήτριες, SWBD: Πίνακας διακοπών, TRANSF: Μετασχηματιστής, BT: Βοηθητικοί προωστήρες, AZ THR: περιστρεφόμενος προωστήρας, AZIPOD: αζιμουθιακός προωστήρας. [4]

1.1.2.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος [4]

1.1.2.2.1 Κύριος κινητήρας

Η πηγή της ισχύος είναι συνήθως ζεύγος γεννητριών κινούμενο από μια μηχανή εσωτερικής καύσης, η οποία καίει ντίζελ. Σπανιότερα χρησιμοποιούνται αεριοστρόβιλοι, ατμοστρόβιλοι ή στρόβιλοι συνδυασμένου κύκλου, κυρίως για υψηλά επίπεδα ισχύος, σε ελαφριά ταχύπλοα, ή όπου το φυσικό αέριο είναι ένα φθηνό εναλλακτικό καύσιμο.

Σε ένα ντιζελοηλεκτρικό σύστημα πρόωσης, οι ντιζελομηχανές είναι συνήθως μεσαίας ή υψηλής ταχύτητας, με χαμηλότερο βάρος και κόστος έναντι των μηχανών παρόμοιας ισχύος αλλά χαμηλής ταχύτητας που χρησιμοποιούνται για άμεση μηχανική πρόωση.

1.1.2.2.2 Γεννήτριες

Η πλειοψηφία των νέων σκαφών έχει έναν σταθμό παραγωγής ενέργειας και δίκτυο διανομής εναλλασσόμενης τάσης. Οι γεννήτριες είναι σύγχρονες με το τύλιγμα διέγερσης του δρομέα να διαρρέεται από συνεχές ρεύμα και το τριφασικό τύλιγμα του στάτη, όπου επάγεται τριφασική ημιτονοειδής τάση από το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί το ρεύμα διέγερσης. Η συχνότητα της τάσης ως γνωστόν είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής n (ΣΑΛ) και των πόλων p :

$$f = \frac{p*n}{120} \quad (1.1)$$

1.1.2.3 Διανομή ηλεκτρικής ισχύος

Χρησιμοποιώντας τα επίπεδα τάσης κατά IEC οι ακόλουθες εναλλακτικές επιλέγονται πιο συχνά για το σύστημα διανομής:

- 11 kV: Παραγωγή και διανομή μέσης τάσης. Χρησιμοποιείται όταν η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των γεννητριών ξεπερνά τα 20 MW. Χρησιμοποιείται επίσης για κινητήρες άνω των 400 kW.
- 6,6 kV: Παραγωγή και διανομή μέσης τάσης. Χρησιμοποιείται για συνολική ισχύ γεννητριών μεταξύ 4-20 MW και για κινητήρες άνω των 300 kW.
- 690 V: Παραγωγή και διανομή χαμηλής τάσης. Χρησιμοποιείται για συνολική ισχύ γεννητριών κάτω των 4 MW και για καταναλώσεις κάτω των 400 kW και ως τάση τροφοδοσίας μετατροπών.
- Για τα λοιπά φορτία χρησιμοποιείται χαμηλότερη τάση, π.χ. 400/230 V.

Είναι απαραίτητα μερικά σχόλια στις παραπάνω οδηγίες:

- Όπου η πλειοψηφία του φορτίου αποτελείται από κινητήρες μεταβλητής ταχύτητας χωρίς συνεισφορά στο ρεύμα βραχυκύκλωσης, συνήθως δεν υπάρχει πρόβλημα να χρησιμοποιηθεί κάθε επίπεδο τάσης σε σημαντικά υψηλότερη ισχύ γεννητριών. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να υπολογίζονται τα ρεύματα φορτίου και σφάλματος για την επιλογή της σωστής λύσης.
- Στα πλοία, κινητήρες χαμηλής τάσης (690 V) συνήθως χρησιμοποιούνται σε υψηλότερα επίπεδα ισχύος από τα 300 kW. Πρέπει πρώτα να ληφθούν υπόψη το ρεύμα φορτίου και τα χαρακτηριστικά εκκίνησης του κινητήρα.
- Η διανομή 440 V είναι αρκετά κοινή στις εγκαταστάσεις πλοίων. Πολλά είδη εξοπλισμού είναι διαθέσιμα μόνο στα 440 V, που σημαίνει ότι είναι δύσκολο να αποφευχθεί αυτό το επίπεδο τάσης στις εφαρμογές αυτές.

1.1.2.4 Μονάδες πρόωσης [4]

1.1.2.4.1 Πρόωση με άξονα

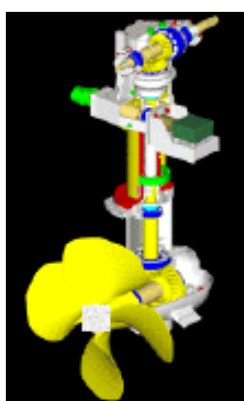
Η βασική τοπολογία με ηλεκτρικές μονάδες πρόωσης εντός του κοιλώματος είναι παρόμοια με εκείνη της συμβατικής μηχανικής μετάδοσης κίνησης. Πρόκειται για την αξονική ηλεκτροπρόωση, όπου ο κινητήρας βρίσκεται μέσα στο κύτος του πλοίου και μεταφέρει ροπή χρησιμοποιώντας ένα περιστροφικό άξονα προς την έλικα που με τη σειρά της μεταφέρει τη ροπή σε κίνηση προς τα εμπρός ή προς τα πίσω.

Σε ένα ντιζελοηλεκτρικό σύστημα πρόωσης με προπέλα στον άξονα, οι προπέλες συνήθως οδηγούνται από κινητήρες μεταβλητής ταχύτητας. Οι κινητήρες μπορεί να είναι συνδεδεμένοι απ' ευθείας στον άξονα, το οποίο είναι μια απλή και ανθεκτική λύση, ή μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων, το οποίο επιτρέπει μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, κάτι που συνεπάγεται και μικρότερες διαστάσεις. Το μειονέκτημα είναι η αυξημένη μηχανική πολυπλοκότητα και οι μεγαλύτερες απώλειες ισχύος. Η προπέλα έχει συνήθως σταθερό βήμα. [4]

1.1.2.4.2 Περιστρεφόμενοι προωστήρες

Οι περιστρεφόμενοι προωστήρες μπορούν να δώσουν πρόωση προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Η πρόωση ελέγχεται είτε μέσω προπέλας σταθερής ταχύτητας και μεταβλητού βήματος, είτε με προπέλα μεταβλητής ταχύτητας και σταθερού βήματος, ή με συνδυασμό ελέγχου ταχύτητας και βήματος σε κάποιες σπάνιες περιπτώσεις. Ο κινητήρας βρίσκεται μέσα στο σκάφος και η κίνηση μεταδίδεται μέσω αξόνων σε σχήμα Z στην προπέλα. Αυτό το σύστημα έχει περιορισμένη ικανότητα πρόωσης με αρνητικό βήμα ή ταχύτητα, καθώς είναι βελτιστοποιημένο για πρόωση προς μια κατεύθυνση.

Οι συμβατικοί περιστρεφόμενοι προωστήρες έχουν πρόσφατα ξεκινήσει να χρησιμοποιούνται ως κύριοι προωστήρες σε πλοία με ηλεκτρική πρόωση. Η ισχύς του κυμαίνεται σε τιμές άνω των 6-7 MW.



Σχήμα 1.5: Παράδειγμα περιστρεφόμενου προωστήρα που απεικονίζει μέρη όπως η προπέλα, οι άξονες και τα γρανάζια. [4]

1.1.2.4.3 Αζιμουθιακοί προωστήρες (Azipod)

Όπως και ο συμβατικός περιστρεφόμενος προωστήρας, η μονάδα αζιμουθιακής πρόωσης περιστρέφεται ελεύθερα και παρέχει πρόωση προς κάθε κατεύθυνση. Η κύρια διαφορά είναι η ενσωμάτωση του ηλεκτρικού κινητήρα στον άξονα της προπέλας, σε έναν κλειστό φορέα (rod) βυθισμένο κάτω από το κύτος. Η ανάπτυξη των Azipod ξεκίνησε το 1989 από την ABB και καθιερώθηκαν την δεκαετία του 1990, ενώ μέχρι σήμερα η εταιρία έχει παραδώσει πάνω από 250 μονάδες.

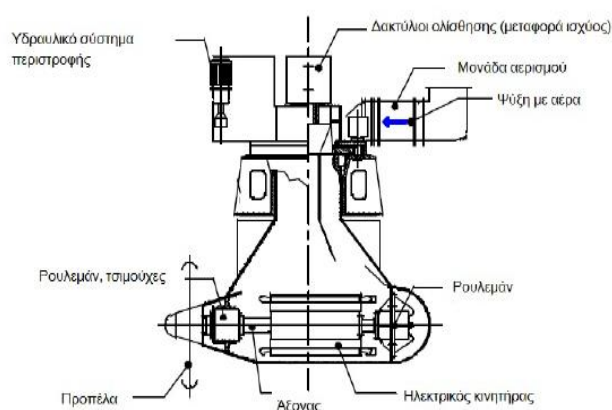
Η εικόνα 1.6 δείχνει τον ηλεκτρικό κινητήρα που βρίσκεται στον κλειστό συμπαγή φορέα. Η προπέλα σταθερού βήματος είναι τοποθετημένη απ' ευθείας στον άξονα. Με τον τρόπο αυτόν, αποφεύγεται η χρήση κιβωτίων ταχυτήτων και αυξάνεται η μηχανική αποδοτικότητα. Η ηλεκτρική ισχύς μεταφέρεται στον κινητήρα μέσω ευλύγιστης καλωδίωσης ή δακτυλίων ολίσθησης για λειτουργία 360 μοιρών. Επειδή η προπέλα έχει σταθερό βήμα και δεν υπάρχει κιβώτιο ταχυτήτων, η κατασκευή έχει μικρότερη μηχανική πολυπλοκότητα.

Ο φορέας μπορεί να σχεδιαστεί για λειτουργία ώθησης ή έλξης. Η μονάδα πρόωσης μπορεί να περιστραφεί και στις δυο φορές. Η προπέλα συνήθως είναι βελτιστοποιημένη μόνο για μια φορά περιστροφής, αλλά έχει μια μειωμένη ικανότητα αντίθετης ώθησης χωρίς τους μηχανικούς περιορισμούς του προηγούμενου συστήματος.

Μονάδες αζιμουθιακής πρόωσης βρίσκονται σε λειτουργία εδώ και πολλά χρόνια σε κρουαζιερόπλοια, παγοθραυστικά και τάνκερ. Το σύστημα αυτό είναι διαθέσιμο σε ένα εύρος ισχύος μεταξύ 1 MW έως 25 MW. Οι μεγαλύτερες μονάδες παρέχουν πρόσβαση μέσα στον φορέα για επιθεώρηση.

Συνοψίζοντας, τα κύρια πλεονεκτήματα των Azipod έναντι των άλλων συστημάτων ηλεκτροπρόωσης είναι τα εξής:

- Μειωμένες μηχανικές απώλειες λόγω της απ' ευθείας μετάδοσης της κίνησης από τον άξονα του κινητήρα στην προπέλα χωρίς τη χρήση αξόνων μετάδοσης και κιβωτίων ταχυτήτων.
- Καλύτερη υδροδυναμική απόδοση, αφού η έλλειψη αξόνων μετάδοσης επιτρέπει την τοποθέτηση της προπέλας πιο μακριά από το κύτος.
- Μεγαλύτερη εξοικονόμηση καυσίμων ως αποτέλεσμα των παραπάνω.
- Καλύτερη ευελιξία του πλοίου λόγω της δυνατότητας περιστροφής της προπέλας κατά 360 μοίρες.
- Δυνατότητα πλεύσης του πλοίου τόσο εμπροσθεν όσο και όπισθεν με σχεδόν την ίδια αποδοτικότητα.
- Μεγαλύτερη ευελιξία στη χωροθέτηση της γεννήτριας αφού ο κινητήρας βρίσκεται έξω από το κύτος.



Σχήμα 1.6: Μονάδα αζιμουθιακής πρόωσης [4]



Σχήμα 1.7: Προωστήρας Azipod έτοιμος για τοποθέτηση σε ναυπηγείο της Sovikens Verft [4]

1.1.2.5 Ηλεκτρικοί κινητήρες για εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης πλοίων [5] [6]

1.1.2.5.1 Σύγχρονοι Κινητήρες Εναλλασσόμενου Ρεύματος

Ο σύγχρονος κινητήρας είναι η πιο ώριμη τεχνολογία και είναι κατάλληλος για μεγάλα πλοία. Έχει καλύτερη απόδοση σε σχέση με τον κινητήρα επαγωγής, αλλά μπορεί να χάσει το συγχρονισμό του σε περίπτωση της μεγάλης μεταβολής στο φορτίου λόγω ενός γρήγορου ελιγμού, όπως μπορεί να απαιτείται σε ορισμένα πλοία. Η πιο πιθανή περίπτωση ηλεκτρικού συστήματος πρόωσης με σύγχρονους κινητήρες μπορεί να είναι σε μεγάλα πλοία, τα οποία είναι σχεδιασμένα για σχετικά μικρότερες ταχύτητες. Επιπλέον, οι περιορισμοί του εσωτερικού χώρου τους θα πρέπει να μην είναι τόσο μεγάλοι και το σύστημα πρόωσης τους να μην χρειάζεται να πληροί πρότυπα σε χαμηλά επίπεδα ακουστικού θορύβου και υψηλής αντοχής σε κραδασμούς.

1.1.2.5.2 Σύγχρονος Κινητήρας Εναλλασσόμενου Ρεύματος με Μόνιμο Μαγνήτη

Η υψηλή πυκνότητα ισχύος και η καλή ακουστική απόδοση καθιστούν τους σύγχρονους κινητήρες με μόνιμο μαγνήτη κατάλληλους για ένα ευρύ φάσμα πλοίων. Οι σχεδιασμοί με επιφανειακούς και εμφυτευμένους μαγνήτες παρέχουν υψηλή ανθεκτικότητα και απόδοση για όλα τις ταχύτητες και τα φορτία. Οι μηδενικές απώλειες χαλκού στο δρομέα οδηγούν στην υψηλή απόδοση και τη χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας. Χωρίς τυλίγματα στο δρομέα και με τη δυνατότητα για μεγαλύτερο διάκενο, πρόκειται για κινητήρες πιο αξιόπιστους, περισσότερο ανθεκτικούς στους εξωτερικούς κραδασμούς πιο εύκολα συντηρήσιμους και λιγότερο επιρρεπείς σε κατασκευαστικές αστοχίες. Επιπλέον, μπορούν να παράγουν τη μέγιστη ροπή σε ουσιαστικά μηδενική ταχύτητα, ενώ έχουν και πολύ υψηλή απόδοση στο μερικό φορτίο.

1.1.2.5.3 Ασύγχρονοι Κινητήρες Εναλλασσόμενου Ρεύματος

Ο επαγωγικός κινητήρας είναι μια ώριμη τεχνολογία για χρήση σε μεγάλα πλοία. Μπορεί να έχει αρκετά υψηλή πυκνότητα ισχύος για μεγάλα πλοία. Η απλή κατασκευή του ασύγχρονου κινητήρα όχι μόνο συμβάλλει στην εγγενή αξιοπιστία του, αλλά επιτρέπει επίσης απλό σχεδιασμό κατάλληλο ως προς τις απαιτήσεις αντοχής σε κραδασμούς. Έχει χαμηλό επίπεδο στερεόφερτου θορύβου, επιτρέποντας απευθείας τοποθέτηση στο σκαρί του πλοίου. Έχει υψηλή πυκνότητα ισχύος, αποδοτικότητα, χαμηλά επίπεδα θορύβου και δονήσεων, υψηλή ικανότητα να αντέχει σε κραδασμούς και χαμηλό κόστος συντήρησης και κόστος κύκλου ζωής. Η πρόοδος στην τεχνολογία κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών τους καθιστά από τους ιδανικότερους υποψήφιους για εφαρμογές πρόωσης πλοίων.

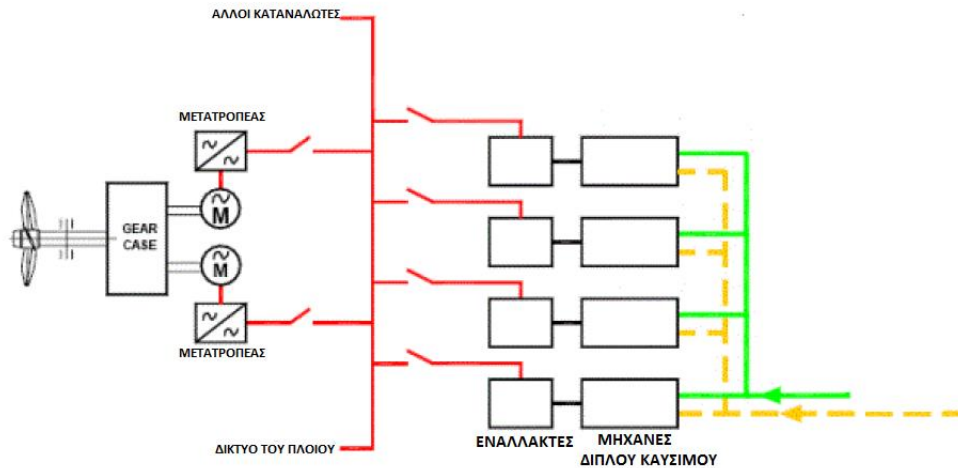
1.1.2.5.4 Προηγμένος Ασύγχρονος Κινητήρας (Advanced Induction Motor - AIM)

Ο υψηλής ισχύος προηγμένος ασύγχρονος κινητήρας σε συνδυασμό με ειδικά σχεδιασμένο σύστημα μεταβλητών στροφών, με διαμόρφωση εύρους παλμού (Pulse Width Modulation – PWM), μπορεί να αποτελέσει ένα συμπαγές και αποτελεσματικό σύστημα πρόωσης. Ο βέλτιστα σχεδιασμένος *AIM*, με δικό του σύστημα οδήγησης, επιτρέπει ευελιξία και βελτιστοποίηση του ηλεκτρομαγνητικού σχεδιασμού. Η πρόοδος των διπολικών τρανζίστορ μονωμένης πύλης (IGBT's) συνέβαλαν στο σχεδιασμό αποτελεσματικών PWM – μετατροπέων για συνδυασμό με κινητήρες επαγωγής. Ο *AIM* κατασκευάστηκε κυρίως για εφαρμογές όπου απαιτούνται χαμηλές ταχύτητες με υψηλή ροπή. Η τεχνολογία *AIM* μπορεί να θεωρηθεί πλέον ότι είναι η πιο ώριμη και δοκιμασμένη από κάθε άλλη τεχνολογία κινητήρα πρόωσης. Στο πλήρες φορτίο η απόδοση του κινητήρα αυτού είναι περίπου 97%.

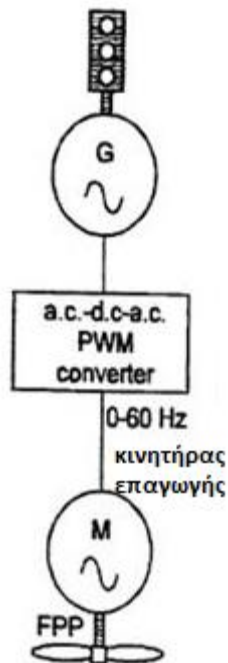
1.1.3 Ηλεκτροπρόωση σε πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου

Τα παραδοσιακά συστήματα πρόωσης στην περίπτωση των πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG carriers) είναι αυτά με ατμό. Παρόλα αυτά, ένα σύστημα πρόωσης με ατμό επιφέρει σημαντικά μειονεκτήματα, όπως είναι η χαμηλή απόδοση της εγκατάστασης με ταυτόχρονη μεγάλη κατανάλωση καυσίμου, επομένως και αυξημένες εκπομπές ρύπων, μεγάλο βάρος της εγκατάστασης, μεγαλύτερες ανάγκες σε χώρο για την εγκατάσταση του εξοπλισμού, καθώς επίσης και μειωμένη ικανότητα ελιγμών. Για τους λόγους αυτούς, τα τελευταία χρόνια τα νεότευκτα LNG carriers στην πλειοψηφία τους διαθέτουν σύστημα διπλού καυσίμου με ηλεκτροπρόωση. Στο παρακάτω σχήμα συγκεκριμένα φαίνεται η τυπική διάταξη ενός συστήματος ηλεκτροπρόωσης για την περίπτωση των πλοίων αυτών. Για τα ακρίβεια το σύστημα διαθέτει μοντέρνες γεννήτριες

διπλού καυσίμου. Οι μηχανές διπλού καυσίμου χρησιμοποιούν τόσο φυσικό σε αέριο σε σημείο βρασμού ώστε να εξατμιστεί (boil off gas – BOG) όσο και βαρύ πετρέλαιο (HFO). Οι κινητήρες πρόωσης είναι συνήθως κινητήρες επαγωγής υψηλής ισχύος της τάξης των 10-15 MW έκαστος, οδηγούμενοι από μετατροπείς μεταβλητών στροφών με διαμόρφωση εύρους παλμών. Η μείωση του κόστους παραγωγής, η δύναμη, η απλότητα και η αξιοπιστία των ασύγχρονων μηχανών κάνει τον κινητήρα κλωβού ιδιαίτερα κατάλληλο για τις απαιτητικές συνθήκες λειτουργίας και τις απαιτήσεις των θαλάσσιων εφαρμογών. [7] [8] [9] [10]



Σχήμα 1.8 : Τυπική διάταξη συστήματος ηλεκτροπρόωσης. Με πράσινο χρώμα συμβολίζεται το BOG ενώ με κίτρινο το HFO.



Σχήμα 1.9 : Τυπική διάταξη ασύγχρονου κινητήρα τροφοδοτούμενο από μετατροπέα [8]

Οι λόγοι που την καθιστούν την πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδο πρόωσης φαίνονται παρακάτω.

- Δυνατότητα χρησιμοποίησης φυσικού αερίου ως καύσιμο

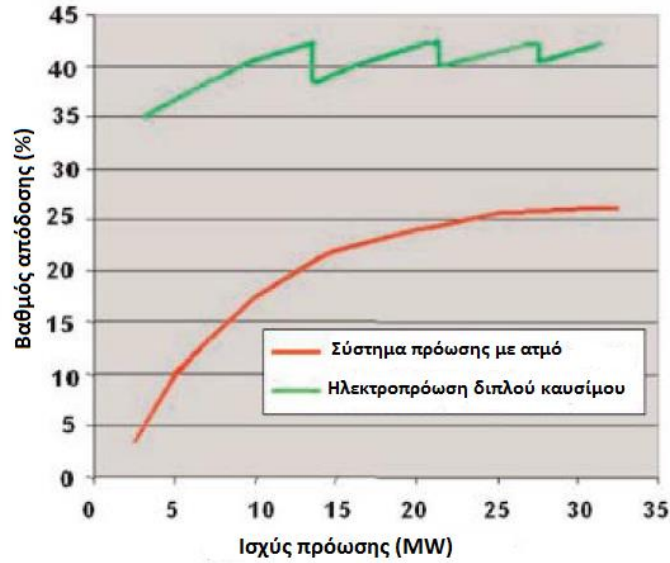
Η εξέλιξη της τεχνολογίας δεν έχει φτάσει σε σημείο ώστε αυτή την στιγμή να υπάρχουν διαθέσιμες συμβατικές δίχρονες μηχανές που να καταναλώνουν φυσικό αέριο. Αν και γίνονται μελέτες προς αυτή την κατεύθυνση με τις εταιρείες MAN B&W και Wartsila να πρωταγωνιστούν, δεν υπάρχουν αξιόπιστοι κινητήρες αυτή την στιγμή. Από την άλλη πλευρά, οι μοντέρνες θερμικές μηχανές οι οποίες μπορούν να καταναλώσουν συμβατικό πετρέλαιο diesel αλλά και φυσικό αέριο έχουν τεθεί σε κυκλοφορία και έχουν χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία. [10] [9] Χαρακτηριστικά αναφέρεται η μηχανή Wartsila L50DF η οποία διατίθεται από 5.7 – 17.1 MW στις 500 στροφές ανά λεπτό. [12]



Σχήμα 1.10 : Wartsila 6L50DF. Αποδίδει 5.7 MW στις 500 rpm [12]

- Υψηλότερος βαθμός απόδοσης [13]

Σε ονομαστικό φορτίο λειτουργίας, ο βαθμός απόδοσης μιας ηλεκτρομηχανής διπλού καυσίμου είναι περίπου 47%. Θεωρώντας απώλειες της τάξης των 8-10% λόγω μετάδοσης από την ηλεκτρογεννήτρια στους κινητήρες πρόωσης λόγω παρεμβολής μετασχηματιστών, πίνακα διακοπής ισχύος, ρυθμιστών συχνότητας (μετατροπείς) ο βαθμός απόδοσης μειώνεται. Παρόλα αυτά παραμένει μεγαλύτερος σε σχέση με το 30% που αντιστοιχεί στον βαθμό απόδοσης συστήματος πρόωσης με ατμό, συμπεριλαμβάνοντας τους λέβητες, τον ατμοστρόβιλο και τα μηχανικά μέρη. Η διαφορά αυτή μεγαλώνει ακόμα περισσότερο σε καταστάσεις ελιγμών ή σε λειτουργία σε περιοχές με περιορισμούς ταχύτητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από αρκετές μηχανές οι οποίες λειτουργούν παράλληλα και πάντα επιλέγεται η λειτουργία ενός βέλτιστου αριθμού κινητήριων μηχανών ώστε να πληρείται η απαίτηση ισχύος από το πλοίο. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται πιο συγκεκριμένα μια εικόνα του βαθμού απόδοσης από την περιοχή του καυσίμου ως τον άξονα της προπέλας ενός συστήματος ηλεκτροπρόωσης διπλού καυσίμου σε σύγκριση με ένα σύστημα πρόωσης ατμού.



Σχήμα 1.11 : Βαθμός απόδοσης από την περιοχή καυσίμου ως τον άξονα της προπέλας ενός συστήματος ηλεκτροπρόωσης διπλού καυσίμου σε σύγκριση με ένα σύστημα πρόωσης ατμού [13]

- Χαμηλότερη εγκατεστημένη ισχύς

Στα πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου οι απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας είναι αρκετά υψηλές. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι σε πλοίο χωρητικότητας 126000t οι ανάγκες για τη διαχείριση του φορτίου σε κατάσταση εκφόρτωσης ανέρχονται στα 6.4 MW περίπου. Η απαίτηση αυτή σε ισχύ παρουσιάζεται μόνο σε καταστάσεις επεξεργασίας του φορτίου ενώ κατά τη διάρκεια της πορείας εν πλω, οι απαιτήσεις αυτές μειώνονται αισθητά της τάξης του 60-70%. [13] Σε πλοία με συμβατική πρόωση όπου η ηλεκτρική ισχύς διαχωρίζεται από την ισχύ για πρόωση παρατηρείται υπερδιαστασιολόγηση των γεννητριών, ενώ συχνά λειτουργούν σε χαμηλά φορτία κατά την εν πλω λειτουργία τους. Αντίθετα, στα πλοία με ηλεκτροπρόωση χρησιμοποιείται μια κοινή μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος για τις καταστάσεις πρόωσης και εκφόρτωσης του φορτίου. Αυτό σημαίνει ότι η εγκατεστημένη ισχύς μπορεί να μειωθεί, αφού η πρόωση και η επεξεργασία του φορτίου αφορούν δύο ανεξάρτητα χρονικά διαστήματα.

- Ηλεκτρική μετάδοση μεταβλητής ταχύτητας

Ο συνδυασμός ηλεκτρικού κινητήρα και μετατροπέα ισχύος συνεπάγεται τη δυνατότητα μέγιστης ροπής σε ένα μεγάλο εύρος στροφών. Ο μετατροπέας ισχύος χρησιμοποιείται για να προστατεύει τα μηχανικά μέρη ρυθμίζοντας ανάλογα με τις ανάγκες την παραγόμενη μηχανική ισχύ και ροπή του κινητήρα. Αποτέλεσμα είναι η άμεση απόκριση και η εναλλαγή της ταχύτητας του πλοίου σε καταστάσεις ελιγμών αφού η έλικα του πλοίου μπορεί να παρουσιάζει μέγιστη ροπή σε οποιοδήποτε επίπεδο στροφών.

1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η σχεδίαση και η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας επαγωγικού κινητήρα για εφαρμογή σε ηλεκτροπρόωση πλοίου. Η εφαρμογή αυτή αφορά χρήση του κινητήρα για κύρια πρόωση σε πλοίο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG carrier).

Με βάση τις γεωμετρικές και λειτουργικές απαιτήσεις που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη εφαρμογή καθορίστηκαν οι αντίστοιχες προδιαγραφές που τις ικανοποιούν. Στη συνέχεια, μέσω της κατάλληλης προκαταρκτικής σχεδίασης προέκυψε η αρχική σχεδίαση του κινητήρα επαγωγής, όπου καθορίζονται οι βασικές γεωμετρικές διαστάσεις για τον κινητήρα επαγωγής. Τέλος, έπειτα από την ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε σε παραμετροποιημένο μοντέλο σχεδίασης του κινητήρα μέσω κατάλληλου λογισμικού ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, προέκυψε η βέλτιστη γεωμετρία, η οποία ελαχιστοποιεί μια σύνθετη συνάρτηση κόστους, με κριτήρια την ελαχιστοποίηση των απωλειών και της κυμάτωσης ροπής για την ονομαστική λειτουργία.

1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την ηλεκτρική πρόωση σε πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG carriers). Έπειτα από τη βιβλιογραφική διερεύνηση προκύπτει ότι ιδιαίτερα για την παρούσα εφαρμογή επιλέγεται ασύγχρονος κινητήρα για την κύρια πρόωσή του. Επομένως, για τον υπό μελέτη κινητήρα πρόωσης στη συνέχεια αναπτύσσεται η μεθοδολογία σχεδίασης, ανάλυσης και βελτιστοποίησης, η οποία βασίζεται τόσο σε θεμελιώδεις αναλυτικές σχέσεις σχεδίασης ηλεκτρικών μηχανών, όσο και στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τέλος, μέσω των αποτελεσμάτων της ανάλυσης αυτής εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα.

Πιο αναλυτικά, στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι ηλεκτρικές μηχανές επαγωγής, τα κατασκευαστικά και λειτουργικά τους χαρακτηριστικά, το ισοδύναμο κύκλωμά τους, ενώ τέλος γίνεται μια κατάταξη των μηχανών αυτών κατά NEMA.

Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζεται η μεθοδολογία σχεδίασης και της ανάλυσης μιας ηλεκτρικής μηχανής επαγωγής. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά πραγματοποιείται μια ανάλυση σχετικά με τα υλικά κατασκευής των ηλεκτρικών μηχανών, στη συνέχεια παρουσιάζεται η μεθοδολογία που αφορά την προκαταρκτική σχεδίαση των ηλεκτρικών μηχανών, δηλαδή τον τρόπο που διαστασιολογούνται βασικά μεγέθη της μηχανής. Έπειτα, παρουσιάζεται η μέθοδος ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία και το αντίστοιχο λογισμικό, το FEMM. Τέλος, παρουσιάζεται η μεθοδολογία που αφορά την εξαγωγή του ισοδυνάμου κυκλώματος της μηχανής που μελετάται.

Στο Κεφάλαιο 4, αφού οριστούν οι προδιαγραφές που ικανοποιούν τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής γίνεται η προκαταρκτική σχεδίαση του επαγωγικού κινητήρα. Στην συνέχεια, εισάγεται η αρχική αυτή γεωμετρία, παραμετροποιημένη στο λογισμικό FEMM και επιβεβαιώνονται τα χαρακτηριστικά της μηχανής. Τέλος, εξάγεται και το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα με βάση τη μεθοδολογία που έχει αναπτυχθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο και τη βοήθεια του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων FEMM.

Στο Κεφάλαιο 5, πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του κινητήρα με βάση ανεξάρτητες μεταβλητές όπως είναι το μήκος και το πλάτος των δοντιών του στάση και του δρομέα που επηρεάζουν σαφώς άλλες εξαρτημένες μεταβλητές όπως αυτές έχουν ορισθεί στην παραμετροποιημένη σχεδίαση. Τα κριτήρια περιλαμβάνουν τόσο την ελαχιστοποίηση των απωλειών του κινητήρα, την κυμάτωση της ροπής για την ονομαστική λειτουργία του κινητήρα. Αφού, επιλεγθεί η τελική γεωμετρία που πληροί τα παραπάνω κριτήρια υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης της γεωμετρίας αυτής.

Στο Κεφάλαιο 6, συγκεντρώνονται τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία. Πιο συγκεκριμένα, συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα από τη διαδικασία της μελέτης, της σχεδίασης και της βελτιστοποίησης του κινητήρα επαγωγής. Στη συνέχεια, αναφέρονται τόσο τα σημεία επιστημονικής συνεισφοράς της εργασίας αυτής, όσο και για τα σημεία για περαιτέρω διερεύνηση.

2 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

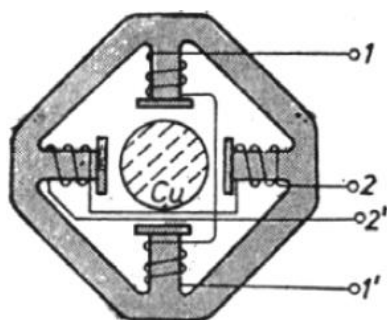
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

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

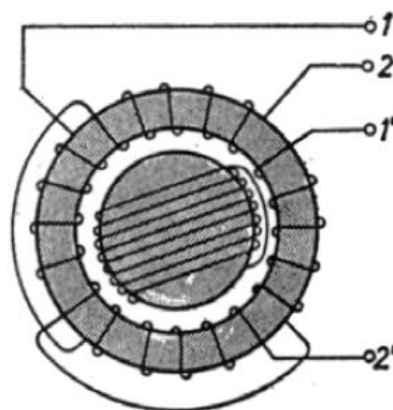
Στο εμπόριο διατίθενται διάφορα είδη επαγωγικών μηχανών καθένα για διαφορετική εφαρμογή. Αν και οι επαγωγικές μηχανές είναι εύκολες στο σχεδιασμό και την κατασκευή σε σχέση με της μηχανές συνεχούς ρεύματος, ο έλεγχος της ροπής και της ταχύτητας που απαιτείται σε αρκετές εφαρμογές απαιτεί μεγαλύτερη κατανόηση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

2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η ιστορία της επαγωγικής μηχανής τοποθετείται στα τέλη της δεκαετίας του 1880 όπου δυο εφευρέτες που πειραματίζονταν ανεξάρτητα με το εναλλασσόμενο ρεύμα, σε μια εποχή όπου κυριαρχούσε το συνεχές ρεύμα, ανακάλυψαν την έννοια του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Ο λόγος για τον Ιταλό Galileo Ferraris (1847 - 1897) ο οποίος κατά τη διάρκεια των πειραμάτων του ανακάλυψε ότι δυο εναλλασσόμενα ρεύματα ίδιας συχνότητας αλλά διαφορετικής αρχικής φάσης παράγουν σε έναν χώρο ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο και για τον Nicola Tesla (1856 - 1943) ο οποίος όμως πειραματιζόταν με τρία εναλλασσόμενα ρεύματα και το 1891 εξέδωσε άρθρο όπου εξηγούσε θεωρητικά τη θεμελίωση του τρόπου λειτουργίας του επαγωγικού κινητήρα.



Σχήμα 2.1: Κινητήρας επαγωγής του Ferraris



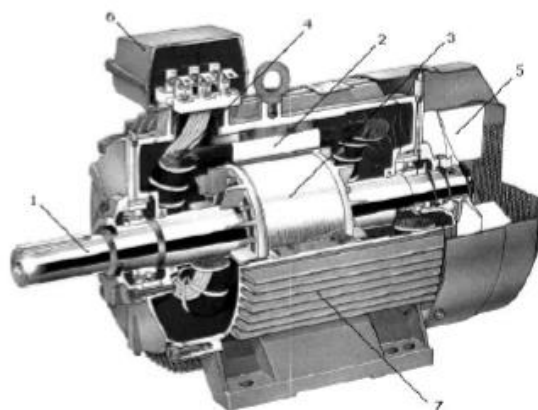
Σχήμα 2.2: Κινητήρας επαγωγής του Tesla

Ο πρώτος επαγωγικός κινητήρας με ικανοποιητική συμπεριφορά κατασκευάστηκε από τον Ρώσο – Γερμανό Michael Dolivo-Dobrowolsky (1862 – 1919) το έτος 1889 ενώ πιστεύεται ότι

το πρώτο επαγωγικό τύμπανο κατασκευάστηκε από τον Tesla ήδη από το 1883. Έκτοτε, οι επαγωγικές μηχανές στηρίζονται στις θεωρίες του Faraday και του Tesla χωρίς καμία ραγδαία εξέλιξη ως προς τη δομή της κατασκευής τους παρά μόνο βελτιώσεις επιδόσεων, αποδόσεων και όγκου κατασκευής.

2.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

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 δυο. Το σχήμα 2.3 είναι μια τομή της μηχανής όπου φαίνονται τα κύρια κατασκευαστικά στοιχεία της.



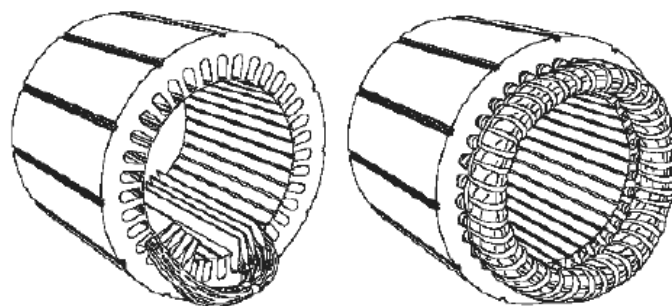
Σχήμα 2.3: Κινητήρας επαγωγής βραχυκυκλωμένου κλωβού: 1. άξονας, 2. Στάτης, 3. Δρομέας, 4. τυλίγμα στάτη, 5. φτερωτή ανεμισμού, 6. κιβώτιο σύνδεσης τυλιγμάτων/ακροδεκτών, 7. πλαίσιο (κατασκευή ABB, 90 kW, 1484 ΣΑΛ, 630kg) [7]

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 στον 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 δυο 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 (έτσι προκύπτει και το όνομα επαγωγική μηχανή). Η αλληλεπίδραση των δύο αυτών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων παράγει ροπή. Ως αποτέλεσμα, η μηχανή περιστρέφεται στην κατεύθυνση της παραγόμενης ροπής.

2.3.1 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 2.4.



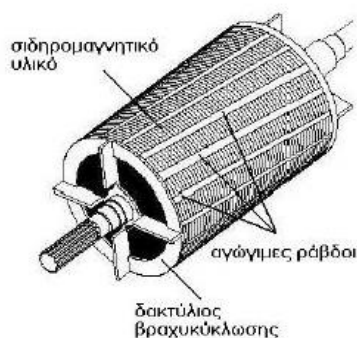
Σχήμα 2.4: Στάτης μηχανής επαγωγής [7]

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 στην 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. [7] [8] [9]

2.3.2 Δρομέας

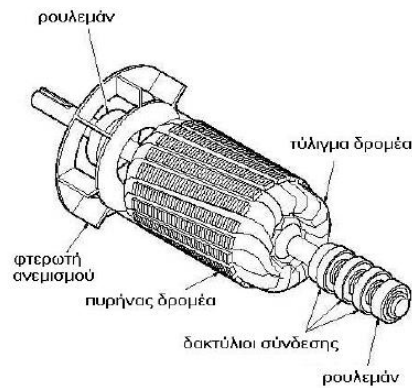
Στο δρομέα της μηχανής επαγωγής, το τύλιγμα είναι ηλεκτρικά κλειστό και πολύ συχνά δεν έχει εξωτερικούς ακροδέκτες. Υπάρχουν δυο τύποι τυλιγμάτων δρομέα που χρησιμοποιούνται:

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



Σχήμα 2.5: Δρομέας με τύλιγμα κλωβού [7]

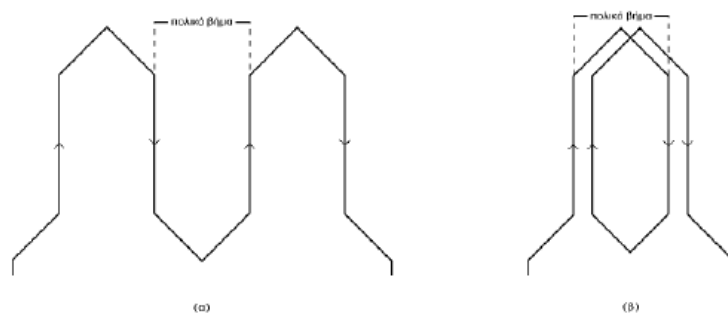
- Τύλιγμα δρομέα με δακτυλίους: Τυλιγμένοι δρομείς για κινητήρες μέχρι 10 kW εφοδιάζονται με συμμετρικά τριφασικά τυλίγματα όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στο στάτη. Για δρομείς κινητήρων μεγαλύτερης ισχύος χρησιμοποιούνται σχεδόν πάντοτε δύο στρώματα με δυο πλευρές πηνίου σε κάθε αύλακα και με ακέραιο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



Σχήμα 2.6: Τυλιγμένος δρομέας [7]

2.3.3 Τυλίγματα

Η επιλογή του είδους του τυλίγματος της μηχανής έχει στόχο την όσο καλύτερη χωρική κατανομή του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Υπάρχουν δύο είδη τυλίγματος. Το βροχοειδές τύλιγμα (σχήμα 2.7 β) που συναντάται συνήθως σε μηχανές με μικρό αριθμό πόλων, κινητήρες πολλών τροφών ή γεννήτριες θερμικών σταθμών και το κυματοειδές (σχήμα 2.7 α) που συναντάται σε κινητήρες χαμηλών στροφών ή γεννήτριες υδροηλεκτρικών σταθμών.



Σχήμα 2.7: Τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών (α) κυματοειδές (β) βροχοειδές [9]

2.4 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Η τροφοδότηση του στάτη με εναλλασσόμενη τάση δημιουργεί κύμα ΜΕΔ που στρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα n_s (ΣΑΛ):

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2.1)$$

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

Αντίστοιχα σε rad/sec η σύγχρονη ταχύτητα είναι

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p/2} \quad (2.2)$$

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

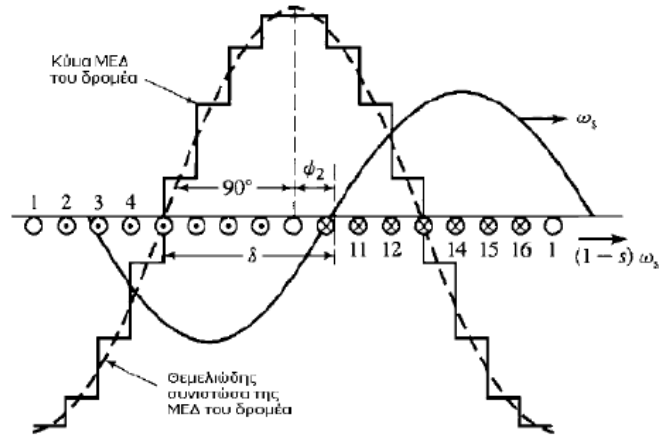
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2.3)$$

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

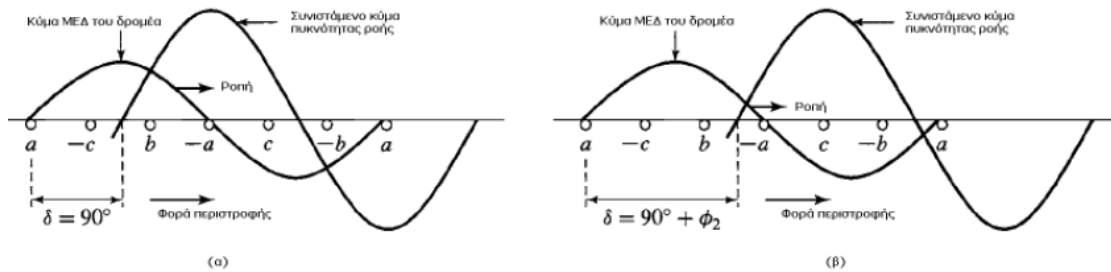
$$n = (1 - s)n_s \quad (2.4)$$

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

Τα κύματα μαγνητικής ροής και ΜΕΔ στο διάκενο φαίνονται στο σχήμα 2.8 και σχήμα 2.9 για την περίπτωση τυλίγματος κλωβού και τυλιγμένου δρομέα, αντίστοιχα.



Σχήμα 2.8: Ανάπτυξη κύματος ΜΕΑ σε δρομέα τυλιγμένου κλωβού [7]



Σχήμα 2.9: Συνιστάμενο κύμα ΜΕΑ και κύμα ΜΕΑ δρομέα: (α) $\cos\phi_2=1$, (β) $\cos\phi_2 \neq 1$ [7]

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 σε σύνδεση αστέρα ώστε τα ρεύματα να είναι ρεύματα γραμμής και οι τάσεις φασικές. Με τον τρόπο αυτό παράγεται ένα ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης. Τα ρεύματα και οι τάσεις των άλλων φάσεων μπορούν να βρεθούν με κατάλληλη μετακίνηση της φάσης ($\pm 120^\circ$ στην περίπτωση της 3Φ μηχανής).

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

$$\widehat{V}_1 = \widehat{E}_2 + \widehat{I}_1(R_1 + jX_1) \quad (2.5)$$

όπου \widehat{V}_1 η τάση ακροδεκτών του στάτη

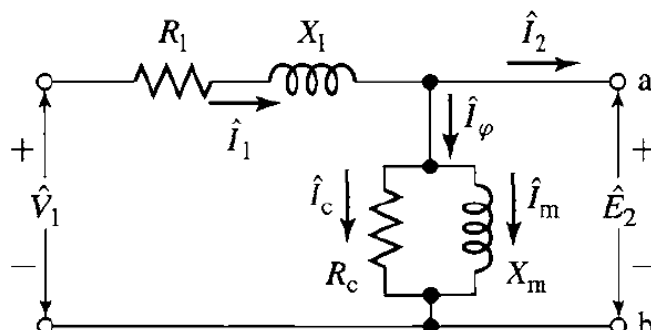
\widehat{E}_2 η αντι-ΗΕΔ που αναπτύσσεται από την συνιστάμενη ροή διακένου

\widehat{I}_1 το ρεύμα του στάτη

R_1 η πραγματική αντίσταση του στάτη

X_1 η αντίδραση σκεδάσεως του στάτη

Οι θετικές φορές των ρευμάτων και των τάσεων σημειώνονται στο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.10.



Σχήμα 2.10: Ισοδύναμο κύκλωμα στάτη επαγωγικού κινητήρα [7]

Η συνιστάμενη ροή διακένου δημιουργείται από τις συνδυασμένες ΗΕΔ των ρευμάτων του στάτη και του δρομέα. Ακριβώς όπως και στο ανάλογο του μετασχηματιστή, το ρεύμα μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες, μία συνιστώσα φορτίου και μία διεγέρσεως. Η συνιστώσα φορτίου \hat{I}_2 παράγει ΜΕΔ η οποία αντιτίθεται ακριβώς στην ΗΕΔ του ρεύματος του δρομέα. Η συνιστώσα διεγέρσεως \hat{I}_φ είναι το πρόσθετο ρεύμα του στάτη, το οποίο απαιτείται για τη δημιουργία της συνιστάμενης ροής διακένου και είναι συνάρτηση της ΗΕΔ \hat{E}_1 . Το ρεύμα διεγέρσεως μπορεί να αναλυθεί σε μια συνιστώσα απωλειών πυρήνα \hat{I}_π σε φάση με την \hat{E}_1 και μια συνιστώσα μαγνήτισης \hat{I}_m που έπεται της \hat{E}_1 κατά 90° . Στο ισοδύναμο κύκλωμα το ρεύμα διεγέρσεως μπορεί να περιληφθεί μέσω παράλληλου κλάδου, που σχηματίζεται από την αγωγιμότητα g_π των απωλειών πυρήνα και από μια μαγνητίζουσα αγωγιμότητα b_m παράλληλα με την τάση \hat{E}_1 (σχήμα 2.10). Τόσο το g_π όσο και το b_m συνήθως καθορίζονται στην ονομαστική συχνότητα του στάτη και για μια τιμή της ΗΕΔ \hat{E}_1 πλησίον της αναμενόμενης τιμής λειτουργίας. Γίνεται η παραδοχή ότι και τα δύο παραμένουν σταθερά για τις μικρές αποκλίσεις από την τιμή αυτή η οποία σχετίζεται με την κανονική λειτουργία του κινητήρα.

Το ισοδύναμο κύκλωμα που περιγράφει τα φαινόμενα στο στάτη, ως τώρα, είναι πανομοιότυπο με αυτό του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή. Για την ολοκλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος πρέπει να ενσωματωθεί και η επίδραση του δρομέα. Τα βασικά φαινόμενα είναι όμοια είτε ο δρομέας είναι βραχυκυκλωμένου κλωβού, είτε δακτυλιοφόρος. Από την άλλη πλευρά του ισοδύναμου κυκλώματος του στάτη (σχήμα 2.10), ο δρομέας μπορεί να παρασταθεί σαν μια ισοδύναμη αντίσταση Z_2 :

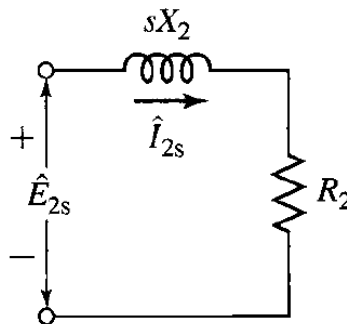
$$Z_2 = \frac{\hat{E}_2}{\hat{I}_2} \quad (2.6)$$

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

Στην ανάλυση των μετασχηματιστών, από την πλευρά του πρωτεύοντος, το δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή μπορεί να αντικατασταθεί από ένα ισοδύναμο δευτερεύον τύλιγμα που έχει τον ίδιο αριθμό ελιγμάτων με το πρωτεύον. Σε έναν μετασχηματιστή με λόγο ελιγμάτων και δευτερεύουσες παραμέτρους γνωστές, αυτό μπορεί να γίνει με αναγωγή των σύνθετων αντιστάσεων από το δευτερεύον στο πρωτεύον πολλαπλασιάζοντας με το τετράγωνο του λόγου ελιγμάτων πρωτεύοντος προς δευτερεύον. Το συνεπαγόμενο ισοδύναμο κύκλωμα προκύπτει πλήρως ανηγμένο στην πλευρά του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή. Ομοίως, στην περίπτωση της πολυφασικής ασύγχρονης μηχανής, αν ο δρομέας αντικατασταθεί με έναν ισοδύναμο δρομέα με πολυφασικό τύλιγμα με τον ίδιο αριθμό φάσεων και ελιγμάτων με τον 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 τον στάτη τάσης είναι απλά η σύνθετη αντίσταση βραχυκύκλωσης του τυλιγματος δρομέα. Συνεπώς, η σχέση μεταξύ της σύνθετης αντίστασης σκέδασης του ισοδύναμου δρομέα στη συχνότητα ολίσθησης (Z_{2s}) και της αντίστοιχης του πραγματικού δρομέα (Z_{motor}) θα είναι:

$$Z_{2s} = \frac{\widehat{E}_{2s}}{\widehat{I}_{2s}} = R_2 + jsX_2 \quad (2.7)$$

Σημειώνεται ότι η αντίδραση X_2 είναι η αντίδραση σκέδασης του δρομέα στη συχνότητα του στάτη (f_s). Καθώς η πραγματική συχνότητα των ρευμάτων του δρομέα είναι $f_r = sf_s$, η αντίδραση σκέδασης X_2 μπορεί να αναχθεί στη συχνότητα αυτή απλά πολλαπλασιάζοντας την με την ολίσθηση s . Το ισοδύναμο κύκλωμα, όπως φαίνεται από το πλαίσιο αναφοράς της συχνότητας ολίσθησης των ρευμάτων του δρομέα, δίνεται στο σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11: Ισοδύναμο κύκλωμα δρομέα επαγωγικού κινητήρα στη συχνότητα ολίσθησης [7]

Στη συνέχεια παρατηρείται ότι το κύμα ΜΕΔ διακένου παράγεται από τη συνδυασμένη δράση του ρεύματος του στάτη \widehat{I}_1 και του αντίστοιχου ρεύματος φορτίου \widehat{I}_2 . Το ίδιο μπορεί να εκφραστεί παρομοίως σε όρους ρεύματος στάτη και αντίστοιχα ρεύματος δρομέα \widehat{I}_{2s} . Αυτά τα δύο ρεύματα είναι ίσα σε πλάτος αφού το \widehat{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 είτε του ισοδύναμου δρομέα, το \widehat{I}_2 και \widehat{I}_{2s} , πρέπει επίσης να είναι ίσα σε φάση (στις αντίστοιχες ηλεκτρικές τους συχνότητες) γι' αυτό θεωρείται:

$$\widehat{I}_2 = \widehat{I}_{2s} \quad (2.8)$$

Τέλος, το κύμα ροής του διακένου επάγει και την ΗΕΔ \widehat{E}_{2s} , στη συχνότητα ολισθήσεως του δρομέα και την αντι-ΗΕΔ \widehat{E}_2 του στάτη. Αν δεν υπήρχε η επίδραση της ταχύτητας (λειτουργία σε 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 και αντι-ΗΕΔ είναι:

$$E_2 = sE_{2s} \quad (2.9)$$

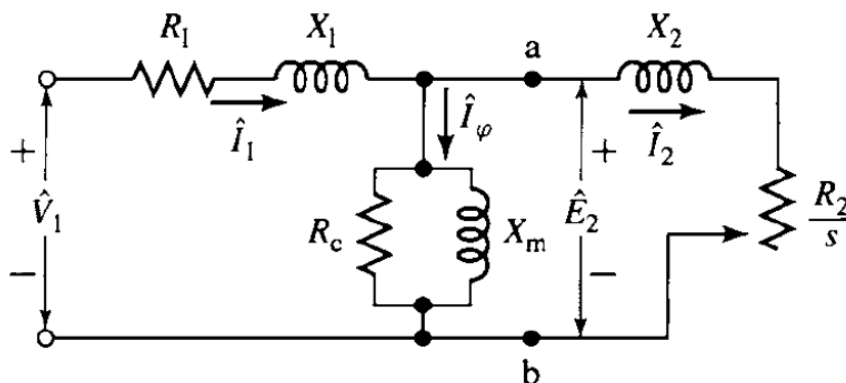
Καθώς η φάση κάθε μιας από αυτές τις τάσεις και του προκύπτοντος κύματος ροής διακένου είναι 90° , αυτές οι δύο τάσεις πρέπει να έχουν ίσους φασιθέτες στις αντίστοιχες ηλεκτρικές τους συχνότητες. Έτσι:

$$\widehat{E}_2 = s\widehat{E}_{2s} \quad (2.10)$$

Εύκολα προκύπτει ότι:

$$Z_2 = \frac{\widehat{E}_2}{\widehat{I}_2} = R_2 + jX_2 \quad (2.11)$$

Έτσι ολοκληρώνεται η κατασκευή του ανά φάση ισοδύναμου κυκλώματος της μηχανής επαγωγής. Η Z_2 είναι η σύνθετη αντίσταση του ισοδύναμου ακινητοποιημένου 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 2.12.



Σχήμα 2.12: Μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα [7]

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 \widehat{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, γιατί απλούστατα τα τυλίγματα του στάτη βλέπουν τα κύματα ΜΕΔ και ροής να ταξιδεύουν με τη σύγχρονη ταχύτητα.

2.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΡΟΠΗΣ ΣΤΡΟΦΩΝ

2.5.1 Ανάλυση Ισοδυνάμου Κυκλώματος

Από το κύκλωμα του σχήματος 2.12 μπορούν να υπολογισθούν το ρεύμα, η ενεργός και άεργος ισχύς που απορροφώνται από τον κινητήρα σε δεδομένη ολίσθηση s . Επιπλέον, μπορούν να καθορισθούν οι συνθήκες μηχανικής εξόδου.

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

$$P_{g1} = m_1 E_1 I_2 \cos \varphi_2 \quad (2.12)$$

όπου m_1 ο αριθμός των φάσεων του στάτη. Η αντιστοιχη ροπή θα είναι τότε:

$$T = \frac{1}{\omega_s} m_1 E_1 I_2 \cos \varphi_2 = \frac{p_s}{4\pi f} m_1 E_1 I_2 \cos \varphi_2 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2.13)$$

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

$$T = \frac{1}{\omega_s} P_{g1} \quad (2.14)$$

Εξάλλου το ισοδύναμο κύκλωμα δείχνει ότι P_{g1} ισούται με την ισχύ που απορροφάται από την ανακλώμενη αντίσταση δρομέα R_2/s για όλες τις φάσεις. Έτσι:

$$P_{g1} = m_1 I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.15)$$

$$T = \frac{1}{\omega_s} m_1 I_2^2 \frac{R_2}{s} \quad (2.16)$$

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

$$P = (1 - s)\omega_s T = (1 - s)P_{g1} \quad (2.17)$$

εφόσον η μηχανική γωνιακή ταχύτητα του δρομέα σε ολίσθηση s είναι $(1 - s)\omega_s \text{ rad/sec}$. 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 στη συχνότητα ολισθήσεως είναι γι' αυτό:

$$P_{g2} = sP_{g1} \quad (2.18)$$

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

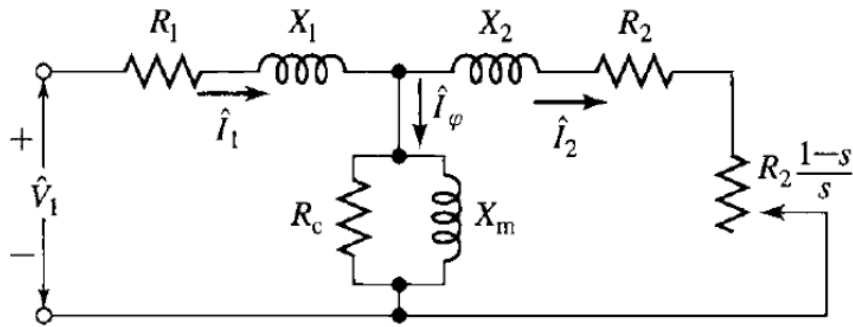
$$\text{απώλεια χαλκού δρομέα} = sP_{g1} = s\omega_s T \quad (2.19)$$

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

Η αντικατάσταση της εξίσωσης (2.15) στην εξίσωση (2.17) δίδει για την εσωτερική μηχανική ισχύ:

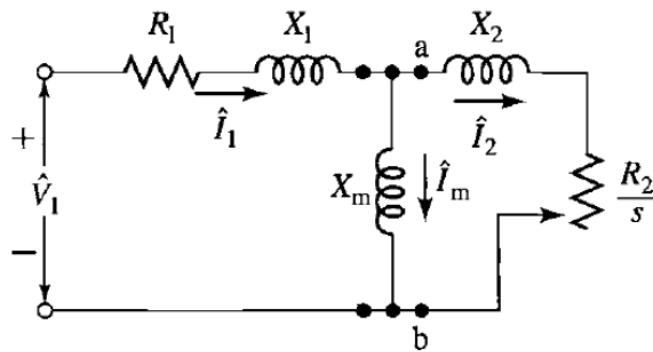
$$P = m_1 I_2^2 R_2 \frac{(1-s)}{s} \quad (2.20)$$

Όταν πρέπει να θεωρηθούν απόψεις ισχύος, το ισοδύναμο κύκλωμα σχεδιάζεται συχνά όπως το σχήμα 2.13. Η εσωτερική μηχανική ισχύς ανά φάση στάτη ισούται με την ισχύ που απορροφάται από την αντίσταση $R_2 \cdot (1 - s)/s$.



Σχήμα 2.13: Εναλλακτική απεικόνιση ισοδύναμου κυκλώματος επαγωγικού κινητήρα [7]

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 επιδόσεις του φορτίου μπορούν να αφαιρεθούν κατά αυτό τον τρόπο. Το τελικό υπόλοιπο είναι διαθέσιμο σε μηχανική μορφή στον άξονα ως χρήσιμο έργο.



Σχήμα 2.14: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα [7]

Μια απλούστευση του ισοδύναμου κυκλώματος της μηχανής προκύπτει αν η παράλληλη αντίσταση 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 γίνεται όπως το σχήμα 2.14 και το σχετικό σφάλμα είναι αμελητέο. Μια τέτοια μέθοδος έχει ένα πλεονέκτημα κατά τη δοκιμή του κινητήρα, διότι η απώλεια πυρήνα κενού φορτίου δε χρειάζεται να χωριστεί τότε από την τριβή και τον ανεμισμό.

2.5.2 Χαρακτηριστική ροπής-στροφών

Για τον καθορισμό της ροπής και της ισχύος του κινητήρα επαγωγής με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα χρησιμοποιείται το θεώρημα *Thevenin* για την απλοποίηση του ισοδύναμου κυκλώματος. Με την ανάλυση αυτή η τάση του στάτη \widehat{V}_1 στο κύκλωμα του σχήματος 2.14 αντικαθιστώντας με την ισοδύναμη τάση \widehat{V}_{1a} η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$\widehat{V}_{1a} = \widehat{V}_1 \frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \quad (2.22)$$

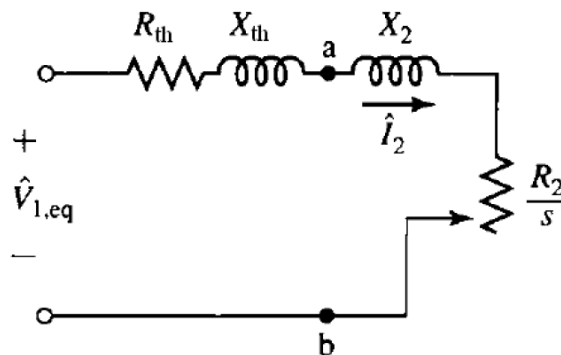
Οι σύνθετες αντιστάσεις αντικαθίστανται με τις ισοδύναμες αντιστάσεις

$$Z_{1a} = (R_1 + jX_1) // jX_m \quad (2.23)$$

$$Z_{1a} = \frac{(R_1 + jX_1)jX_m}{(R_1 + jX_1 + jX_m)} \quad (2.24)$$

$$Z_{1a} = R_{1a} + jX_{1a} \quad (2.25)$$

Έτσι προκύπτει το απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος 2.15:



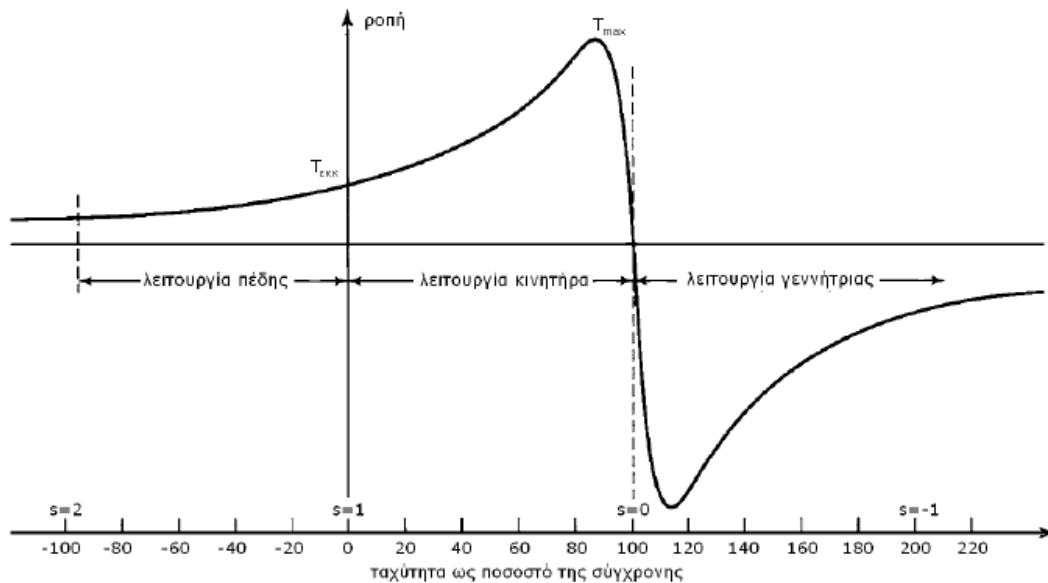
Σχήμα 2.15: Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα, απλοποιημένο με το θεώρημα *Thevenin* [7]

Από το κύκλωμα του σχήματος 2.15 μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί το ρεύμα \hat{I}_2 το οποίο όταν αντικατασταθεί στην εξίσωση ροπής δίνει την έκφραση της ροπής μέσω του ισοδύναμου κυκλώματος.

$$\hat{I}_2 = \frac{\hat{V}_{1a}}{Z_{1a} + Z_2} = \frac{\hat{V}_{1a}}{(R_{1a} + R_2/s) + j(X_{1a} + X_2)} \text{ και } I_2^2 = \frac{V_{1a}^2}{(R_{1a} + R_2/s)^2 + (X_{1a} + X_2)^2}$$

$$\Rightarrow T = \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_{1a}^2 R_2/s}{(R_{1a} + R_2/s)^2 + (X_{1a} + X_2)^2} \quad (2.26)$$

Από την παραπάνω εξίσωση μπορεί να χαραχθεί η καμπύλη ροπής – στροφών που φαίνεται στο σχήμα 2.16



Σχήμα 2.16: Καμπύλη ροπής – στροφών/ολίσθησης μηχανής επαγωγής [7]

Στο σχήμα 2.16 διακρίνονται οι τρεις περιοχές λειτουργίας της επαγωγικής μηχανής. Ανάλογα με την ολίσθηση η μηχανή συμπεριφέρεται ως κινητήρας ($1 > s > 0$), ως γεννήτρια ($s < 0$) ή βρίσκεται σε κατάσταση πέδησης ($s > 1$).

Η μηχανή εισέρχεται στην περιοχή πέδησης όταν κατά τη διάρκεια λειτουργίας της ως κινητήρας γίνει αντιστροφή των φάσεων στα τυλίγματα τροφοδοσίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την άμεση αναστροφή του μαγνητικού πεδίου και την ανάπτυξη μιας αρνητικής ροπής (ηλεκτρομαγνητική) η οποία αντιτίθεται στην ήδη υπάρχουσα ροπή (μηχανική) του δρομέα, γεγονός που οδηγεί στην πέδηση της μηχανής. Αν μόλις εξισωθούν οι δύο ροπές αποσυνδεθεί η τροφοδοσία τότε γίνεται αποτελεσματική πέδηση του κινητήρα.

Η μηχανή συμπεριφέρεται ως κινητήρας όταν $1 > s > 0$. Όταν η ολίσθηση είναι 0 δηλαδή ο κινητήρας είναι στη σύγχρονη ταχύτητα τότε δεν αναπτύσσεται ηλεκτρομαγνητική ροπή. Καθώς η ολίσθηση αυξάνει ενώ η ταχύτητα μειώνεται η ηλεκτρομαγνητική ροπή αυξάνεται μέχρι τη μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής. Σε αυτή την περιοχή λειτουργίας η πτώση τάσης του στάτη είναι χαμηλή και η ροή διακένου παραμένει περίπου σταθερή. Πέραν της ροπής ανατροπής η ηλεκτρομαγνητική ροπή μειώνεται με την αύξηση της ολίσθησεως και για $s=1$ βρίσκεται η ροπή εκκινήσεως. Αντικατάσταση του s στην εξίσωση της ροπής (σχέση 2.26) δίνει τη ροπή εκκινήσεως:

$$T_{εκκ} = \frac{1}{\omega_s} \frac{3V_{1a}^2 R_2}{(R_{1a} + R_2)^2 + (X_{1a} + X_2)^2} \quad (2.27)$$

Η μέγιστη ροπή ή ροπή ανατροπής προκύπτει αν από την εξίσωση της ροπής (σχέση 2.26) 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:

$$\frac{R_2}{s_{maxT}} = \sqrt{R_{1a}^2 + (X_{1a} + X_2)^2} \quad (2.28)$$

Η ολίσθηση τότε στη μέγιστη ροπή είναι:

$$s_{maxT} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{1a}^2 + (X_{1a} + X_2)^2}} \quad (2.29)$$

Οπότε η μέγιστη ροπή γίνεται:

$$T_{max} = \frac{3}{2} \frac{1}{\omega_s} \frac{V_{1a}^2}{R_{1a} + \sqrt{R_{1a}^2 + (X_{1a} + X_2)^2}} \quad (2.30)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι η ολίσθηση είναι ευθέως ανάλογη προς την αντίσταση του δρομέα R_2 . Όταν η αντίσταση του δρομέα αυξηθεί με την προσθήκη μιας παράλληλης εξωτερικής αντίστασης (όταν η μηχανή είναι τυλιγμένου δρομέα) η μέγιστη εσωτερική ροπή είναι ανεπηρέαστη αλλά η ταχύτητα στην οποία λαμβάνεται μπορεί να ελεγχθεί.

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

2.6 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

Λόγω της ποικιλίας των εφαρμογών και των διαφορετικών λειτουργικών χαρακτηριστικών των κινητήρων επαγωγής η NEMA (National Electrical Manufacturer Association) των ΗΠΑ προχώρησε στην κατάταξη των κινητήρων επαγωγής σε κατηγορίες ανάλογα με την χαρακτηριστική ροπής – στροφών του κάθε κινητήρα. Οι κατηγορίες αυτές ονομάζονται κλάσεις κινητήρων και παρουσιάζονται πιο κάτω. [7] [10]

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 ίδια περίπου ροπή εκκινήσεως με τις μηχανές κλάσεως 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 HP – 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 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.

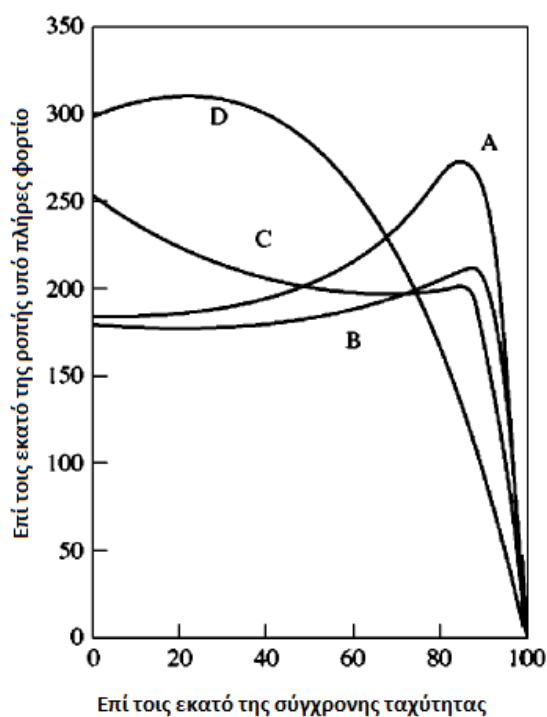
Κατασκευαστική κλάση D:

Οι κινητήρες της κλάσεως D διαθέτουν μεγάλη αντίσταση δρομέα, οπότε η ροπή ανατροπής εμφανίζεται σε κάποιο σημείο με μεγάλη ολίσθηση, ενώ η ροπή εκκίνησης 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 κατασκευασμένες όμως από υλικό μεγαλύτερης αντίστασης. Η μεγάλη αντίσταση του 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 κινητήρα αρχικά επιταχύνει βαθμιαία το σφόνδυλο ως τη μέγιστη ταχύτητά του, όπου ο σφόνδυλος αναλαμβάνει την

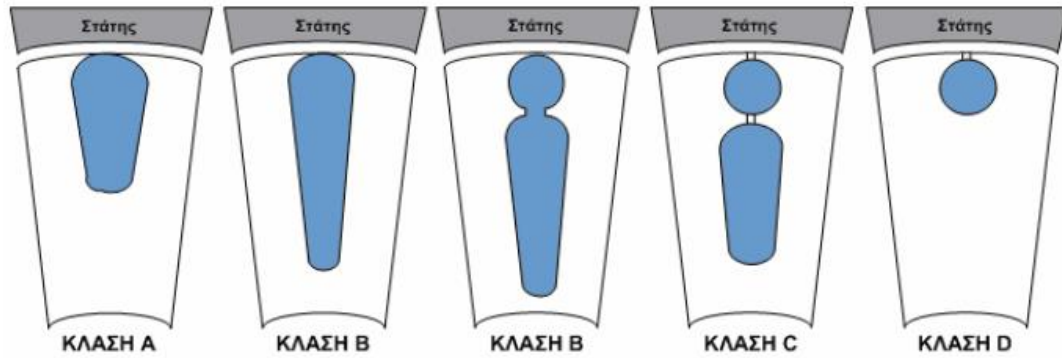
οδήγηση της διατρητικής μηχανής. Μετά τη λειτουργία της διάτρησης ο κινητήρας επιταχύνει ξανά το σφόνδυλο για σχετικά μεγάλο διάστημα μέχρι την επόμενη ενέργειά του.

Μαζί με τις τέσσερις προηγούμενες σχεδιάσεις η NEMA συνήθως αναγνώριζε δυο ακόμη κλάσεις σχεδίασης, τις κλάσεις E και F που τις ονόμαζε επαγωγικούς κινητήρες *ομαλής εκκίνησης (soft – start)*. Η ξεχωριστή ιδιότητα αυτών των κινητήρων ήταν το χαμηλό ρεύμα εκκίνησης και χρησιμοποιούνταν σε φορτία μικρής ροπής εκκίνησης, όπου τα μεγάλα ρεύματα εκκίνησης δημιουργούσαν σοβαρό πρόβλημα. Στις μέρες μας αυτές οι κλάσεις σχεδίασης έχουν καταργηθεί.

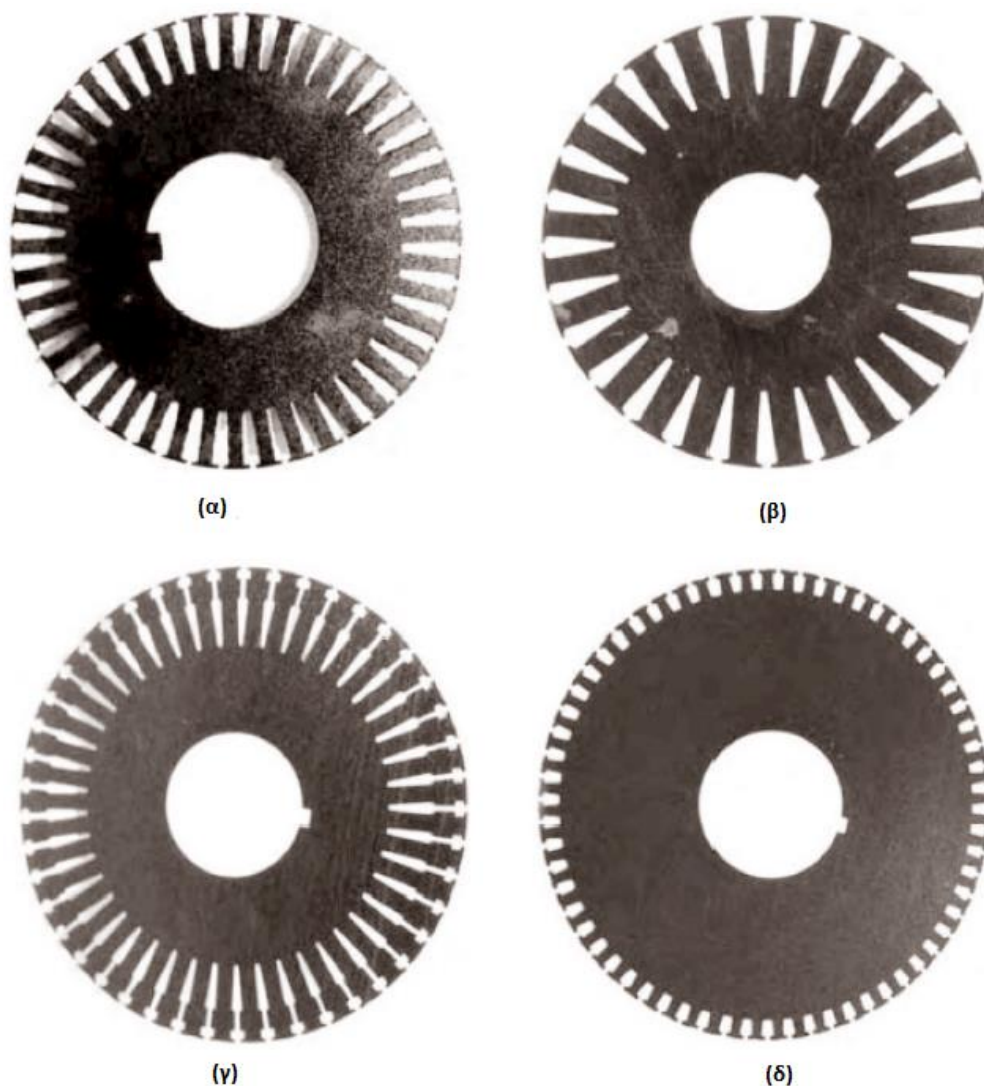
Στο σχήμα 2.17 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας των κλάσεων που αναλύθηκαν πιο πάνω. Στο σχήμα 2.18 και 2.19 φαίνονται οι διαφοροποιήσεις στον κλωβό του δρομέα για την επίτευξη των χαρακτηριστικών κάθε κλάσης. Τέλος, στον πίνακα 2.1 φαίνονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά κάθε κλάσης.



Σχήμα 2.17: Χαρακτηριστικές ροπής – ταχύτητας κινητήρων κλάσης A, B, C και D κατά NEMA [10]



Σχήμα 2.18: Τύποι αυλάκων δρομέα κλωβού ανά κατασκευαστική κλάση [9]



Σχήμα 2.19: Τα δυναμοελάσματα που σχηματίζουν τους δρομείς των τυπικών επαγωγικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου κλωβού, στα οποία φαίνονται οι διατομές των ράβδων του δρομέα. (α) Κλάση σχεδίασης A της NEMA – μεγάλες ράβδοι κοντά στην επιφάνεια. (β) Κλάση σχεδίασης B της NEMA – μεγάλες ράβδοι βαθιά στο δρομέα. (γ) Κλάση σχεδίασης C της NEMA – δρομέας διπλού κλωβού. (δ) Κλάση σχεδίασης D της NEMA – μικρές ράβδοι κοντά στην επιφάνεια. (Προσφορά *Magne Tek, Inc.*) [10]

Κλάση	Ροπή εκκίνησης	Ρεύμα εκκίνησης	Ολίσθηση	Χρήσεις
A	κανονική	Κανονικό	Κανονική	ανεμιστήρας, αντλίες (φορτία μικρής αδρανείας που ξεκινάνε και σταματάνε συχνά)
B	κανονική	Χαμηλό	Κανονική	μεγάλοι ανεμιστήρες και αντλίες (φορτία με σημαντική αδράνεια)
C	Υψηλή	Χαμηλό	Κανονική	συμπιεστές, μάντες μεταφοράς
D	Υψηλή	Χαμηλό	Υψηλή	πρέσες, μηχανικές διατρήσεις (εφαρμογές υψηλής αδράνειας)

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά κινητήρων ανά κατασκευαστική κλάση

3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

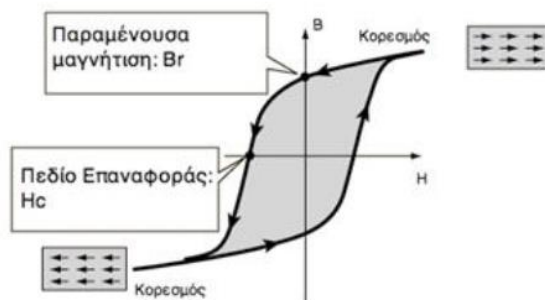
Ο πυρήνας του στάτη ή του δρομέα κατασκευάζεται από σιδηρομαγνητικά υλικά, ώστε να μεταφέρεται η μαγνητική ροή στα κατάλληλα σημεία της μηχανής. Τα σιδηρομαγνητικά υλικά παρουσιάζουν ιδιότητες οι οποίες είναι χρήσιμες αλλά και προβληματικές. Για το λόγο αυτό, οι κατασκευαστές ηλεκτρικών μηχανών πρέπει 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 μαγνητισμού και χαμηλή σχετική διαπερατότητα. Ο βρόχος υστέρησης φαίνεται στο σχήμα 3.1.

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 , όσο και για το πεδίο αναφοράς H_c ώστε να μην είναι εύκολη η απομαγνήτισή τους.



Σχήμα 3.1: Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικών υλικών [10]

Όσο αφορά το συμπαγή σίδηρο, η προσθήκης μικρής ποσότητας πυριτίου βελτιώνει πολλές από τις ιδιότητες του. Η ηλεκτρική του αντίσταση αυξάνεται, η μαγνητική αντίσταση μειώνεται αισθητά και βελτιώνεται η σταθερότητα των μαγνητικών χαρακτηριστικών στον 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 δινορρεύματα. Η χρήση της περιορίζει τα επαγόμενα δινορρεύματα διότι μειώνεται η αγώγιμη διαδρομή του ρεύματος. Για το σκοπό αυτό η μια ή και οι δυο 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, ο ένας είναι με κατευθυνόμενους κόκκους ενώ ο άλλος χωρίς. Τα ελάσματα χωρίς κατευθυνόμενους κόκκους είναι ιστροπικά και χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις ηλεκτρικές μηχανές. Τυπικές τιμές ειδικών απωλειών σε μαγνητική επαγωγή είναι 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 μια 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 είναι πολύ χαμηλή.

3.2 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ

Η προκαταρκτική σχεδίαση λαμβάνει υπόψη τις προδιαγραφές του συστήματος κίνησης και προσδιορίζει τη γεωμετρία του διακένου, χωρίς τη λεπτομερή διαμόρφωση του κινητήρα. Η

προκαταρκτική σχεδίαση μιας ηλεκτρικής μηχανής, αποτελεί θεμελιώδη διαδικασία στη βελτιστοποίηση ηλεκτρικών μηχανών, καθώς αποτελεί ένα ασφαλές σημείο εκκίνησης για τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Η προκαταρκτική σχεδίαση περιλαμβάνει τα εξής βήματα: [11]

- Προσδιορισμό της επιφάνειας του διακένου, ώστε η μηχανή να αναπτύσσει την απαραίτητη ηλεκτρομαγνητική ροπή, σε μόνιμη αλλά και μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, όπως αυτή έχει υπολογιστεί από τις προδιαγραφές.
- Προσδιορισμό της διαμόρφωσης στάτη και δρομέα. Εδώ προσδιορίζεται ο τύπος και η γεωμετρία, τόσο του στάτη όσο και του δρομέα, ώστε να έχουμε τη δημιουργία του επιθυμητού μαγνητικού πεδίου στο διάκενο.
- Έλεγχο ειδικής ηλεκτρικής και μαγνητικής φόρτισης.
- Προσδιορισμό επίδοσης και απόδοσης.

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

3.2.1 Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης

Ειδική μαγνητική φόρτιση [12]

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

$$\bar{B} = \frac{p \cdot \Phi}{\pi \cdot L \cdot D} \quad (3.1)$$

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

Το μέγεθος αυτό λαμβάνει συνήθως τιμές από 0.5 T έως 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, a_c , προσδιορίζεται από την ενεργό τιμή των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο περιφέρειας του διακένου, σύμφωνα με τη σχέση:

$$a_c = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_s \cdot I}{\pi \cdot D} \quad (3.2)$$

Τυπικές τιμές ηλεκτρικής φόρτισης σύγχρονων μηχανών είναι 1500 AE/m έως 4500 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 του χαλκού της μηχανής.

Τα δυο παραπάνω μεγέθη συνδέονται με τη λεγομένη σχέση εξόδου της ηλεκτρικής μηχανής, η οποία είναι μια εκτίμηση της ροπής ή της ισχύος εξόδου. Η ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης E δίνεται από τη σχέση:

$$E_{rms} = 4.44 \cdot f \cdot k_w \cdot N_s \cdot \Phi \quad (3.3)$$

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

Η φαινόμενη ισχύς της μηχανής δίνεται από τη σχέση:

$$S = 3 \cdot E_{rms} \cdot I_{rms} \quad (3.4)$$

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

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (3.5)$$

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

$$S = 1.1 \cdot k_w \cdot \pi^2 \cdot B_{av} \cdot ac \cdot D_g^2 \cdot L \cdot n_s \quad (3.6)$$

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 μήκους του πυρήνα. Έτσι λοιπόν, κατά τη σχεδίαση ενός κινητήρα πρέπει να προσδιοριστεί ο πιο συμφέρων συνδυασμός ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης και μαγνητική φόρτισης, διαστάσεων διακένου και ταχύτητα περιστροφής ώστε να ληφθεί η επιθυμητή ισχύς στην έξοδο χωρίς να θυσιαστούν άλλα χαρακτηριστικά της μηχανής, όπως για παράδειγμα η απόδοση, το κόστος κατασκευή και το συνολικό βάρος.

Το μέγεθος μιας μηχανής και η τιμή της ονομαστικής της ισχύος είναι παράγοντες καθοριστικής σημασίας για την απόδοση. Με εκτίμηση παρέχεται με τον υπολογισμό της μεταβολής της ισχύος της εξόδου και των απωλειών όταν οι διαστάσεις μιας μηχανής μεγεθύνονται 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 . Αμελώντας τις μηχανικές απώλειες, η απόδοση, η , υπολογίζεται ως εξής: [13]

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out}+P_{loss}} \propto \frac{x^{3.5}}{x^{3.5}+Kx^2} \propto \frac{1}{1+\frac{K}{x^{1.5}}} \quad (3.7)$$

Η σχέση 3.7 δείχνει ότι η απόδοση αυξάνει με αύξηση στις γραμμικές διαστάσεις. Αυτό δικαιολογεί εν μέρει γιατί οι κινητήρες με ισχύ μικρότερη του 1 kW έχουν απόδοση της τάξης του 60%, ενώ γεννήτριες μεγάλης ισχύος έχουν απόδοση πάνω από 97%.

Οριακή τάση διακένου

Η 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 επιφάνειας.

Η φυγόκεντρος δύναμη δίνεται από τη σχέση:

$$F = m \cdot \omega_r \cdot R \quad (3.8)$$

όπου m η μάζα του δρομέα, ω_r η μηχανική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του και R η ακτίνα του. Έτσι:

$$\text{οριακή τάση διακένου} = \frac{m \cdot \omega_r}{2 \cdot \pi \cdot L} \quad (3.9)$$

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 τύλιγμα της μηχανής. Στη συνήθη περίπτωση, οι θερμικές απώλειες ισχύος στην ονομαστική κατάσταση λειτουργίας συνίστανται κατά πρώτο λόγο από τις απώλειες χαλκού και δεύτερο λόγο από τις απώλειες σιδήρου. Οι θερμικές απώλειες προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας της μηχανής, η οποία μπορεί να επιφέρει καταστροφή των υλικών που την αποτελούν στην περίπτωση που 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 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 3.1.

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

Πίνακας 3.1: Απαιτήσεις ψύξης ηλεκτρικών μηχανών ανάλογα με την ισχύ τους

3.2.2 Βήματα της προκαταρκτικής σχεδίασης

Προσδιορισμός της επιφάνειας διακένου

Η ροπή διακένου T_e υπολογίζεται βάσει της επαπτομενικής πίεσης των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο και της επιφάνειας διακένου A , μέσω των παρακάτω σχέσεων:

$$F_t = P_t \cdot A = P_t \cdot \pi \cdot L \cdot D_g \quad (3.10)$$

$$T_{max} = \frac{D_g \cdot F_t}{2} \quad (3.11)$$

$$T_{max} = \frac{\pi}{2} \cdot L \cdot D_g^2 \cdot P_t \quad (3.12)$$

Επίσης η μέση μαγνητική δύναμη στο διάκενο, F_t , υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_t = \frac{L}{\mu_0} \oint_C B_n \cdot B_t dl \quad (3.13)$$

Η μέση πίεση της επαπτομενικής δύναμης στο διάκενο ορίζεται από τον τύπο:

$$P_t = \frac{F_t}{A} = \frac{1}{\pi \cdot D_g \cdot \mu_0} \oint_C B_n \cdot B_t dl \quad (3.14)$$

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.

Έτσι, με τον υπολογισμό της μέσης πίεσης της επαπτομενικής δύναμης και γνωρίζοντας τη ροπή της μηχανής μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση 3.12 το γινόμενο $L \cdot D_g^2$.

Αναλογία διαστάσεων L και D_g

Η διαστασιολόγηση του διακένου μιας ηλεκτρικής μηχανής εμπλέκει θέματα επίδοσης, απόδοσης και μηχανικής αντοχής. Μια αύξηση στη διάμετρο του διακένου έχει ως αποτέλεσμα πολύ μεγαλύτερη αύξηση στην ισχύ εξόδου σε σχέση με αντίστοιχη αύξηση του ενεργού μήκους. Πράγματι, από την σχέση 3.12 επιβεβαιώνεται το παραπάνω, δεδομένου ότι η ροπή εξόδου είναι ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου του διακένου. Επομένως, η ίδια σχέση αποδεικνύει ότι για υψηλές απαιτήσεις ροπής συνιστάται η επιλογή μεγάλης διαμέτρου διακένου, καθώς έτσι επιτυγχάνεται υψηλότερη παραγόμενη ροπή λόγω της αύξησης της απόστασης του διακένου από τον άξονα. Παρόλα αυτά, η απόδοση τη μηχανής δεν αυξάνεται κατ' ανάγκη όταν η αναλογία L/D_g είναι μειωμένη. 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 επίμηκες διάκενο έχει μεγάλη μάζα πυρήνα, επομένως δεν επιτυγχάνει τη βέλτιστη απόδοση. Από την άλλη, το μικρό αξονικό μήκος επιφέρει μεγάλες τιμές ροής σκέδασης στο διάκενο.

Αντίθετα, σε εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων, η τυπική προσέγγιση σχεδίασης είναι η επιλογή μεγάλου αξονικού μήκους και όχι αύξηση της διαμέτρου, ώστε να επιτευχθεί αύξηση της ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο, διατηρείται η επιφανειακή ταχύτητα δρομέα σε λογικές τιμές και έτσι αποφεύγονται υψηλές τιμές φυγόκεντρων δυνάμεων και τοπικών απωλειών σιδήρου. Παράλληλα, οι δρομείς μεγάλου ενεργού μήκους μπορούν να εμφανίζουν έντονες ταλαντώσεις λόγω μηχανικών μεταβατικών με την αύξηση της ταχύτητας. Η μηχανική αντοχή του δρομέα και η διαστασιολόγηση του διακένου εξαρτώνται και από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Σε μικρές ταχύτητες περιστροφής προτιμάται μικρός λόγος L/D_g . Σε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής, η οριακή τάση διακένου περιορίζει το 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 αύξηση του λόγου L/D_g , το οποίο επιβάλλεται από την ακαμψία του σώματος του δρομέα και τη διατήρηση του διακένου.

Στην διεθνή βιβλιογραφία, και ιδιαίτερα για την περίπτωση των ασύγχρονων μηχανών συναντάται η ακόλουθη σχέση για τον λόγο L/D_g . [13]

$$\chi = \frac{L}{D_g} = \frac{\pi}{2p} \sqrt[3]{p} \quad (3.15)$$

Επίσης, στη βιβλιογραφία συναντώνται ορισμένες αναλογίες που πρέπει να έχει μια μηχανή ώστε να χαρακτηρίζεται από υψηλή επίδοση, απόδοση ή ισορροπημένο συνδυασμό και των δύο. Συνήθως γίνεται λόγος για το λόγο του αξονικού μήκους της μηχανής L και του μήκους ενός πόλου τ . Το μήκος πόλου δίνεται από την ακόλουθη σχέση: [14]

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_g}{p} \quad (3.16)$$

όπου p είναι οι πόλοι της μηχανής.

Ενώ στον πίνακα 3.2 παρατίθενται οι περιοχές τιμών του λόγου, L/τ , η καθεμιά από τις οποίες παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Λόγος L/τ	Χαρακτηριστικά ηλεκτρικής μηχανής
1.0	Ισορροπημένη σχεδίαση
1.0 -1.5	Υψηλός συντελεστής ισχύος
1.5	Υψηλή απόδοση
1.5 – 2	Ελάχιστο κόστος

Πίνακας 3.2: Περιοχές τιμών του λόγου L/τ

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 τη δυνατότητα μηχανικής στήριξης δρομέα και στάτη. Όσο μικρότερο είναι το πλάτος του διακένου, τόσο μικρότερο ρεύμα διέγερσης απαιτείται για την παραγωγή της απαιτούμενης ροπής. Από την άλλη με αυτόν τον τρόπο αυξάνουν οι απώλειες δινορρευμάτων στην επιφάνεια του δρομέα και του στάτη.

Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιούνται εμπειρικές σχέσεις όπως είναι η ακόλουθη: [13]

$$\delta = \frac{0.18+0.006 \cdot P^{0.4}}{1000} \quad (3.17)$$

όπου P είναι η ισχύς της μηχανής σε W.

3.2.3 Προσδιορισμός κύριων χαρακτηριστικών στάτη

Το πλήθος των αυλάκων του στάτη Q_s δίνεται από τη σχέση:

$$Q_s = m \cdot p \cdot q \quad (3.18)$$

όπου m είναι το πλήθος των φάσεων, p είναι το πλήθος των πόλων και q είναι το πλήθος των αυλάκων ανά πόλο και φάση.

Η μέση ροή ανά πόλο υπολογίζεται ως εξής:

$$\Phi = \bar{B} \frac{\pi \cdot D}{p} L \quad (3.19)$$

Άρα, ο αριθμός ελιγμάτων των πηνίων κάθε φάσης προκύπτει:

$$N = \frac{E}{4.44 \cdot \Phi \cdot f} \quad (3.20)$$

όπου E είναι η RMS τιμή της φασικής τάσης.

Επομένως, το πλήθος των αγωγών ανά αύλακα θεωρώντας ότι τα πηνία συνδέονται εν σειρά είναι:

$$n_s = \frac{N}{q \cdot p / 2} \quad (3.21)$$

Το ρεύμα του στάτη στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας είναι:

$$I_N = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \varphi} \quad (3.22)$$

Συνεπώς, η συνολική μαγνητεργετική δύναμη δίνεται από τη σχέση:

$$ME\Delta = N \cdot I \quad (3.23)$$

Στην συνέχεια, επιλέγεται η πυκνότητα ρεύματος του κινητήρα, J . Στην περίπτωση της ηλεκτροπρόωσης τα όρια τίθενται λίγο πιο ελαστικά ως προς την ανάγκη για ψύξη του κινητήρα εφόσον είναι βυθισμένος στο θαλασσινό νερό, επομένως υπάρχει επαρκής ψύξη. Επομένως, η αναγκαία διατομή που θα δημιουργήσει την παραπάνω $ME\Delta$ υπολογίζεται ως εξής:

$$A_{cu} = \frac{n_s \cdot I}{J} \quad (3.24)$$

Έτσι, θεωρώντας και τον κατάλληλο συντελεστή αξιοποίησης της αύλακας, ff , η συνολική διατομή κάθε αύλακας θα πρέπει να είναι τουλάχιστον:

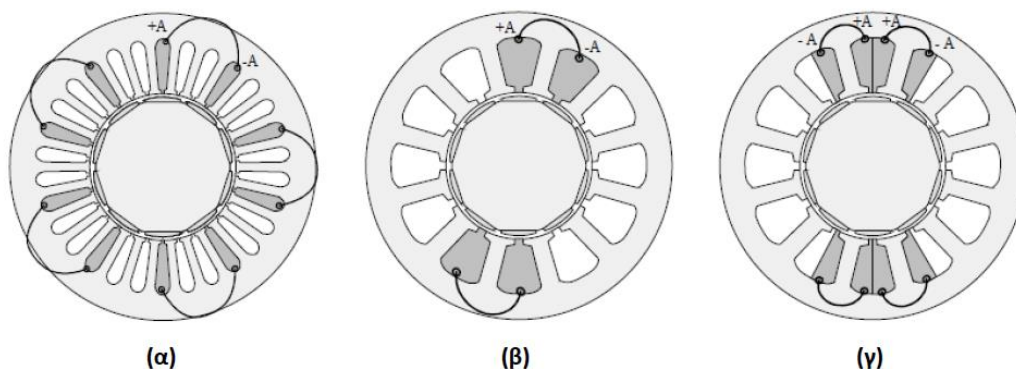
$$A_{slot} = \frac{A_{cu}}{ff} \quad (3.25)$$

Τύλιγμα του στάτη

Τα τυλίγματα μιας ηλεκτρικής μηχανής, για τα οποία έχει ήδη γίνει μια μικρή αναφορά και στο προηγούμενο κεφάλαιο, χαρακτηρίζονται ως προς τις τερματικές συνδέσεις των επιμέρους πηνίων, τον τρόπο με τον οποίο κατανομούνται στα αυλάκια και το βήμα συστάδας. Έτσι, μπορεί να είναι βροχοειδή ή κυματοειδή (τα 1^α χρησιμοποιούνται σε μηχανές με λίγους πόλους, ενώ τα 2^α σε πολυπολικές μηχανές χαμηλών ταχυτήτων), διανεμημένα (με 1 ή περισσότερα αυλάκια ανά πόλο και φάση), πλήρους ή κλασματικού βήματος. Οι συνηθέστερες περιπτώσεις τυλιγμάτων είναι οι εξής:

- Επικαλυπτόμενα, διανεμημένα με 1 ή 2 αυλάκια ανά πόλο και φάση.
- Μη επικαλυπτόμενα, συγκεντρωμένα, μονής ή διπλής στρώσης.

Τα διανεμημένα επικαλυπτόμενα τυλίγματα παράγουν γενικά πιο ημιτονοειδή ΜΕΔ στο διάκενο. Η χρήση κατανεμημένων τυλιγμάτων δίνει μεγαλύτερη τιμή θεμελιώδους της ΗΕΔ του κινητήρα χάρη στον υψηλότερο συντελεστή τυλιγματος. Επίσης, μια νέα διαμόρφωση τυλιγματος, που χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο, είναι τα συγκεντρωμένα τυλίγματα κλασματικού βήματος (*fractional slot concentrated windings*). Ο λόγος διάδοσης έγκειται στην υψηλή πυκνότητα ισχύος, την απόδοση και τα κοντά άκρα τυλιγμάτων. Στην περίπτωση συγκεντρωμένων τυλιγμάτων κλασματικού βήματος, μια σημαντική παράμετρος σχεδίασης είναι ο αριθμός των στρώσεων. Στα τυλίγματα μονής στρώσης τα πηνία τυλίγονται γύρω από εναλλασσόμενα δόντια, ενώ στη διπλή στρώση τυλίγονται γύρω από κάθε δόντι. Τα τυλίγματα μονής στρώσης παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή σε βραχυκύκλωμα χάρη στις μεγαλύτερες αυτεπαγωγές ανά φάση, περιορίζοντας έτσι το ρεύμα σφάλματος. Επίσης, εμφανίζουν μικρότερες αμοιβαίες επαγωγές εμποδίζοντας έτσι την απώλεια “υγειών” φάσεων σε περίπτωση σφάλματος. Χάρη στην μεγαλύτερη αυτεπαγωγή σκέδασης τα τυλίγματα μονής στρώσης προτιμώνται σε εφαρμογές που απαιτείται λειτουργία σταθερής ισχύος σε μεγάλο εύρος στροφών. Στα τυλίγματα διπλής στρώσης οι απώλειες πυρήνα λόγω δινορρευμάτων είναι χαμηλότερες, λόγω του μικρότερου αρμονικού περιεχομένου της ΜΕΔ που προκαλεί η αντίδραση τυμπάνου. Επιπλέον, η ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι περισσότερο ημιτονοειδής. Παρόλα αυτά, στα τυλίγματα διπλής στρώσης η ικανότητα παραγωγής ροπής σε κατάσταση υπερφόρτισης είναι μικρότερη απ’ ότι στα αντίστοιχα μονής στρώσης. [15] Παρακάτω, στο σχήμα 3.2 φαίνονται τα τρία είδη τυλιγμάτων που αναλύθηκαν:



Σχήμα 3.2: Κύριες διαμορφώσεις τυλιγμάτων: (α)διανεμημένα, (β) συγκεντρωμένα μονής στρώσης και (γ) συγκεντρωμένα διπλής στρώσης.

Ιδιαίτερα για την περίπτωση των μηχανών επαγωγής, συνήθως, προτιμάται επιλογή τυλίγματος διπλής στρώσης. Ο λόγος που οδηγεί στην επιλογή αυτή είναι ότι το τύλιγμα διπλής στρώσης με κλασματικό βήμα μειώνει το περιεχόμενο των αρμονικών στη ΜΕΔ. Έτσι προτιμώνται κατανεμημένα τυλίγματα με κλασματικό βήμα.

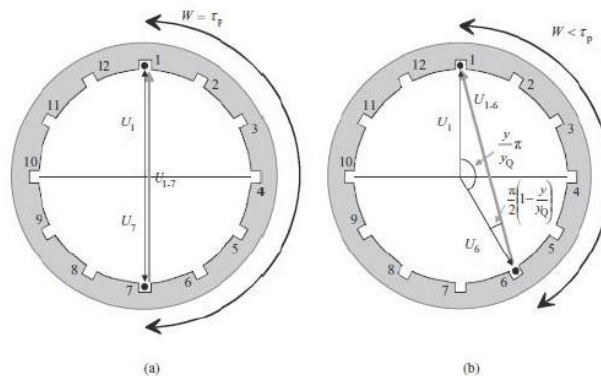
Τυλίγματα πλήρους και κλασματικού βήματος

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:

$$\rho_p = \frac{360}{p} \quad (3.26)$$

Ως βήμα ενός πηνίου ορίζεται η γωνιακή απόσταση μεταξύ των δύο πλευρών του εν λόγω πηνίου. Αν η απόσταση αυτή είναι ίση με την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πόλων, τότε λέμε ότι έχουν 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 των δύο διαδοχικών πόλων της μηχανής. Στο σχήμα 3.3, αναπαρίσταται η ίδια τοπολογία, αρχικά με τύλιγμα πλήρους και στη συνέχεια με τύλιγμα κλασματικού βήματος.



Σχήμα 3.3: Τοπολογία (a) πλήρους και (b) κλασματικού τυλίγματος [16]

Γενικότερα, το βήμα ενός πηνίου κλασματικού βήματος δίνεται σε ηλεκτρικές μοίρες από την παρακάτω σχέση: [13]

$$\rho = \frac{\theta_m}{\rho_p} \cdot 180^\circ \quad (3.27)$$

Το κλασματικό βήμα αποτελεί μια ιδιαίτερα διαδομένη σχεδιαστική επιλογή, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω καθώς επιτυγχάνει την απομείωση των ανώτερων αρμονικών χώρου που εισάγουν τα τυλίγματα. Η απομείωση αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι σε μια μηχανή η χρήση κλασματικού βήματος διπλής στρώσης συνεπάγεται ότι σε κάποιες αύλακες

της θα φιλοξενούνται αγωγοί διαφορετικών φάσεων μέσα στην ίδια αύλακα. Αυτό έχει ως συνέπεια τη δημιουργία ρευμάτων, οι γωνίες των οποίων (αν αυτά περιγραφούν ως διανύσματα χώρου) θα λάβουν τιμές μεταξύ των γωνιών των δύο διαφορετικών φάσεων, που συνυπάρχουν στην ίδια αύλακα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η δημιουργία ρευμάτων (άρα και αντίστοιχων κυμάτων ΜΕΔ) με ενδιάμεσες τιμές, οι οποίες συμβάλλουν στην ημιτονικότητα της κατανομής. [17]

3.2.4 Προσδιορισμός κύριων χαρακτηριστικών δρομέα

Κατά τη σχεδίαση ενός δρομέα κλωβού, ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στην επιλογή του κατάλληλου πλήθους αυλάκων στον δρομέα, Q_r , προκειμένου να περιορίζουν κατά το δυνατόν οι παρασιτικές ροπές, πρόσθετες απώλειες, ακτινικές δυνάμεις, θόρυβος και δονήσεις.

Έχουμε υποθέσει ότι για τη λειτουργία της ασύγχρονης μηχανής ότι η στρεφόμενη ΜΕΔ που παράγεται από το πεδίο του στάτη διανέμεται ημιτονικά στο χώρο καθώς επίσης και η ΜΕΔ του δρομέα λόγω των επαγόμενων ρευμάτων. Παρόλα αυτά η κατανομή της μαγνητικής ροής στο διάκενο περιέχει ένα σύνολο αρμονικών που οφείλονται στον πεπερασμένο αριθμό αυλάκων στάτη που φιλοξενούν τα τυλίγματα και το γεγονός ότι το διάκενο δεν είναι ομαλό, καθώς παρεμβάλλονται και τα ανοίγματα των αυλάκων του δρομέα και του στάτη.

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 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 της εκκίνησης, τη σταθερή λειτουργία σε κάποια υποσύγχρονη ταχύτητα ή τον υπερβολικό θόρυβο κατά την επιτάχυνση του κινητήρα μέχρι την ονομαστική ταχύτητα.

Ιδιαίτερα για την αποφυγή των αρμονικών που οφείλονται στις αύλακες του στάτη και του δρομέα, η επιλογή του πλήθους των αυλάκων για το δρομέα γίνεται τηρώντας τις ακόλουθες προϋποθέσεις: [13]

- i. Ο αριθμός των αυλάκων του δρομέα δεν πρέπει να είναι ίσος με τον αριθμό των αυλάκων του στάτη, $Q_s \neq Q_r$, ικανοποιητικό αποτέλεσμα επιτυγχάνεται όταν είναι 15% με 30% περισσότερες.
- ii. Για να αποφεύγονται οι ανυψώσεις ροπής πρέπει: $Q_s - Q_r \neq \pm p, 2p, 5p$
- iii. Για να αποφεύγεται το “κλείδωμα” του κινητήρα πρέπει: $Q_s - Q_r \neq \pm 3p$
- iv. Για να αποφεύγεται ο θόρυβος και οι ταλαντώσεις πρέπει: $Q_s - Q_r \neq \pm 1, \pm 2 \pm (p \pm 1), \pm (p \pm 2)$

Το ρεύμα κάθε ράβδου του δρομέα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_b = K_I \frac{2 \cdot 3 \cdot N \cdot k_w}{Q_r} I_N \quad (3.28)$$

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

Στην συνέχεια, εφόσον επιλεχθεί η πυκνότητα ρεύματος της ράβδου, J_b , υπολογίζεται η επιφάνεια της αύλακας του δρομέα ως εξής:

$$A_b = \frac{I_b}{J_b} \quad (3.29)$$

Το βήμα της αύλακας του δρομέα είναι:

$$\tau_r = \frac{\pi(D-2\cdot\delta)}{Q_r} \quad (3.30)$$

3.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

Οι απώλειες σε μια μηχανή καθορίζουν την τιμή της απόδοσης της. Συνεπώς είναι πολύ σημαντική η ανάπτυξη αυτοματοποιημένων διαδικασιών για τον ακριβή προσδιορισμό τους. Οι βασικές πηγές απωλειών των ηλεκτρικών μηχανών είναι δύο, οι απώλειες χαλκού και οι απώλειες πυρήνα. Δευτερεύοντα ρόλο κατέχουν οι απώλειες λόγω τριβών στις εδράσεις και οι μηχανικές απώλειες, ενώ ένα μικρό μέρος κατέχουν και οι διαφεύγουσες απώλειες της μηχανής.

3.3.1 Απώλειες χαλκού

Οι απώλειες χαλκού οφείλονται στις ωμικές απώλειες, που εμφανίζονται στα τυλίγματα του στάτη, πρόκειται για τις απώλειες που προκαλούνται από τη διέλευση ρεύματος από τα πηνία της μηχανής. Ο υπολογισμός τους γίνεται μέσω του παρακάτω τύπου, που προκύπτει από τον νόμο *Ohm*: [15]

$$P_{cu} = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad (3.31)$$

Για τον υπολογισμό τους πρέπει να προσδιοριστούν οι τιμές του ονομαστικού ρεύματος, I , και της ωμικής αντίστασης φάσης του τυλίγματος, R . Κατά κανόνα σε μια διαδικασία βελτιστοποίησης γεωμετρίας ηλεκτρικού κινητήρα, λόγω του ότι οι γεωμετρικές παράμετροι του στάτη άρα και το εμβαδόν της αύλακας αλλάζουν, το ονομαστικό ρεύμα, I , δεν είναι σταθερή ποσότητα. Αυτό οφείλεται στην τυπική θεώρηση κατά τη σχεδίαση μηχανών σταθερής πυκνότητας ρεύματος στις αύλακες και όχι ρεύματος για την εξασφάλιση αξιόπιστης θερμικής συμπεριφοράς. Συνεπώς το I , πρέπει να υπολογίζεται εκ νέου για κάθε γεωμετρία. Για δεδομένη λοιπόν πυκνότητα ρεύματος το ονομαστικό ρεύμα υπολογίζεται ως εξής:

$$I = \frac{J \cdot f \cdot A_{slot}}{n_s} \quad (3.32)$$

Εν συνεχεία πρέπει να υπολογιστεί η ωμική αντίσταση ανά φάση. Προκειμένου, να συμβεί αυτό χρειάζεται η γνώση του συνολικού μήκους αγωγού ανά φάση, που εξαρτάται από τον αριθμό των ελιγμάτων ανά φάση, τον αριθμό των αυλάκων και τις γεωμετρικές ιδιότητες και διαστάσεις της τοπολογίας. Επίσης, απαιτείται η γνώση της ειδικής αντίστασης του αγωγού. Η ειδική αντίσταση του χαλκού για θερμοκρασία περιβάλλοντος $\theta = 20^\circ\text{C}$ είναι $r_{cu,20} = 1.75 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. Η διορθωμένη ειδική αντίσταση προκύπτει σε $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ ως εξής:

$$r_{cu} = r_{cu,20} \cdot [1 + a \cdot (\theta - 20^\circ)] \quad (3.33)$$

Θεωρώντας πως η θερμοκρασίας λειτουργίας του κινητήρα σε ονομαστική φόρτιση είναι περίπου 90°C και για συντελεστή θερμοκρασιακής μεταβολής αντίστασης του χαλκού $a = 3.9 \cdot 10^{-3}$, προκύπτει η διορθωμένη τιμή της ειδικής αντίστασης.

Για τον υπολογισμό, του μέσου μήκους μιας σπείρας του τυλίγματος, λαμβάνεται υπόψη το ενεργό μήκος L της μηχανής και ορίζεται η απόσταση $d_{average}$ από το γεωμετρικό μέσο της μιας στρώσης μιας αύλακας, μέχρι το γεωμετρικό μέσο στις ακόλουθης στρώσης της γειτονικής αύλακας. Επίσης, εισάγεται ένας συντελεστής προσαύξησης του μέσου μήκους μιας σπείρας, ο συντελεστής πλέξης olf . Ο συντελεστής αυτός, υπεισέρχεται καθώς τα πηνία στην πραγματικότητα τυλίγονται κατά τέτοιο τρόπο που οδηγεί σε αυξημένο μήκος. Θεωρώντας μια τυπική τιμή συντελεστή πλέξης $olf = 1.2$ προκύπτει το μέσο μήκος μιας σπείρας ως εξής:

$$l_{turn} = olf \cdot (2L + 2d_{average}) \quad (3.34)$$

Η διατομή του κάθε αγωγού είναι:

$$A_{cu} = \frac{ff \cdot A_{slot}}{n_s} \quad (3.35)$$

Η αντίσταση ανά φάση δίνεται από τον τύπο:

$$R_{phase} = \frac{n_s \cdot p \cdot r_{cu} \cdot l_{turn}}{A_{cu}} \quad (3.36)$$

Οι απώλειες χαλκού του δρομέα υπολογίζονται ικανοποιητικά μέσω του λογισμικού ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία FEMM, που υπολογίζει τα ρεύματα στην κατεύθυνση του άξονα z και χρησιμοποιεί τη σχέση $I^2 \cdot R$. [18]

3.3.2 Απώλειες πυρήνα

Ο υπολογισμός των απωλειών πυρήνα αποτελεί πολύ δύσκολο πρόβλημα κατά τη σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών και κατά κανόνα βασίζεται στη χρήση απλουστευτικών αναλυτικών ή αριθμητικών μοντέλων. Για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα αξιοποιούνται τα αποτελέσματα των μαγνητοστατικών αναλύσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η οποία αναλύεται παρακάτω, μέσω μιας αναλυτικής έκφρασης υπολογισμού των απωλειών. Η διαδικασία βασίζεται στον υπολογισμό των τιμών της πυκνότητας της μαγνητικής ροής στο βαρύκεντρο κάθε τριγώνου (δηλαδή κάθε στοιχείου του πλέγματος) σε όλες τις περιοχές της μηχανής που θεωρείται ως υλικό η σιδηρομαγνητική λαμαρίνα. [18]

Αρχικά, καταγράφεται η θέση κάθε στοιχείου του πλέγματος καθώς και η επιφάνεια που αυτό καταλαμβάνει. Με δεδομένο το ενεργό μήκος της μηχανής υπολογίζεται και ο όγκος των ισοδυνάμων πρισμάτων. Ακολούθως καταγράφεται χωριστά για όλα τα στοιχεία του στάτη και του δρομέα η τιμή της μαγνητικής επαγωγής τους. Στην συνέχεια αξιοποιούνται τα πειραματικά δεδομένα της καμπύλης ειδικών απωλειών του σιδηρομαγνητικού υλικού, τα οποία παρέχονται από τον κατασκευαστή σε μορφή διαγράμματος. Συνήθως η λαμαρίνα που χρησιμοποιείται είναι η M235-35A. Από το φυλλάδιο προδιαγραφών της λαμαρίνας εξάγεται ένας αριθμός σημείων ικανοποιητικός για να περιγράψει την καμπύλη ειδικών απωλειών σε ένα μεγάλο εύρος τιμών της μαγνητικής επαγωγής και με τη χρήση αυτών των σημείων η καμπύλη ειδικών απωλειών της λαμαρίνας προσομοιώνεται με πολυώνυμο κάποιου βαθμού μέσω του πακέτου *fitting tool* στο MATLAB. Στην πλειοψηφία των εφαρμογών ένα πολυώνυμο 3^{ου} βαθμού προσομοιώνει με αρκετή ακρίβεια τη μορφή της καμπύλης. Μια στενωπός της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η έλλειψη πειραματικών δεδομένων σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται συνήθως η γραμμική παρεμβολή ώστε να αναχθούν οι καμπύλες στη ζητούμενη συχνότητα.

Στη συνέχεια για κάθε στοιχείο του πλέγματος υπολογίζεται μέσω του πολυωνύμου προσαρμογής της καμπύλης η ειδική απώλεια πυρήνα. Οι απώλειες πυρήνα εξαρτώνται από τη μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής. Συνεπώς, για τον προσδιορισμό των απωλειών, εντοπίζεται το στοιχείο με τη μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής και υπολογίζονται οι απώλειες που του αντιστοιχούν. Γνωρίζοντας την επιφάνεια κάθε στοιχείου και πολλαπλασιάζοντας με το ενεργό μήκος της μηχανής και την πυκνότητα του υλικού της σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας αλλά και τις ειδικές απώλειες που υπολογίστηκαν για το στάτη και το δρομέα, προκύπτουν οι συνολικές απώλειες πυρήνα.

3.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία έχει αποδειχθεί ότι είναι ιδιαίτερα ευέλικτη, αξιόπιστη και αποτελεσματική στην προσομοίωση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων.

Κατά την προκαταρκτική σχεδίαση μιας μηχανής προκύπτει η βασική κατασκευαστική διαμόρφωση, η οποία αποτελεί προσχέδιο για τη φάση της οριστικής σχεδίασης. Προκειμένου να επιτευχθεί λεπτομερής βελτιστοποίηση γεωμετρία, η οριστική σχεδίαση πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση των εξισώσεων του μαγνητικού πεδίου. Η ανάλυση αυτή επιτρέπει εξαιρετικά λεπτομερή αναπαράσταση του μαγνητικού πεδίου θεωρώντας την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας και τη μη γραμμική συμπεριφορά των μαγνητικών υλικών. Αποτέλεσμα της

μεθοδολογίας αυτής είναι η κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο μαγνητικό κύκλωμα της μηχανής και μέσω αυτής, με κατάλληλη μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων μπορούν να υπολογισθούν με ακρίβεια όλα τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μηχανής, όπως είναι η ροπή, οι απώλειες και να εντοπιστούν οι περιοχές του πυρήνα που βρίσκονται σε κορεσμό.

Η επίλυση προβλημάτων σε πολύπλοκες γεωμετρίες που περιλαμβάνουν μη γραμμικά υλικά οδήγησε στην ανάπτυξη αριθμητικών μεθόδων επίλυσης. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων επιτυγχάνει τη μετατροπή των διαφορικών εξισώσεων με μερικές παραγώγους σε αλγεβρικές διακριτοποιώντας το συνεχές πρόβλημα σε ένα μεγάλο αριθμό περιοχών απλής γεωμετρίας. Κατά τη διαδικασία αυτή αντικαθίσταται η αρχική εξίσωση του πεδίου με το πρόβλημα στασιμότητας μιας συναρτησιακής που έχει διαστάσεις ενέργειας. Αν η αρχική γεωμετρία χωρισθεί σε αρκετά μεγάλο αριθμό τέτοιων υποπεριοχών, το υπολογιζόμενο μέγεθος μπορεί να προσεγγισθεί με την επιθυμητή ακρίβεια.

Η διακριτοποίηση του χώρου πραγματοποιείται συνήθως με τρίγωνα στην περίπτωση δισδιάστατης γεωμετρίας ή με τετράεδρα στην περίπτωση τρισδιάστατης γεωμετρίας, αντίστοιχα. Με τον τρόπο αυτόν, ένα συνεχές φυσικό πρόβλημα μετατρέπεται σε διακριτό, στο οποίο οι άγνωστοι απαρτίζονται από τις τιμές του πεδίου στις κορυφές των διαδοχικών τριγώνων ή τετραέδρων. Το πρόβλημα που προκύπτει με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι ένα αλγεβρικό σύστημα εξισώσεων, όπου οι τιμές του πεδίου στο εσωτερικό των στοιχείων (τρίγωνα ή τετράεδρα) μπορούν να υπολογισθούν χρησιμοποιώντας τις τιμές των αντίστοιχων κορυφών τους.

3.4.1 Μαγνητοστατικά προβλήματα

Μαγνητοστατικά ονομάζονται τα προβλήματα στα οποία το μαγνητικό πεδίο είναι αμετάβλητο ως προς το χρόνο. Σε αυτή την περίπτωση, η ένταση του μαγνητικού πεδίου H , και η μαγνητική επαγωγή, B , ικανοποιούν τις παρακάτω εξισώσεις του *Maxwell*:

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (3.37)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (3.38)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho \quad (3.39)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (3.40)$$

Σύμφωνα με το νόμο του *Ampere* και θεωρώντας χαμηλές συχνότητες λειτουργίας προκύπτει:

$$\frac{\partial D}{\partial t} \approx 0 \quad (3.41)$$

και συνεπώς:

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} \quad (3.42)$$

Σύμφωνα με τη θεμελιώδη καταστατική σχέση μεταξύ των μεγεθών B και H για κάθε υλικό προκύπτει:

$$\bar{B} = \mu \cdot \bar{H} \quad (3.43)$$

Ενώ στην περίπτωση μη γραμμικού υλικού, όπως για παράδειγμα κορεσμένος σίδηρος ή μαγνήτης αλνίκο, τότε η επιτρεπτότητα, μ , είναι στην πραγματικότητα μια συνάρτηση του B :

$$\mu = \frac{\bar{B}}{\bar{H}(B)} \quad (3.44)$$

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

$$\bar{B} = \nabla \times \bar{A} \quad (3.45)$$

Αυτός ο ορισμός του, B , ικανοποιεί πάντα την εξίσωση 3.40. Η σχέση 3.45 διατυπώνεται ως εξής:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times \bar{A} \right) = -\bar{J} \quad (3.46)$$

Στη γενική περίπτωση, το διανυσματικό δυναμικό είναι ένα διάνυσμα τριών συνιστωσών. Στη θεώρηση καρτεσιανής γεωμετρίας δύο διαστάσεων, όμως οι δυο από αυτές τις τρεις συνιστώσες μπορούν να μηδενισθούν, και μεταβάλλεται μόνο η A_z . Το πλεονέκτημα της χρήσης του διανυσματικού δυναμικού είναι ότι όλες οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται στο μαγνητοστατικό πεδίο συνδυάζονται σε μια εξίσωση μιας μεταβλητής. Εάν είναι γνωστό το A , τότε τα B και H προκύπτουν από κατάλληλη επεξεργασία τους. Συνεπώς έχουμε:

$$\bar{A} = A_z \cdot \bar{t}_z \quad (3.47)$$

Και για την πυκνότητα ρεύματος, J :

$$\bar{J} = J_z \cdot \bar{t}_z \quad (3.48)$$

Για την πυκνότητα της μαγνητικής ροής η ανάλυση περιορίζεται στις δυο διαστάσεις και εν προκειμένω:

$$\bar{B} = B_x \cdot \bar{i}_x + B_y \cdot \bar{i}_y \quad (3.49)$$

3.4.2 Οριακές συνθήκες

Η επίλυση ενός μαγνητοστατικού ή ηλεκτροστατικού προβλήματος ανάγεται σε επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων. Είναι γνωστό από τη θεωρία των μερικών διαφορικών εξισώσεων, πως προκειμένου να έχουμε μοναδική λύση, πρέπει να ορισθούν οι οριακές συνθήκες του προβλήματος ώστε να έχουμε ένα καλώς τοποθετημένο πρόβλημα. Οι οριακές συνθήκες κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- Dirichlet: Σε αυτό τον τύπο οριακής συνθήκης, η τιμή του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού A , δηλώνεται πάνω στο όριο. Αν $A = 0$, τότε πρόκειται για την ομογενή συνθήκη Dirichlet, διαφορετικά πρόκειται για τη μη ομογενή. Η συνθήκη $A = 0$ απαντάται συχνά σε προβλήματα ηλεκτρικών μηχανών. Η φυσική σημασία της δήλωσης $A = 0$ κατά μήκος ενός ορίου της γεωμετρίας σε ένα μαγνητικό πρόβλημα είναι πως η μαγνητική ροή περιορίζεται εντός των ορίων της μηχανής, ενώ οι γραμμές της μαγνητικής ροής θα είναι παράλληλες προς το σύνορο αυτό. Σε περιπτώσεις όπου μοντελοποιείται ολόκληρη η μηχανή, η χρήση μόνο αυτής της οριακής συνθήκης είναι επαρκής.
- Neumann: Η οριακή συνθήκη αυτή ορίζει την κάθετη παράγωγο του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού κατά μήκος του ορίου. Η συνηθέστερη περίπτωση είναι η χρήση της ομογενούς συνθήκης Neumann δηλαδή $\partial A / \partial n = 0$. Συνήθως χρησιμοποιείται στα μαγνητικά προβλήματα σε περιπτώσεις διεπιφάνειας με υλικό πολύ μεγάλης διαπερατότητας. Η χρήση αυτής της συνθήκης επιβάλλει στις μαγνητικές γραμμές να τέμνουν το σύνορο κάθετα.
- Robin: Η οριακή συνθήκη Robin είναι ένα είδος συνδυασμού των συνθηκών Dirichlet και Neumann, καθώς καθορίζει μια σχέση μεταξύ των σταθμισμένων τιμών του A και της παραγώγου του. Αυτή η οριακή συνθήκη χρησιμοποιείται συχνά σε προβλήματα διάδοσης θερμότητας ως οριακή συνθήκη μονωτικών επιφανειών.
- Περιοδική: Μια περιοδική οριακή συνθήκη συνδέει δύο όρια. Σε αυτόν τον τύπο οριακής συνθήκης, οι οριακές τιμές στα αντίστοιχα σημεία των δύο ορίων είναι ίσες.
- Αντιπεριοδική: Μια αντιπεριοδική συνθήκη συνδέει επίσης δύο όρια μεταξύ τους, αλλά σε αυτή την περίπτωση τα αντίστοιχα σύνορα έχουν ίσα μέτρα αλλά αντίθετο πρόσημο.

Τόσο οι περιοδικές όσο και οι αντιπεριοδικές οριακές συνθήκες χρησιμοποιούνται όταν μοντελοποιείται ένα τμήμα μόνο της μηχανής.

3.4.3 Το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων FEMM

Το ελεύθερο λογισμικό Femm [19] ανήκει στην κατηγορία προγραμμάτων επίλυσης πεπερασμένων στοιχείων και επιλύει δισδιάστατα και μαγνητοστατικά προβλήματα, όπως επίσης προβλήματα όπου τα μαγνητικά μεγέθη μεταβάλλονται σε μια συγκεκριμένη συχνότητα. Ειδικότερα, η διαδικασία επίλυσης ενός μαγνητικού προβλήματος μέσω του συγκεκριμένου προγράμματος, συνοπτικά, έχει τα παρακάτω στάδια:

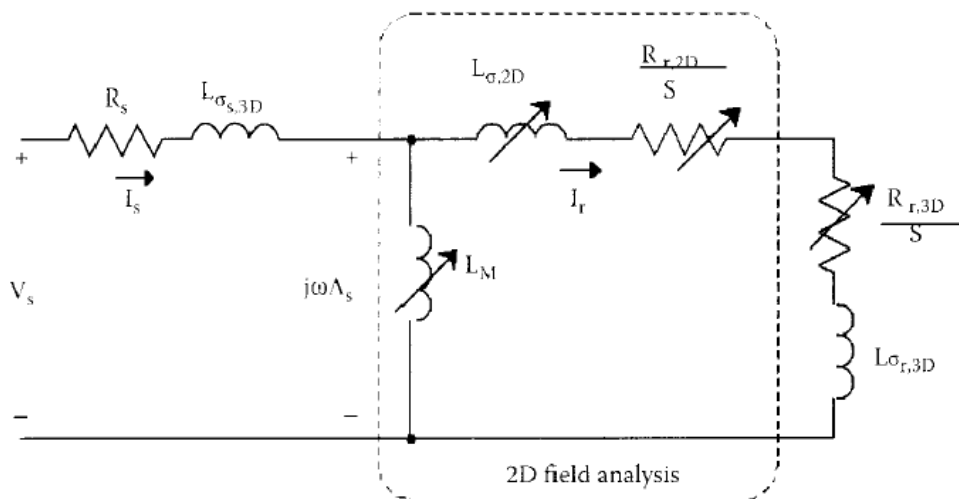
- 1) Σχεδίαση της γεωμετρίας, ορισμός των οριακών και περιοδικών συνθηκών και των υλικών.

- 2) Πλεγματοποίηση του προβλήματος με επιθυμητό αριθμό τριγωνικών στοιχείων, θεώρηση θεμάτων πεπερασμένης ακρίβειας ή άλλων υπολογιστικών περιορισμών.
- 3) Επίλυση του προβλήματος γραμμικής άλγεβρας και εύρεση διανυσματικού δυναμικού.
- 4) Απεικόνιση και επεξεργασία αποτελεσμάτων.

3.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Έπειτα από την σχεδίαση και την μελέτη του επαγωγικού κινητήρα, σκόπιμο είναι να κατασκευασθεί το ισοδύναμο κύκλωμα μεταβλητών παραμέτρων. Αυτό έχει ως στόχο, την εύκολη εισαγωγή της σχεδιασμένης μηχανής σε δυναμικό μοντέλο ελέγχου. Γενικά, η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων σε δύο διαστάσεις, αφήνει εκτός ανάλυσης πολλά φαινόμενα που οφείλονται στην τρισδιάστατη φύση της γεωμετρίας. Για το λόγο αυτό πρέπει να ληφθούν υπόψη στην εξαγωγή των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος της μηχανής. [19]

Θεωρείται το ισοδύναμο κύκλωμα μεταβλητών παραμέτρων του σχήματος 3.4.



Σχήμα 3.4: Ισοδύναμο κύκλωμα μεταβλητών παραμέτρων τριφασικού κινητήρα επαγωγής. Επισημαίνονται οι παράμετροι που προσδιορίζονται από τη 2-διάστατη ανάλυση.

Οι παράμετροι που βρίσκονται εντός του πλαισίου αντιστοιχούν στην 2-διάστατη ανάλυση και δεν είναι σταθερές. Η αντίδραση L_M είναι συνάρτηση της πεπλεγμένης ροής του στάτη Λ_s , δεδομένου του κορεσμού, αν και αποδίδεται μόνος στον κορεσμό. Η συνολική αντίδραση σκέδασης $L_{\sigma,2D}$ και η αντίσταση του δρομέα $R_{r,2D}$ είναι συναρτήσεις της συχνότητας του δρομέα f_r , η οποία είναι ανάλογη της ολίσθησης s του δρομέα αν ληφθεί υπόψη η επίδραση της κατανομής των ρευμάτων στις μπάρες του δρομέα.

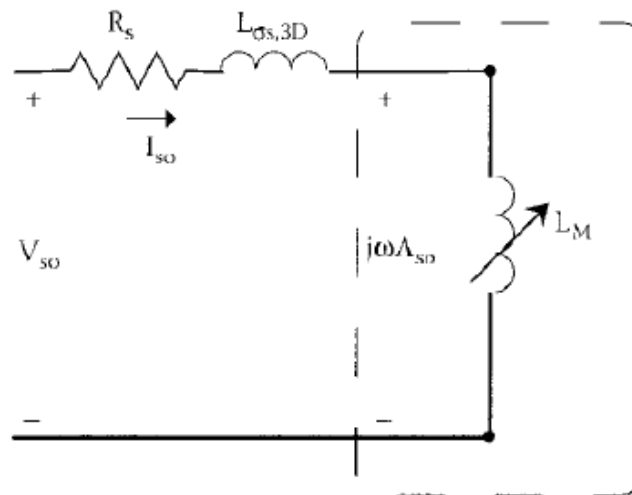
Αντίθετα, οι παράμετροι που αντιστοιχούν στα 3-διάστατα φαινόμενα θεωρούνται σταθερές. Η αντίσταση τυλίγματος του στάτη R_s και η αντίδραση σκέδασης $L_{\sigma_s,3D}$ θεωρούνται ανεξάρτητες από την ανομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος. Παρόμοια και οι αντίστοιχες παράμετροι του δρομέα $R_{r,3D}$ και $L_{\sigma_r,3D}$ θεωρούνται σταθερές. Λαμβάνουν υπόψη τους δακτύλιους βραχυκύκλωσης (*end-rings*) του δρομέα και την κλίση των αυλάκων (*skewing*).

Υπολογίζονται αναλυτικά και χρησιμοποιούνται στο ισοδύναμο κύκλωμα. Οι απώλειες σιδήρου δεν περιλαμβάνονται στο ισοδύναμο κύκλωμα.

Για τον προσδιορισμό του ισοδυναμού κυκλώματος είναι απαραίτητη μια σειρά από προσομοιώσεις. Πρακτικά πραγματοποιούνται η δοκιμή κενού φορτίου για τον προσδιορισμό της αντίδρασης μαγνήτισης L_M και η δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα για τις υπόλοιπες 2-διάστατες παραμέτρους.

3.5.1 Δοκιμή κενού φορτίου

Σκοπός της δοκιμής κενού φορτίου είναι ο προσδιορισμός της μη γραμμικής αντίδρασης μαγνήτισης L_M . Θεωρώντας τις 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 δεν επάγονται ρεύματα 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 3.5.



Σχήμα 3.5: Ισοδύναμο κύκλωμα κατά τη δοκιμή κενού φορτίου

Το FEMM δίνει τη δυνατότητα απευθείας υπολογισμού πεπλεγμένης ροής ανά φάση μέσω των κυκλωματικών υπολογισμών που κάνει. Η ροή μετριέται στο κύκλωμα της φάσης A, στο οποίο τη χρονική στιγμή της προσομοίωσης το ρεύμα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του.

$$\Lambda_{s0} = \Lambda_{\alpha} \quad (3.50)$$

Οπότε μεταβάλλοντας το ρεύμα από το μηδέν έως το 130% του ονομαστικού και καταγράφοντας κάθε φορά την πεπλεγμένη ροή προκύπτει:

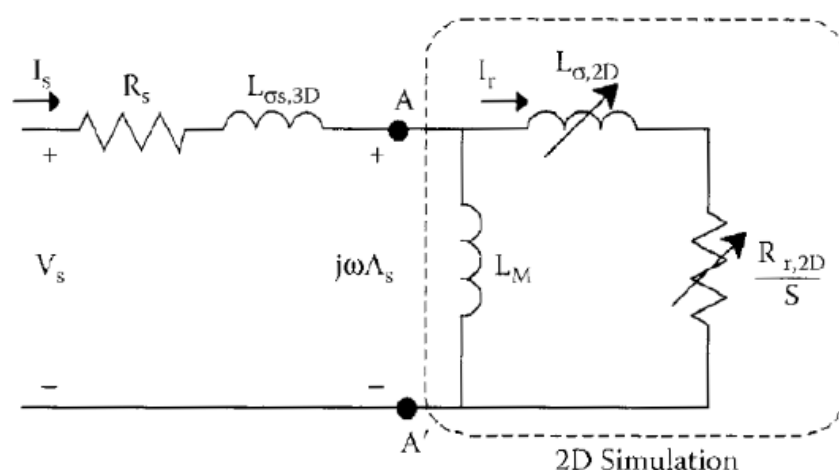
$$L_M(A_{s0}) = \frac{A_{s0}}{I_{s0}} \quad (3.51)$$

3.5.2 Δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής αυτής ο δρομέας είναι ακινητοποιημένος σε μια θέση και τριφασικά ημιτονοειδή ρεύματα εξαναγκάζονται στα τυλίγματα του στάτη. Η εξάρτηση των παραμέτρων $R_{r,2D}$ και $L_{\sigma,2D}$ του σχήματος 3.6 από τη συχνότητα του δρομέα f_r , μπορεί να εξακριβωθεί αλλάζοντας τη συχνότητα του προβλήματος, λόγω του ακινητοποιημένου δρομέα.

Στη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα, το ονομαστικό ρεύμα αντιστοιχεί σε σχετικά χαμηλές συχνότητες, επομένως και χαμηλές μαγνητικές ροές. Συνεπώς, τα μαγνητικά υλικά του προβλήματος μπορούν να θεωρηθούν γραμμικά. Τα πεδιακό πρόβλημα είναι πλέον γραμμικό και χαρακτηρίζεται από πεδιακές ποσότητες που μεταβάλλονται ημιτονοειδώς στην ορισμένη συχνότητα.

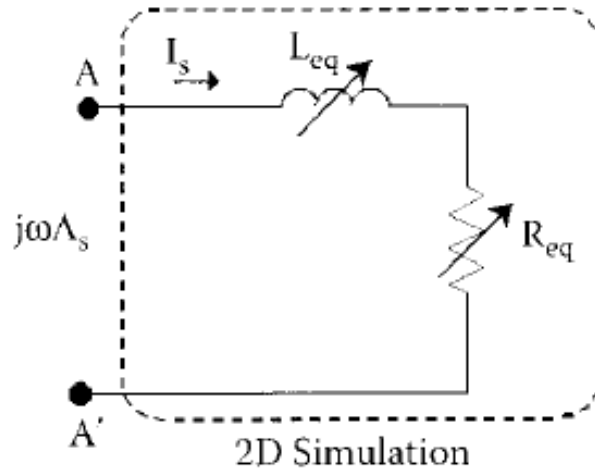
Το ισοδύναμο κύκλωμα για τη δοκιμή απεικονίζεται στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Ισοδύναμο κύκλωμα κατά τη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα

Όπως φαίνεται, τα 3-διάστατα φαινόμενα δε λαμβάνονται υπόψη στην πεδιακή ανάλυση. Θα υπολογιστούν αναλυτικά και θα προστεθούν στο ισοδύναμο κύκλωμα αργότερα. Δηλαδή, οι παράμετροι που υπολογίζονται από τη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα είναι $R_{r,2D}$ και $L_{\sigma,2D}$. Θεωρώντας το πρόβλημα γραμμικό, η αντίδραση μαγνήτισης L_M υποτίθεται πως έχει σταθερή τιμή, αυτή που υπολογίζεται 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 $R_{r,2D}$ και $L_{\sigma,2D}$ από τη συχνότητα, που οφείλεται στη μη ομοιογενή κατανομή ρευμάτων στις ράβδους το δρομέα σε διάφορες ταχύτητες.

Με την υπόθεση σπρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, ημιτονοειδώς κατανεμημένου, οι απώλειες *Joule* του δρομέα P_{jr} , και η τιμή της μαγνητικής ενέργειας του μαγνητικού υλικού W_m , είναι χρονικά σταθερά. Οι $R_{r,2D}$, $L_{\sigma,2D}$ και L_M του κυκλώματος του σχήματος 3.6 αντιστοιχούν στην ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση $R_{eq} + j\omega_r L_{eq}$ του σχήματος 3.7.



Σχήμα 3.7: Παράμετροι που αντιστοιχούν στη δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα

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

$$R_{eq} = \frac{P_{jr}}{3 \cdot I_s^2} \quad (3.52)$$

$$L_{eq} = \frac{2 \cdot W_m}{3 \cdot I_s^2} \quad (3.53)$$

όπου I_s η RMS τιμή του ρεύματος που χρησιμοποιείται στη δοκιμή. Αφού η αντίδραση μαγνήτισης είναι γνωστή και ίση με την ακόρεστη τιμή από τη δοκιμή κενού φορτίου, μπορούν να υπολογιστούν οι συναρτήσεις $R_{r,2D}(f_r)$ και $L_{r,2D}(f_r)$ του κυκλώματος του σχήματος 3.6.

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

3.5.3 Υπολογισμός παραμέτρων 3D φαινομένων

Για την ολοκλήρωση του ισοδύναμου κυκλώματος, οι παράμετροι που αντιστοιχούν στις συνδέσεις των τυλιγμάτων του στάτη $L_{\sigma_s,ew}$ 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 αποκλειστικά στις συνδέσεις τυλιγμάτων του στάτη ($L_{\sigma_s,ew}$) και την κλίση των αυλακιών του δρομέα ($L_{\sigma_s,sk}$).

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

$$L_{\sigma_s,ew} = \mu_0 \frac{N^2}{2 \cdot p} L_{ew} \lambda_{ew} \quad (3.54)$$

όπου λ_{ew} είναι ο ειδικός συντελεστής επιδεκτικότητας (οι τιμές του κυμαίνονται από 0.35 έως 0.55 ανάλογα με τον τύπο του τυλιγματος), $N=2N_s$ είναι το πλήθος των αγωγών ανά φάση και το ενεργό μήκος των συνδέσεων του L_{ew} υπολογίζεται όπως και στις απώλειες χαλκού.

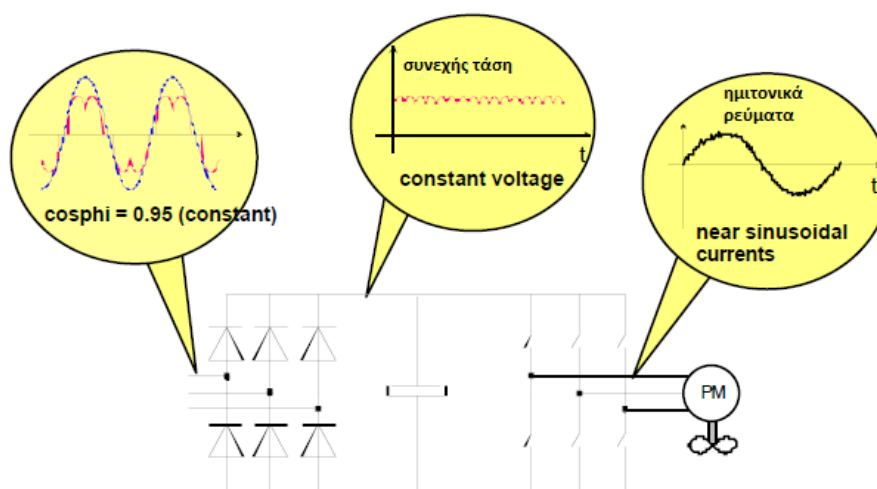
Τέλος, υπολογίζεται η αντίσταση των δακτυλίων βραχυκύκλωσης του δρομέα μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$R_{r,3D} = \rho \frac{3 \cdot (k_w \cdot N)^2}{2 \cdot \pi \cdot p^2 \cdot S_{ring}} \quad (3.55)$$

όπου S_{ring} το εμβαδό του δακτυλίου κάθε αύλακας και ρ η ειδική αντίσταση χαλκού για του 90°C που έχει αναφερθεί και παραπάνω.

4 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ 10MW ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗΣ LNG CARRIER, ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

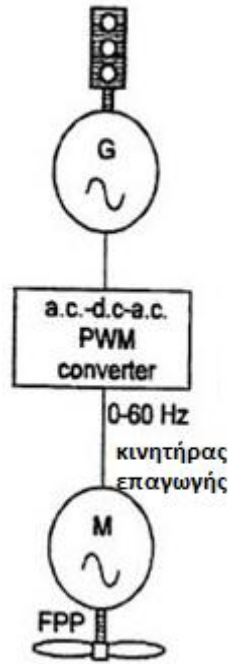
Η παρούσα εφαρμογή όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1 απαιτεί έναν προηγμένο επαγωγικό κινητήρα υψηλής ισχύος σε συνδυασμό με ένα σύστημα μεταβλητών στροφών με διαμόρφωση εύρους παλμών. Ένας αντιστροφέας πηγής τάσης (VSI) είναι μακράν ο πλέον χρησιμοποιούμενος μετατροπέας συχνότητας σε βιομηχανικές εφαρμογές. [21] Ειδικά, η ευέλικτη, ακριβής και υψηλή απόδοση που προσφέρει τον καθιστούν ιδανικό για χρήση με κινητήρες επαγωγής. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η τοπολογία ενός μετατροπέα κατάλληλου για την συγκεκριμένη εφαρμογή, όπου ο 6-παλμικός ανορθωτής συνδέεται απευθείας στο δίκτυο. Μια τέτοια τοπολογία είναι ικανή να στρέφει τον κινητήρα και προς τις δύο κατευθύνσεις. Εξαιτίας του ανορθωτή διόδων, η ισχύς μπορεί μόνο να παρέχεται από το δίκτυο, όχι και να επιστρέφει σε αυτό. Για το λόγο αυτό, όλοι οι μετατροπέες έχουν ειδική προστασία σε περίπτωση υπέρτασης. [4]



Σχήμα 4.1: Μετατροπέας PWM 2 επιπέδων [4]

4.1 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

Η σχεδίαση του αρχικού ηλεκτρικού κινητήρα γίνεται έτσι ώστε να ικανοποιούνται κάποιες αρχικές προδιαγραφές. Μια τυπική διάταξη ενός κινητήρα επαγωγής τροφοδοτούμενο από μετατροπέα για την συγκεκριμένη εφαρμογή φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 4.2 : Τυπική διάταξη ασύγχρονου κινητήρα τροφοδοτούμενο από μετατροπέα [8]

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή οι προδιαγραφές έχουν να κάνουν με την ονομαστική ισχύ, καθώς την τάση τροφοδοσίας και την συχνότητα του μετατροπέα οι οποίες δίνονται και στο μηχανολογικό σχέδιο του άξονα που παρατίθεται στο Παράρτημα της παρούσας εργασίας. Οι προδιαγραφές που πρέπει να ικανοποιούνται κατά τη σχεδίαση του κινητήρα φαίνονται συγκεντρωτικά και στον ακόλουθο πίνακα:

<u>Απαιτήσεις σχεδίασης</u>	
Ονομαστική ισχύς	P=10 MW
Τάση τροφοδοσίας	V=6.6 kV – σύνδεση αστέρα
Συχνότητα	f=60 Hz
Πόλοι μηχανής	P=14

Πίνακας 4.1: Προδιαγραφές σχεδίασης

Εφόσον είναι γνωστή η συχνότητα τροφοδοσίας καθώς και οι πόλοι της μηχανής σκόπιμο είναι να υπολογιστεί η ονομαστική ταχύτητα του κινητήρα προκειμένου στην συνέχεια να μπορεί να υπολογιστεί και η ονομαστική ροπή, σύμφωνα με τους τύπους που έχουν αναπτυχθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η ονομαστική ταχύτητα υπολογίζεται ως εξής:

$$n = \frac{120 \cdot f}{p} = 514.3 \text{ ΣΑΛ} \quad (4.1)$$

Οπότε θεωρούμε περίπου, $n_m = 500 \text{ ΣΑΛ}$. Μετά τον υπολογισμό της ονομαστικής ταχύτητας είναι εφικτό να υπολογιστεί και η ονομαστική γωνιακή ταχύτητα ως εξής:

$$\omega_m = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = 52.3 \text{ rad/s} \quad (4.2)$$

Επομένως, η ονομαστική ροπή υπολογίζεται ως εξής:

$$T = \frac{P}{\omega} = 190985.93 \text{ Nm} = 191 \text{ kNm} \quad (4.3)$$

Επίσης, πρέπει να υπολογιστεί το ονομαστικό ρεύμα του κινητήρα. Προκείμενου να πραγματοποιηθεί αυτό χρειάζεται η γνώση του συντελεστή ισχύος του κινητήρα. Εφόσον πρόκειται για ασύγχρονη μηχανή θεωρούμε ότι παρουσιάζει συντελεστή ισχύος: $\cos \varphi = 0.88$. Έτσι το ονομαστικό ρεύμα υπολογίζεται ως εξής:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \varphi} = 994 \text{ A} \quad (4.4)$$

Συνολικά, οι προδιαγραφές του κινητήρα φαίνονται στον κάτωθι πίνακα:

<i>Απαιτήσεις σχεδίασης</i>	
Ονομαστική ισχύς	P=10 MW
Τάση τροφοδοσίας	V=6.6 kV – σύνδεση αστέρα
Συχνότητα	f=60 Hz
Πόλοι μηχανής	p=14
Ονομαστικό ρεύμα	I=994 A
Ονομαστική ταχύτητα	n=510 rpm
Ονομαστικός συντελεστής ισχύος	cosφ=0.88

Πίνακας 4.2: Συνολικές προδιαγραφές σχεδίασης

4.2 ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ

4.2.1 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 4.3 ορίζονται οι τιμές για μηχανές επαγωγής. [13]

Περιοχές του μαγνητικού κυκλώματος	Μαγνητική ροή B(T)
Διάκενο	0.7 – 0.9(μέγιστη τιμή)
Τμήμα επιστροφής της ροής του 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 4.3: Επιτρεπόμενες τιμές μαγνητικής ροής στο μαγνητικό κύκλωμα ασύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών

Επιλέγεται στο διάκενο $B = 0.7 T$, και γωνία $\theta = 85^\circ$ μεταξύ εφαπτομενικής και κάθετης συνιστώσας. Επομένως, υπολογίζεται η μέση πίεση ως εξής:

$$P_t = \frac{F_t}{A} = \frac{1}{\pi \cdot D_g \cdot \mu_0} \oint_C B_n \cdot B_t dl = 33855 N/m^2 \quad (4.5)$$

Έτσι, μέσω της σχέσης 3.12 και έχοντας ορίσει την ονομαστική ροπή του κινητήρα προκύπτει:

$$T_e = \frac{\pi}{2} \cdot L \cdot D_g^2 \cdot P_t \Rightarrow D_g^2 \cdot L = \frac{2 \cdot T_e}{P_t \cdot \pi} = 3.5916 \quad (4.6)$$

Εφόσον, το ενεργό μήκος της μηχανής και η διάμετρος του μέσου διακένου συνδέονται με τις σχέσεις 3.15 και 3.16 και επιλέγοντας έναν λόγο L/τ περίπου ίσο με 1.2 προκύπτουν:

$$D_g = 2.3 m \quad (4.7)$$

$$L = 0.7 m \quad (4.8)$$

Στη συνέχεια, το πλάτος του διακένου ορίζεται από την σχέση 3.17 ως εξής:

$$\delta = \frac{0.18+0.006 \cdot P^{0.4}}{1000} = 0.004 \text{ m} \quad (4.9)$$

Όμως, η τιμή αυτή είναι αρκετά μικρή για τις προδιαγραφές του κινητήρα. Ιδιαίτερα για την περίπτωση των ηλεκτρικών κινητήρων που προορίζονται για ηλεκτροπρόωση, επειδή απαιτείται υψηλή αντοχή στους κραδασμούς, για απαιτήσεις υψηλής ισχύος ένας συμβιβασμός μεταξύ των αναγκών για επιδόσεις, σωστή διαστασιολόγηση και ανοχή στους κραδασμούς οδηγεί στον παρακάτω περιορισμό: [15]

$$4 \text{ mm} \leq \delta \leq 6 \text{ mm} \quad (4.10)$$

Επομένως, επιλέγεται το μέγιστο δυνατό πλάτος διακένου το οποίο είναι:

$$\delta = 6 \text{ mm} \quad (4.11)$$

4.2.2 Προσδιορισμός χαρακτηριστικών στάτη

Το πλήθος των αυλάκων του στάτη μέσω της σχέσης 3.18, εφόσον το πλήθος των φάσεων είναι, $m = 3$, και επιλέγεται αρχικά πλήθος αυλάκων ανά πόλο και φάση $q = 1$, θα είναι:

$$Q_s = m \cdot p \cdot q = 42 \text{ αυλάκια} \quad (4.12)$$

Η μέση ροή ανά πόλο, θεωρώντας $B = 0.7 \text{ T}$, μέσω της σχέσης 3.19 υπολογίζεται:

$$\Phi = \bar{B} \frac{\pi \cdot D}{p} L = 0.253 \text{ Wb} \quad (4.13)$$

Εφόσον έχει υπολογιστεί η μέση ροή ανά πόλο, μέσω της σχέσης 3.20 υπολογίζεται ο αριθμός των ελιγμάτων των πηνίων ανά φάση, θεωρώντας φασική τάση, $E = 6600 \text{ V}/\sqrt{3}$.

$$N = \frac{E}{4.44 \cdot \Phi \cdot f} = 56.56 \quad (4.14)$$

Έπειτα, υπολογίζεται και το πλήθος των αγωγών ανά αύλακα μέσω της σχέσης 3.21, θεωρώντας ότι τα πηνία συνδέονται εν σειρά:

$$n_s = \frac{N}{q \cdot p / 2} = 8.08 \Rightarrow n_s = 8 \quad (4.15)$$

$$\Rightarrow N = 56$$

$$\Rightarrow \Phi = 0.255 \text{ Wb}$$

Η συνολική απαιτούμενη ΜΕΔ του τυλίγματος τυμπάνου προκύπτει από την σχέση 3.23 ως εξής:

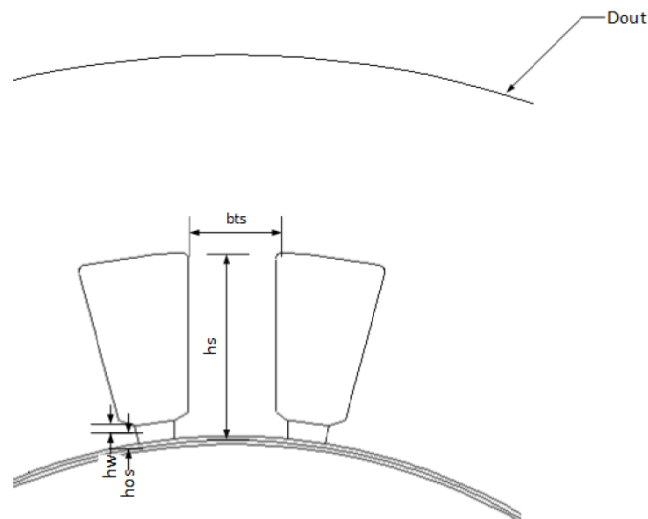
$$ME\Delta = N \cdot I = 55664 \text{ A}\varepsilon \quad (4.16)$$

Ενώ θεωρώντας πυκνότητα ρεύματος, $J = 5 \text{ A/mm}^2$, υπολογίζεται η ελάχιστη ενεργός διατομή σύμφωνα και με τη σχέση 3.24. Τέλος, θεωρώντας συντελεστή αξιοποίησης της αύλακας, $ff = 0.5$, προκύπτει και η διατομή της αύλακας μέσω της σχέσης 3.25.

$$A_{cu} = \frac{n_s \cdot I}{J} = 1590.4 \text{ mm}^2 \quad (4.17)$$

$$A_{slot} = \frac{A_{cu}}{ff} = 3180.8 \text{ mm}^2 \quad (4.18)$$

Για τη σχεδίαση του στάτη επιλέγονται, αρχικά, τραπεζοειδή ημίκλειστα αυλάκια, όπως φαίνονται στο 4.3. Τα τραπεζοειδή αυλάκια εξασφαλίζουν το σταθερό πλάτος των δοντιών απαραίτητο για την ομαλή φόρτιση τους.



Σχήμα 4.3: Γεωμετρία αυλάκων στάτη

Στο σχήμα 4.3 φαίνεται η γεωμετρία των αυλάκων του στάτη. Από τις διάφορες διαστάσεις άλλες επιλέγονται από τυπικές τιμές και άλλες προσδιορίζονται από εμπειρικούς τύπους ή από αναλυτικές σχέσεις.

Το ύψος της αύλακας του στάτη, h_s , δίνεται από τη σχέση:

$$h_s = K \frac{\pi \cdot D_g}{Q_s} \left(1 - \frac{B_g}{B_{ts}}\right) \quad (4.19)$$

όπου K ο λόγος του ύψους προς το πλάτος της αύλακας h_s/b_s . Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [14] ο λόγος αυτός λαμβάνει τιμές 3 έως 6, με τις μεγαλύτερες τιμές να αντιστοιχούν και σε μεγαλύτερες μηχανές.

Το ύψος, h_{os} , του ανοίγματος της αύλακας και το ύψος της σφηνοειδούς περιοχής, h_w , ορίζονται ως ποσοστά του συνολικού ύψους της αύλακας του στάτη, h_s .

Η εξωτερική διάμετρος, D_{out} , ορίζεται επίσης παραμετρικά σε σχέση με τη διάμετρο του μέσου διακένου προκειμένου να επιτρέπει την επιστροφή της ροής στο σώμα του στάτη χωρίς να δημιουργούνται κορεσμοί σε αυτό.

Το πολικό βήμα ορίζεται ως εξής: $\tau = \frac{\pi \cdot D_g}{p}$. Επομένως, το βήμα κάθε αύλακας υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\tau_s = \frac{\tau}{3 \cdot q} \quad (4.20)$$

Θεωρώντας πως όλη η ροή του διακένου περνά από τα δόντια του στάτη θα ισχύει η σχέση:

$$B_g \cdot \tau_s \cdot L \simeq B_{ts} \cdot b_{ts} \cdot L \cdot K_{Fe} \quad (4.21)$$

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

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

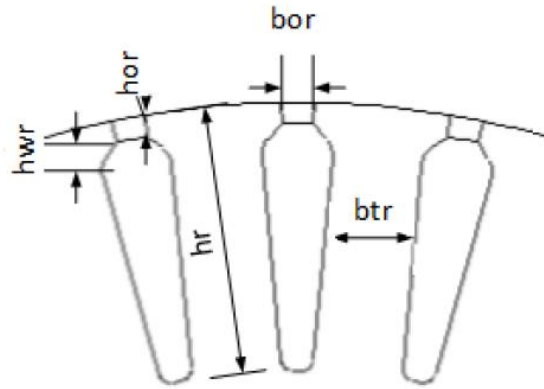
$$b_{ts} = \frac{B_g \cdot \tau_s}{B_{ts} \cdot K_{Fe}} \quad (4.22)$$

Κατά τη σχεδίαση του στάτη, δοκιμάστηκε και συγκρίθηκε τόσο το τύλιγμα μονής στρώσης, όσο και τύλιγμα διπλής στρώσης κλασματικού βήματος $k = 5/6$, προκειμένου να εκμεταλλευτούμε τα πλεονεκτήματα του τυλίγματος διπλής στρώσης.

4.2.3 Προσδιορισμός χαρακτηριστικών δρομέα

Σύμφωνα με τις προϋποθέσεις που έχουν τεθεί στον προηγούμενο κεφάλαιο σχετικά με την επιλογή του αριθμού των αυλάκων του δρομέα, επιλέγεται: $Q_r = 54$.

Στο σχήμα 4.4 φαίνεται η γεωμετρία των αυλάκων του δρομέα κατασκευαστικής κλάσης A.



Σχήμα 4.4: Γεωμετρία αυλάκων 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. Το πλάτος του δοντιού του δρομέα υπολογίζεται από την σχέση:

$$b_{tr} = \frac{B_g}{K_{Fe} \cdot B_{tr}} \tau_r \quad (4.23)$$

Το πάχος του δοντιού στην περίμετρο του δρομέα, b_{or} , ορίζεται ως ποσοστό του συνολικού πλάτους του δοντιού, όπως αντίστοιχα και το ύψος του ανοίγματος διακένου, h_{or} , ως ποσοστό του συνολικού ύψους του δοντιού του δρομέα, h_r .

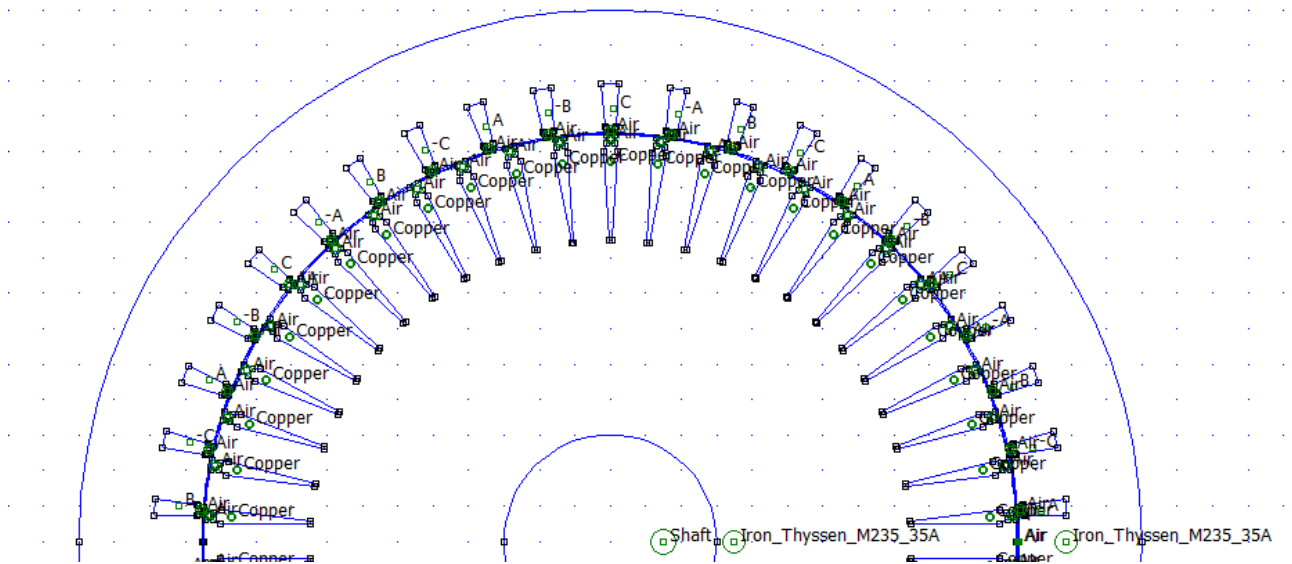
4.2.4 Τελική γεωμετρία

Συγκεντρώνοντας τα στοιχεία της προκαταρκτικής μελέτης και της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στη συνέχεια, μπορεί να σχεδιαστεί η αρχική γεωμετρία του κινητήρα με ακρίβεια.

Οι βασικές διαστάσεις της μηχανής συγκεντρώνονται στον ακόλουθο πίνακα. Τα μεγέθη αυτά επιλέχθηκαν κατά την προκαταρκτική σχεδίαση μετά από δοκιμές, προκειμένου να περιορίζεται η επαγωγή στα δόντια του στάτη και του δρομέα στα 1.9 T καθώς επίσης και στο σώμα του στάτη να μην υπερβαίνει το 1.7 T. Ιδιαίτερα για την περίπτωση του κλασματικού βήματος, έχουν υπερεκτιμηθεί λίγο λόγω του χαμηλότερου συντελεστή τυλίγματος, k_w , που παρουσιάζει. Ενώ, παρακάτω στο σχήμα 4.5 παρουσιάζεται και η τελική γεωμετρία. Για λόγους ευκρίνειας, στο σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το μισό τμήμα του κινητήρα που σχεδιάστηκε. Στο δρομέα, παρατηρούνται επιμήκεις αύλακες, οι οποίες επιλέχθηκαν έπειτα από κάποιες δοκιμές προκειμένου να εξασφαλισθεί το απαραίτητο πλάτος στα δόντια του δρομέα για να αποφευχθούν οι κορεσμοί σε αυτά. Όσον αφορά, τα δόντια του στάτη φαίνονται να έχουν ικανοποιητικό πλάτος, ώστε να αποφευχθούν και εκεί οι κορεσμοί.

Βασικά μεγέθη	Σύμβολο και τιμή
Αριθμός πόλων	$p=14$
Αύλακες ανά φάση και πόλο	$q=1$
Διάμετρο διακένου	$D=2.3m$
Ενεργό μήκος	$L=0.7m$
Μήκος διακένου	$\delta=0.006m$
Αριθμός αυλάκων στάση	$Q_s=42$
Βήμα αύλακας στάτη	$\tau_s=360/42^\circ$
Ύψος δοντιού στάτη	$h=0.15m$
Πάχος δοντιού στάτη	$b=0.15m$
Εξωτερική διάμετρος	$D_{out}=3.1m$
Αριθμός αυλάκων δρομέα	$Q_r=54$
Βήμα αύλακας δρομέα	$\tau_r=360/54^\circ$
Ύψος δοντιού δρομέα	$h_r=0.25m$
Πάχος δοντιού δρομέα	$b_r=0.09m$

Πίνακας 4.4: Βασικά μεγέθη της μηχανής για την τοπολογία τυλίγματος διπλής στρώσης

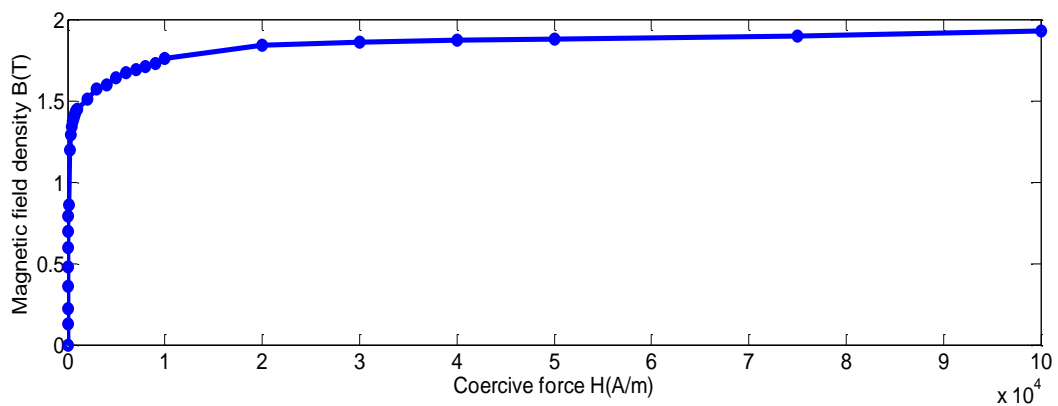


Σχήμα 4.5: Γεωμετρία ηλεκτρικής μηχανής ως αποτέλεσμα της λεπτομερούς προκαταρκτικής σχεδίασης

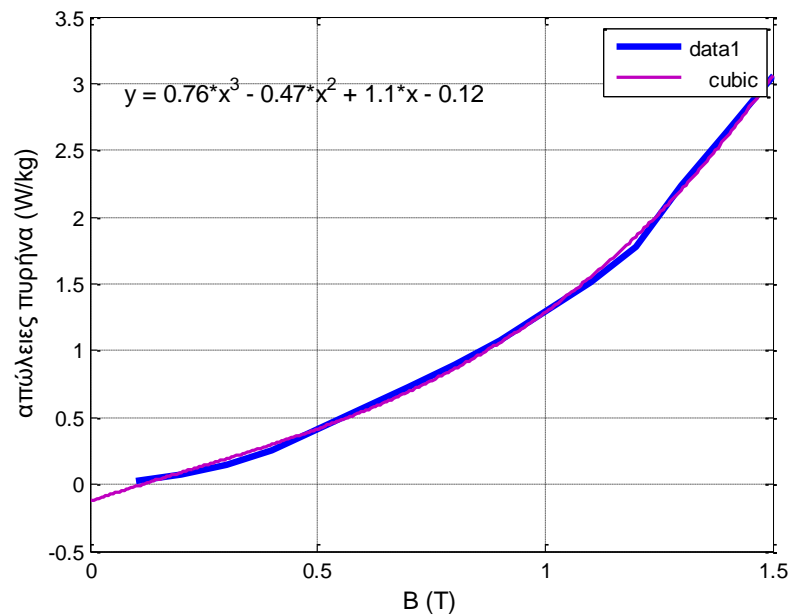
4.2.5 Υλικά κατασκευής

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 πλέον ξεπεραστεί επιλέγεται ο χαλκός για τις αύλακες του δρομέα.

Για τον πυρήνα της μηχανής χρησιμοποιείται η μαγνητική λαμαρίνα M235-35A πάχους 0.35 mm. Από τα στοιχεία του κατασκευαστή παράγονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες του υλικού. [23]



Σχήμα 4.6: Μαγνητική πόλωση μαγνητικής λαμαρίνας M253-35A.



Σχήμα 4.7: Ειδικές συνολικές απώλειες πυρήνα μαγνητικής λαμαρίνας M253-35A στα 60Hz.

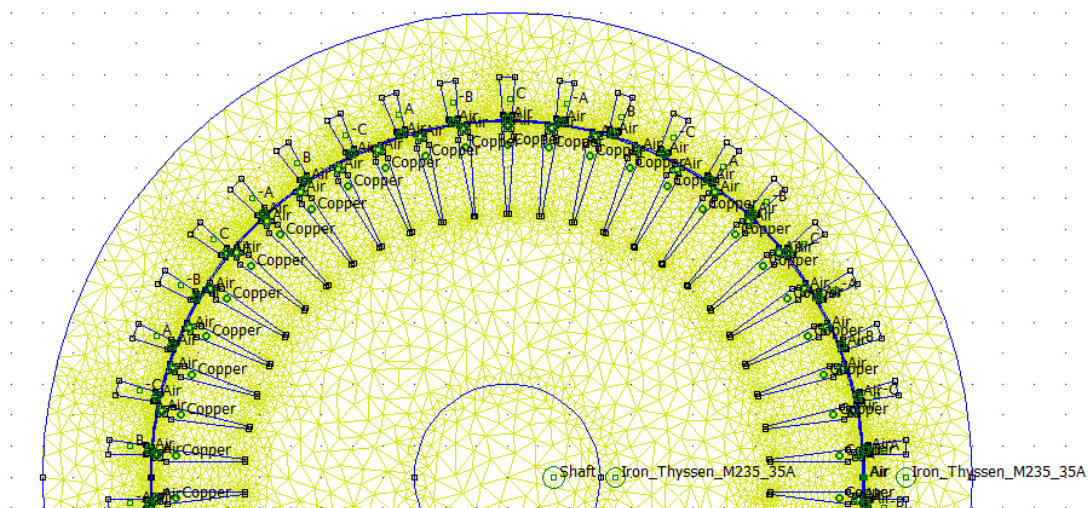
4.2.6 Παραμετροποιημένη σχεδίαση

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 των 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 στη συνέχεια. [21]

4.3 ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Ο κινητήρας κατασκευαστικής κλάσης A σχεδιάζεται στο πρόγραμμα FEMM και επιλέγεται πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που θεωρείται κατάλληλο για την ανάλυση όπως φαίνεται και στο σχήμα. Το πλέγμα στο διάκενο και στις λεπτομέρειες της γεωμετρίας που επιζητείται μεγαλύτερη ακρίβεια είναι πιο πυκνό.



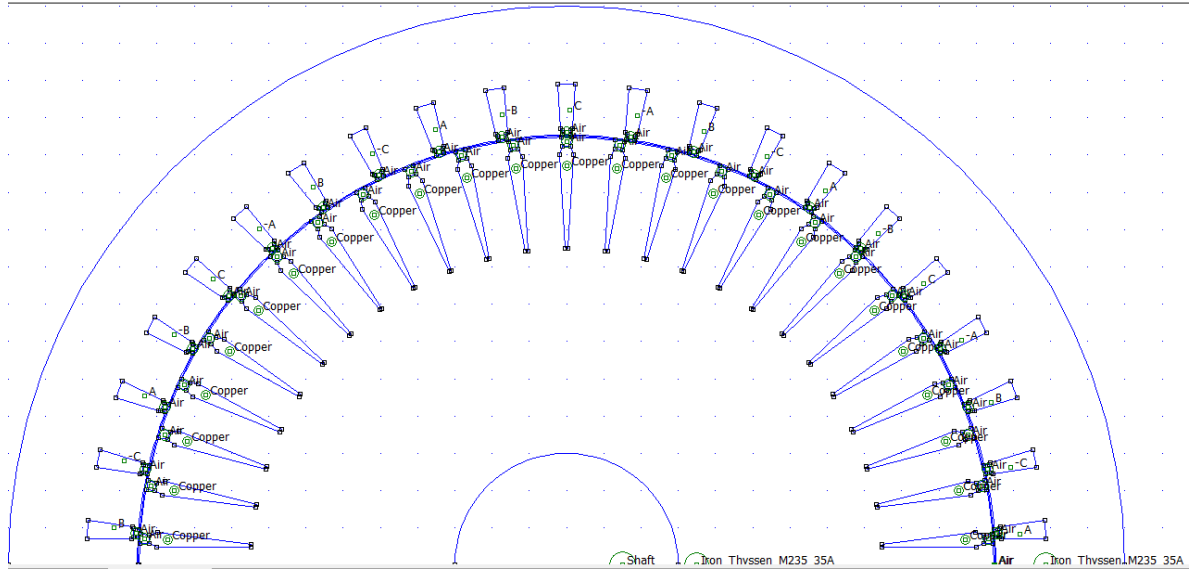
Σχήμα 4.8: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

4.3.1 Σύγκριση τοπολογιών τυλίγματος μονής και διπλής στρώσης

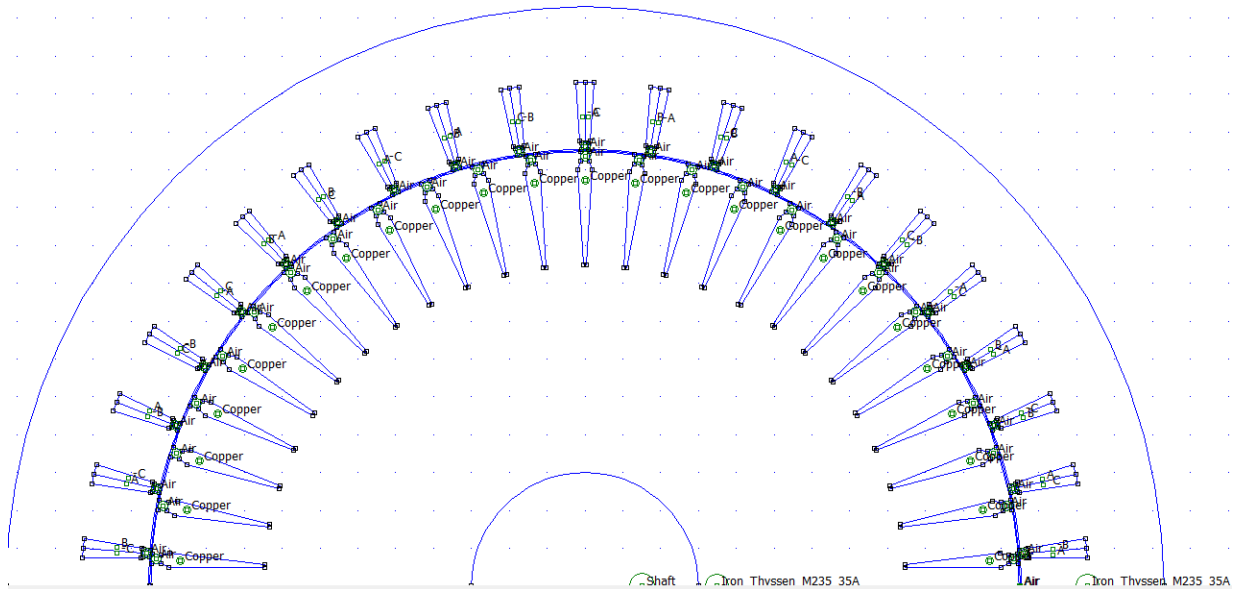
Προκειμένου να γίνει η οριστική επιλογή του τυλίγματος της μηχανής πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων FEMM, δύο διαφορετικές σχεδιάσεις μοντέλων, μία για κάθε επιλογή τυλίγματος. Στα δύο μοντέλα, ο δρομέας της μηχανής είναι ίδιος, ενώ στο στάτη, φαίνονται οι κατανομές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

την περίπτωση του κλασματικού βήματος, έχουν υπερεκτιμηθεί ελαφρά οι διαστάσεις του στάτη λόγω του χαμηλότερου συντελεστή τυλίγματος, k_w , που παρουσιάζει.

Στα σχήματα 4.9 και 4.10 παρουσιάζονται τα δύο διαφορετικά μοντέλα της προσομοίωσης:



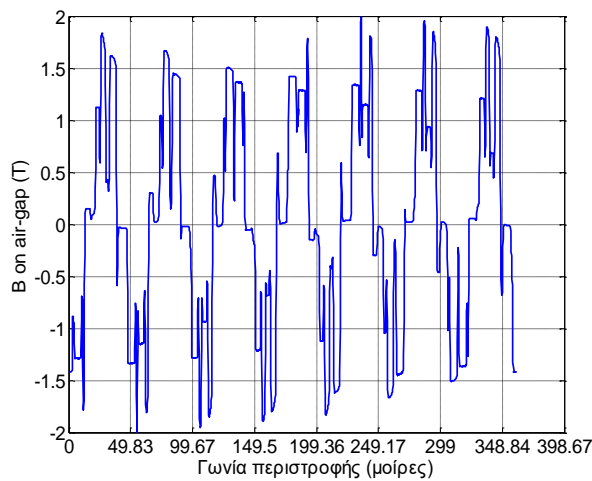
Σχήμα 4.9: Μοντέλο τυλίγματος μόνης στρώσης



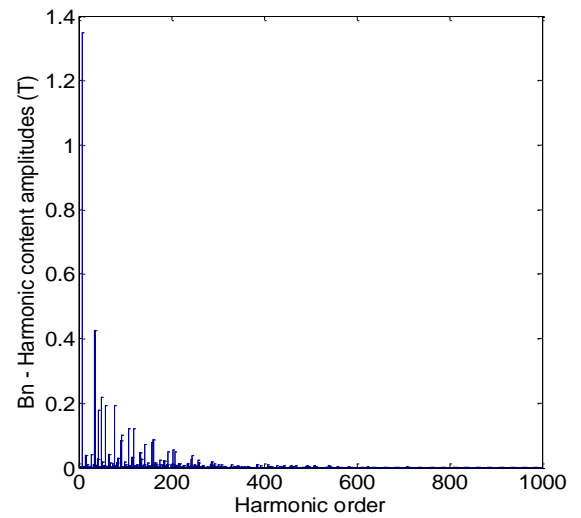
Σχήμα 4.10: Μοντέλο τυλίγματος διπλής στρώσης κλασματικού βήματος $k=5/6$

Η σύγκριση που πραγματοποιήθηκε ανάμεσα στις δύο τοπολογίες αφορά τόσο την αποδιδόμενη ροπή καθεμιάς όσο και το αρμονικό περιεχόμενο της μαγνητικής επαγωγής στο μέσο του διακένου και της αποδιδόμενης ροπής.

Η κυματομορφή καθώς και το αρμονικό περιεχόμενο της κάθετης συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής στο μέσο του διακένου για το τύλιγμα διπλής στρώσης με κλασματικό βήμα, $k=5/6$, φαίνονται στα ακόλουθα σχήματα:

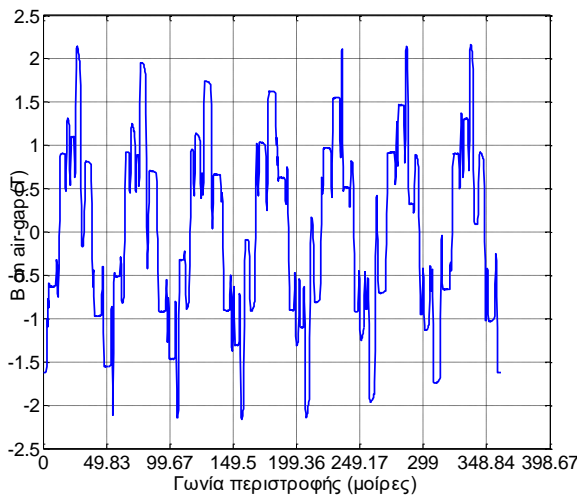


Σχήμα 4.11: Κυματομορφή μαγνητικής επαγωγής στο μέσο του διακένου στο μοντέλο τυλίγματος διπλής στρώσης

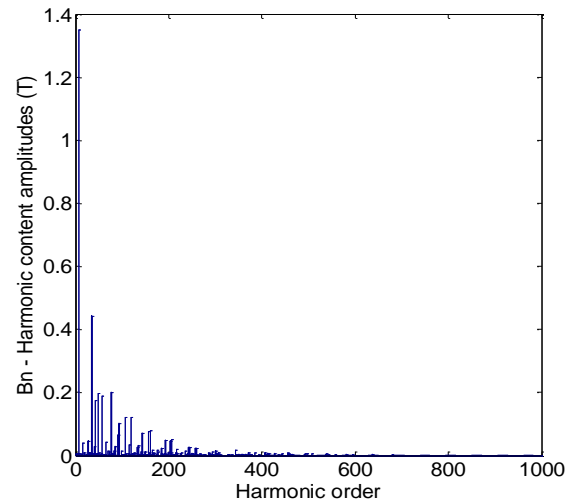


Σχήμα 4.12: Αρμονικό περιεχόμενο μαγνητικής επαγωγής στο μέσο του διακένου στο μοντέλο τυλίγματος διπλής στρώσης

Στην περίπτωση αυτή η μηχανή αποδίδει μέγιστη ροπή $T = 186 \text{ kNm}$, ενώ η ανώτερη αρμονική της ηλεκτρομαγνητικής ροπής σε συχνότητα $f = 0.024 \text{ Hz}$ έχει πλάτος, $T_2 = 35.3 \text{ Nm}$. Η κυματομορφή καθώς και το αρμονικό περιεχόμενο της μαγνητικής επαγωγής στο μέσο του διακένου για τύλιγμα μονής στρώσης με $q = 1$, φαίνονται στα παρακάτω σχήματα. Στην περίπτωση αυτή, η μηχανή αποδίδει μέγιστη ροπή $T = 190 \text{ kNm}$, ενώ η ανώτερη αρμονική της ηλεκτρομαγνητικής ροπής σε συχνότητα $f = 0.024 \text{ Hz}$ έχει πλάτος, $T_2 = 100 \text{ Nm}$.



Σχήμα 4.13: Κυματομορφή μαγνητικής επαγωγής στο μέσο του διακένου στο μοντέλο τυλίγματος μονής στρώσης



Σχήμα 4.14: Αρμονικό περιεχόμενο μαγνητικής επαγωγής στο μέσο του διακένου στο μοντέλο τυλίγματος μονής στρώσης

Επομένως, λόγω του χαμηλότερου αρμονικού περιεχομένου στη ΜΕΔ του διακένου, καθώς και των χαμηλότερων αρμονικών ροπής, επιλέγεται το τύλιγμα διπλής στρώσης κλασματικού

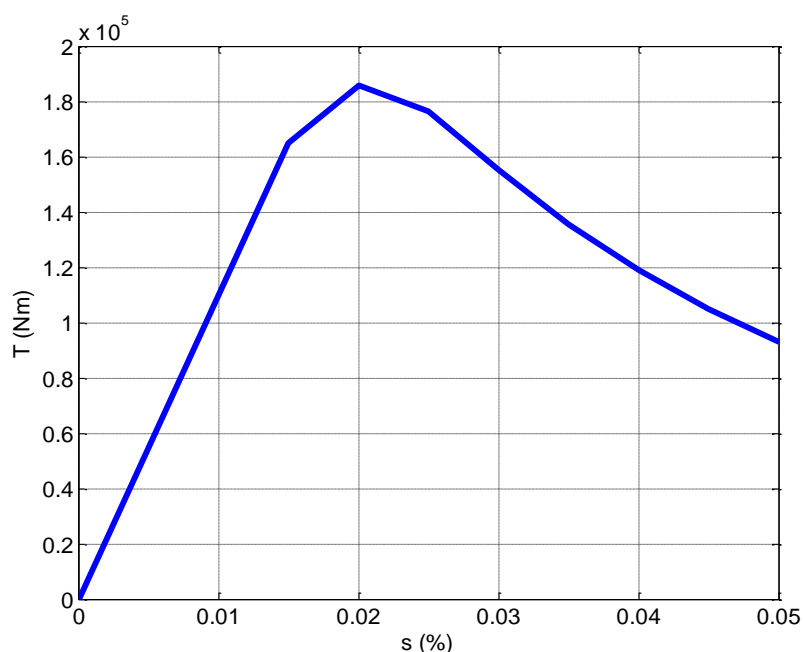
βήματος, $k = 5/6$, οπότε και όλη η μελέτη και οι αναλύσεις παρακάτω πραγματοποιούνται για την τοπολογία αυτή.

4.3.2 Επίδοση και απόδοση αρχικής οριστικής σχεδίασης

Όπως έχει αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο σχετικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, το πρόγραμμα ανάλυσης FEMM είναι ικανό να λύσει μόνο μαγνητοστατικά και αρμονικά προβλήματα. Στην περίπτωση των σύγχρονων μηχανών, η ανάλυση είναι εύκολη διότι στο δρομέα υπάρχει ένα σταθερό πεδίο ως προς αυτόν. Επομένως, η μηχανή μπορεί να αναλυθεί θεωρώντας ως πλαίσιο αναφοράς το δρομέα και τροφοδοτώντας το στάτη με ρεύματα. Με τον τρόπο αυτό το πεδίο του δρομέα είναι ακίνητο και μεταβάλλοντας την κατανομή των ρευμάτων του στάτη αλλάζει η σχετική θέση των πεδίων και προσδιορίζεται η παραγόμενη ροπή. Λύνεται επομένως με τον τρόπο αυτό ένα μαγνητοστατικό πρόβλημα.

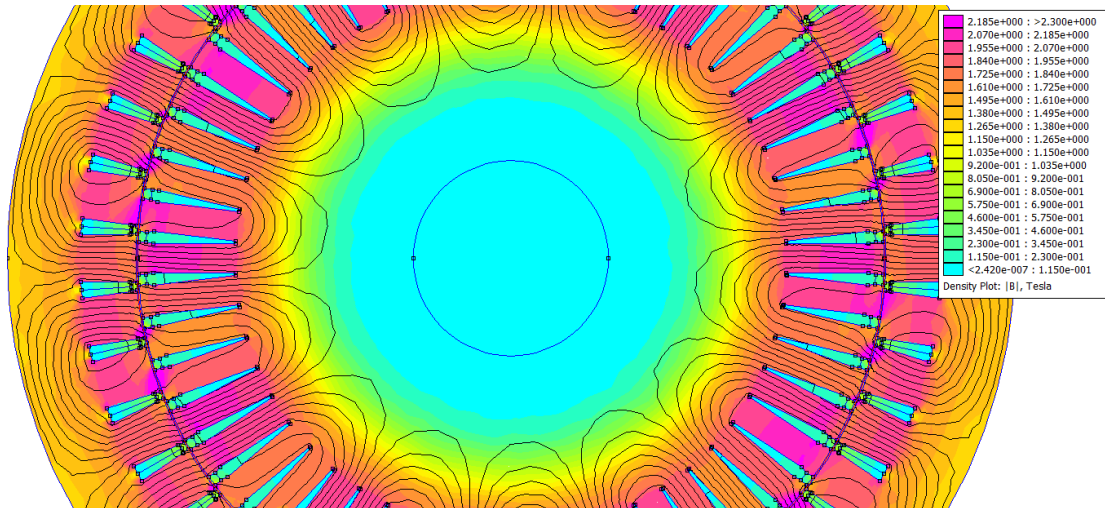
Στην περίπτωση της ασύγχρονης όμως μηχανής, το πεδίο του δρομέα είναι επαγόμενο από το στάτη όπως έχει ήδη αναλυθεί. Το πεδίο αυτό κινείται ως προς το δρομέα με την συχνότητα ολίσθησης. Έτσι, θεωρώντας αναφορά το δρομέα, τα πεδία δεν είναι πλέον ακίνητα αλλά μεταβάλλονται με τη συχνότητα ολίσθησης. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται και τα επαγόμενα ρεύματα στο δρομέα της μηχανής.

Επομένως, σύμφωνα με τα παραπάνω για να παραχθεί η χαρακτηριστική ροπής – ολίσθησης για την τοπολογία που έχει επιλεγεί μεταβάλλεται η ολίσθηση με σταθερό βήμα, επομένως και η συχνότητα του προβλήματος και μετριέται η παραγόμενη ροπή. Με τον τόπο αυτό προκύπτει η καμπύλη του σχήματος 4.15. Η μηχανή αποδίδει μέγιστη ροπή, $T = 186 \text{ kNm}$, για ολίσθηση $s = 2 \cdot 10^{-2}\%$.

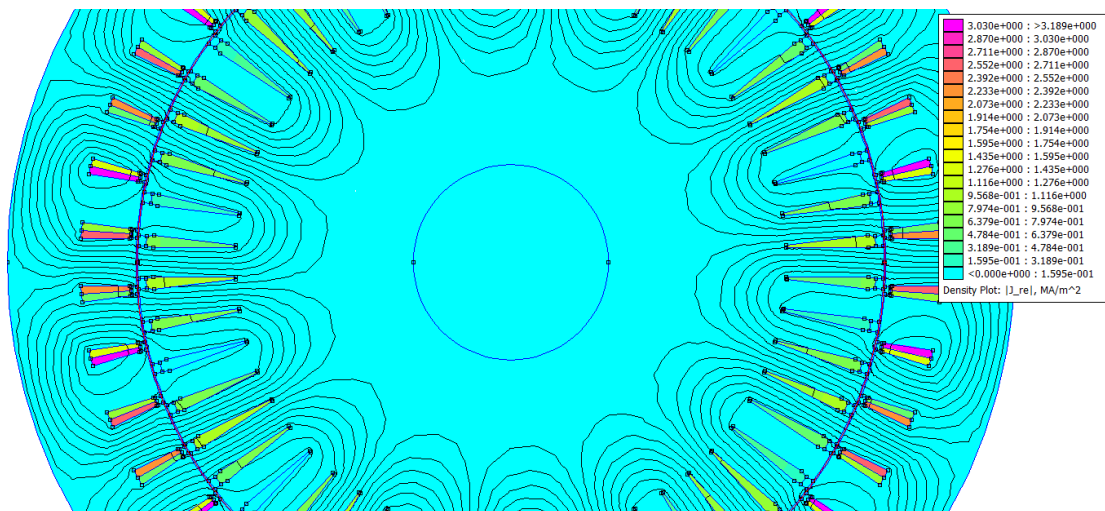


Σχήμα 4.15: Χαρακτηριστική ροπής – ολίσθησης

Μέσω της αρμονικής ανάλυσης προκύπτει τόσο η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής όσο και της πυκνότητας ρεύματος του κινητήρα για την ολίσθηση ονομαστικής ροπής φαίνονται στα σχήματα 4.16 και 4.17 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.16: Κατανομή μαγνητικής επαγωγής στη συχνότητα ονομαστικής ροπής



Σχήμα 4.17: Πυκνότητα ρεύματος στη συχνότητα ονομαστικής ροπής

Μελετώντας τα παραπάνω σχήματα της ανάλυσης, τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά. Παρόλα αυτά, προκύπτουν κάποιες παρατηρήσεις:

- Ο σίδηρος τοπικά σε κάποια δόντια του στάτη και του δρομέα του κινητήρα υπερφορτίζεται, ξεπερνώντας τις μεγαλύτερες επιθυμητές τιμές.
- Οι τιμές σε όλο το σίδηρο του κινητήρα είναι οι μεγαλύτερες δυνατές.

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

4.3.2.1 Απώλειες και απόδοση οριστικής σχεδίασης

Στην ολίσθηση της ονομαστικής ροπής της μηχανής υπολογίζονται οι απώλειες, μέσω των μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο.

- Απώλειες χαλκού στάτη : $P_{cu_{stator}} = 105330 \text{ W} = 105,3 \text{ kW}$
- Απώλειες χαλκού δρομέα : $P_{cu_{rotor}} = 2041 \text{ W} = 2 \text{ kW}$
- Απώλειες σιδήρου: $P_{Fe} = 138110 \text{ W} = 138,1 \text{ kW}$

Έτσι, αμελώντας τις δευτερεύουσες απώλειες προκύπτει ο βαθμός απόδοσης της μηχανής ίσος με:

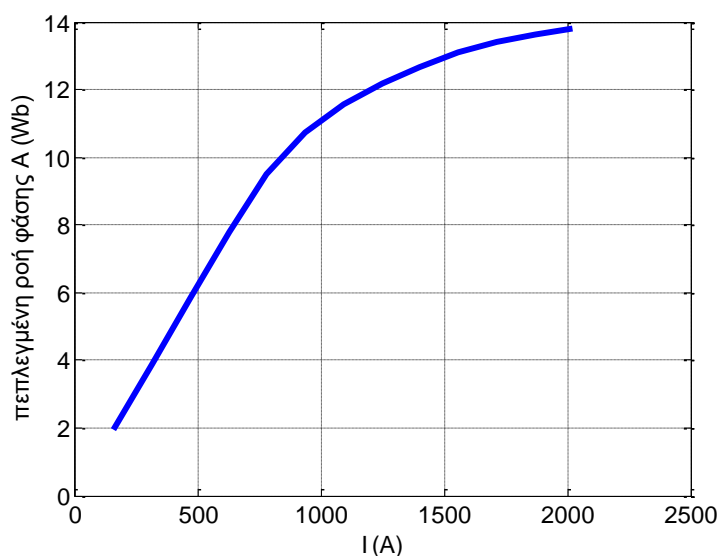
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{T \cdot \omega}{T \cdot \omega + P_{cu_{stator}} + P_{cu_{rotor}} + P_{Fe}} = 0.975 \Rightarrow \eta = 97.5\%$$

Παρατηρείται ότι οι απώλειες χαλκού στο δρομέα είναι ιδιαίτερα χαμηλές συγκριτικά με τις απώλειες χαλκού στο στάτη. Το αποτέλεσμα αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι η ολίσθηση των δύο πεδίων είναι ιδιαίτερα χαμηλή, οπότε πλησιάζει τη λειτουργία κενού φορτίου. [25]

4.3.3 Υπολογισμός ισοδύναμου κυκλώματος

4.3.3.1 Δοκιμή κενού φορτίου

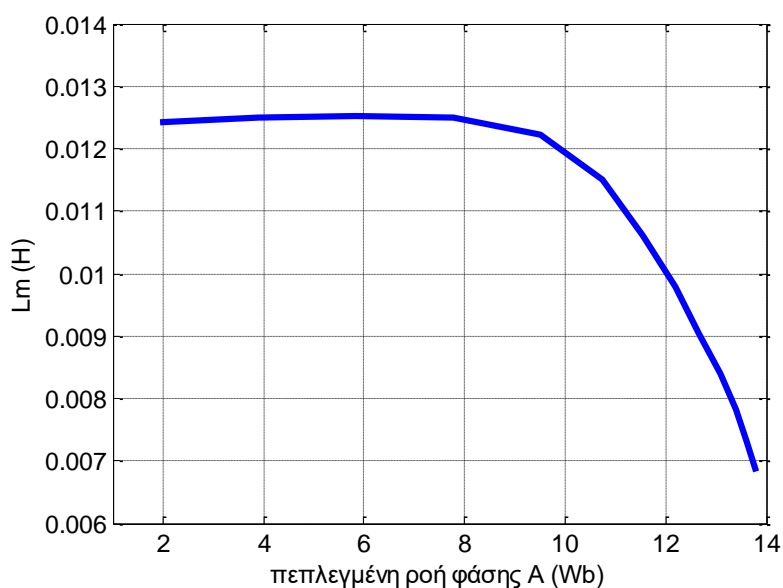
Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που έχει ήδη αναπτυχθεί στην 3.5.1 για τον προσδιορισμό της μη γραμμικής αντίδρασης μαγνήτισης, L_M , πραγματοποιείται η προσομοίωση από την οποία προκύπτει το ακόλουθο γράφημα.



Σχήμα 4.18: Πεπλεγμένη ροή σε συνάρτηση με το ρεύμα της φάσης Α

Στο διάγραμμα είναι φανερός ο κορεσμός του μαγνητικού της μηχανής, που ξεκινά μετά από γραμμικό τμήμα της καμπύλης.

Σύμφωνα με τη σχέση 3.51 της παραγράφου 3.5.1 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 4.19.



Σχήμα 4.19: Αντίδραση μαγνήτισης L_M ως συνάρτηση της πεπλεγμένης ροής

Η σταθερή τιμή της αντίδρασης μαγνήτισης που αντιστοιχεί στο γραμμικό τμήμα της καμπύλης του σχήματος 4.19 είναι $L_M = 0.0125 H$.

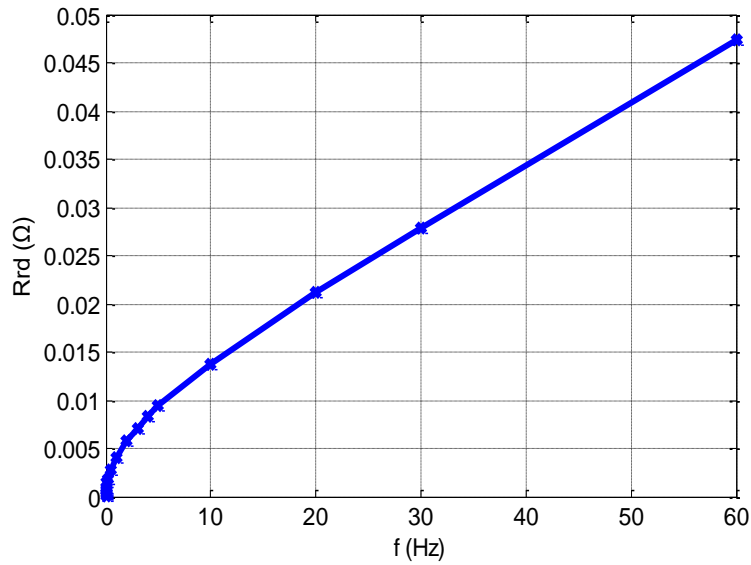
Για να είναι τα αποτελέσματα χρήσιμα γίνεται η θεώρηση ότι η εξάρτηση της L_M από τον κορεσμό είναι ίδια τόσο στην περίπτωση κενού φορτίου όσο και στη λειτουργία υπό φορτίο, δηλαδή:

$$L_M(\lambda_{s0}) = L_M(\lambda_s) \quad (4.24)$$

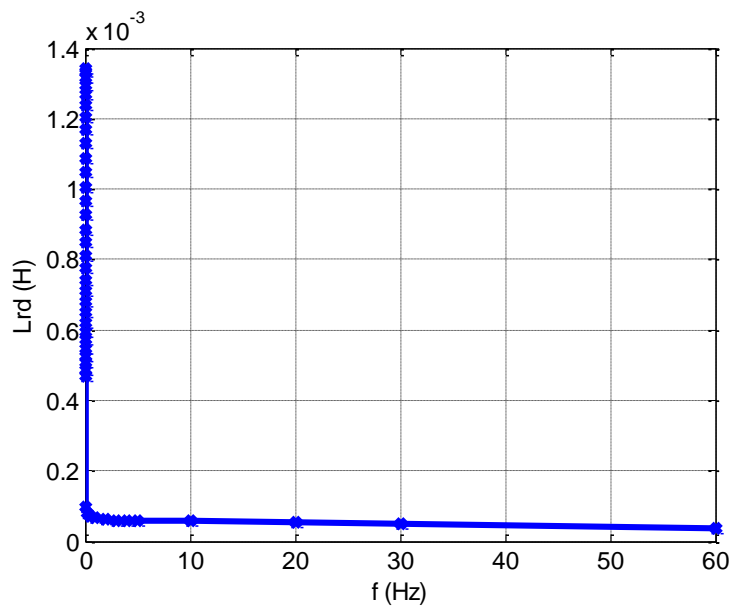
4.3.3.2 Δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που έχει ήδη αναπτυχθεί στην 3.5.2, αφού προσδιοριστούν οι τιμές των R_{eq} και L_{eq} με προσομοίωση για διάφορες τιμές της συχνότητας, πρέπει να υπολογιστούν στη συνέχεια τα $R_{r,2D}$ και $L_{r,2D}$. Αυτό γίνεται με λύση του συστήματος μη γραμμικών εξισώσεων που προκύπτει.

Στα σχήματα 4.20 και 4.21 φαίνονται οι συναρτήσεις $R_{r,2D}(f_r)$ και $L_{r,2D}(f_r)$ αντίστοιχα.



Σχήμα 4.20: Μεταβολή της αντίστασης $R_{r,2D}$ με τη συχνότητα του δρομέα



Σχήμα 4.21: Μεταβολή της αντίδρασης $L_{r,2D}$ με τη συχνότητα του δρομέα.

4.3.3.3 Υπολογισμός παραμέτρων 3D φαινομένων

Όπως έχει ήδη αναλυθεί στην παράγραφο 3.5.3 του προηγούμενου κεφαλαίου, οι όροι που υπολείπονται για τον ολοκληρωτικό υπολογισμό του ισοδύναμου κυκλώματος είναι αυτοί που οφείλονται στα 3D φαινόμενα.

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

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

$$L_{\sigma_s,ew} = \mu_0 \frac{N^2}{2 \cdot p} L_{ew} \lambda_{ew} \quad (4.25)$$

όπου λ_{ew} είναι ο ειδικός συντελεστής επιδεικτικότητας (οι τιμές του κυμαίνονται από 0.35 έως 0.55 ανάλογα με τον τύπο του τυλίγματος), $N=2N_s$ είναι το πλήθος των αγωγών ανά φάση και το ενεργό μήκος των συνδέσεων του L_{ew} υπολογίζεται όπως και στις απώλειες χαλκού. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή το ενεργό μήκος των συνδέσεων έχει υπολογιστεί ίσο με $L_{ew} = 3.132 \text{ m}$. Επομένως, γνωρίζοντας τις τιμές όλων των μεγεθών προκύπτει : $L_{\sigma_s,ew} = 0.00041 \text{ H}$.

Τελευταία υπολογίζεται η αντίσταση των δακτυλίων βραχυκύκλωσης του δρομέα μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$R_{r,3D} = \rho \frac{3 \cdot (k_w \cdot N)^2}{2 \cdot \pi \cdot p^2 \cdot S_{ring}} = 0.0053 \Omega \quad (4.26)$$

όπου S_{ring} το εμβαδό του δακτυλίου κάθε αύλακας και ρ η ειδική αντίσταση χαλκού για του 90°C που έχει αναφερθεί και παραπάνω.

Τέλος, η ανά φάση ωμική αντίσταση του τυλίγματος του στάτη έχει ήδη υπολογιστεί στον υπολογισμό των απωλειών χαλκού του στάτη και είναι ίση με $R_{phase} = 0.0157 \Omega$.

5 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ 10MW ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗΣ LNG CARRIER ΒΑΣΕΙ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

5.1 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

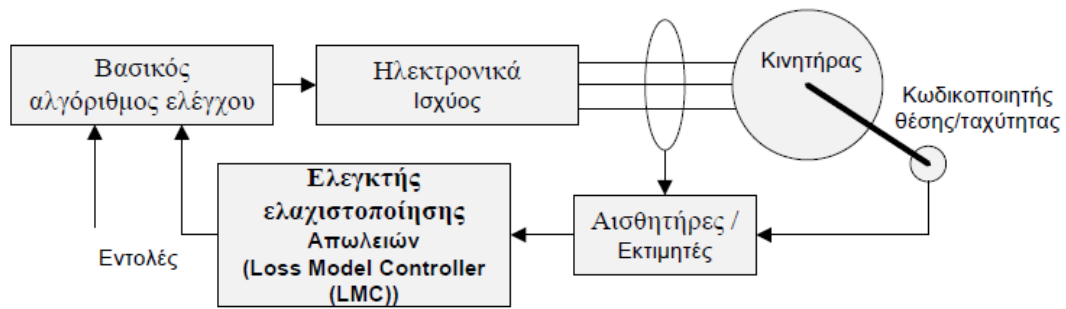
Την τελευταία δεκαετία τα ζητήματα μείωσης απωλειών σε συστήματα κίνησης και πρόωσης παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για μελέτη και έρευνα. Το ενδιαφέρον αυτό έγκειται σε όλα τα συνιστώσα μέρη ενός συστήματος με ιδιαίτερα έμφαση να δίνεται στον κινητήρα αλλά και τον αντιστροφέα από τον οποίο αυτός τροφοδοτείται. Παράλληλα όμως με το επιστημονικό ενδιαφέρον, ένα σύστημα υψηλής απόδοσης μπορεί να προσφέρει μειωμένες καταναλώσεις και συνεπαγόμενα οικονομικά οφέλη. [23]

Όπως έχει ήδη αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι απώλειες του κινητήρα συνίστανται σε απώλειες χαλκού στάτη και δρομέα, απώλειες πυρήνα, μηχανικές απώλειες και τέλος, διαφεύγουσες απώλειες. Εξ αυτών οι απώλειες πυρήνα και χαλκού αποτελούν συνάρτηση της μαγνητικής και ηλεκτρικής φόρτισης του κινητήρα αντίστοιχα, γι' αυτό είναι και ελέγξιμες. Συνεπώς, προκύπτει το κίνητρο για ελαχιστοποίηση των συνολικών απωλειών, μέσω της αναζήτησης ενός βέλτιστου συνδυασμού των μεταβλητών συνιστωσών απωλειών πυρήνα και χαλκού καθώς οι διαφεύγουσες μπορούν να θεωρηθούν σταθερές για δεδομένο κινητήρα. Ο έλεγχος της μαγνητικής φόρτισης μπορεί να επιτευχθεί με έλεγχο της μαγνητικής ροής στάτη, δρομέα ή μαγνήτισης του κινητήρα. Επομένως, προκειμένου να υλοποιηθεί η ελαχιστοποίηση απωλειών του κινητήρα (μεγιστοποίηση της απόδοσης του) αρκεί να επιτευχθεί ισοζύγιο μεταξύ ηλεκτρικής και μαγνητικής φόρτισης.

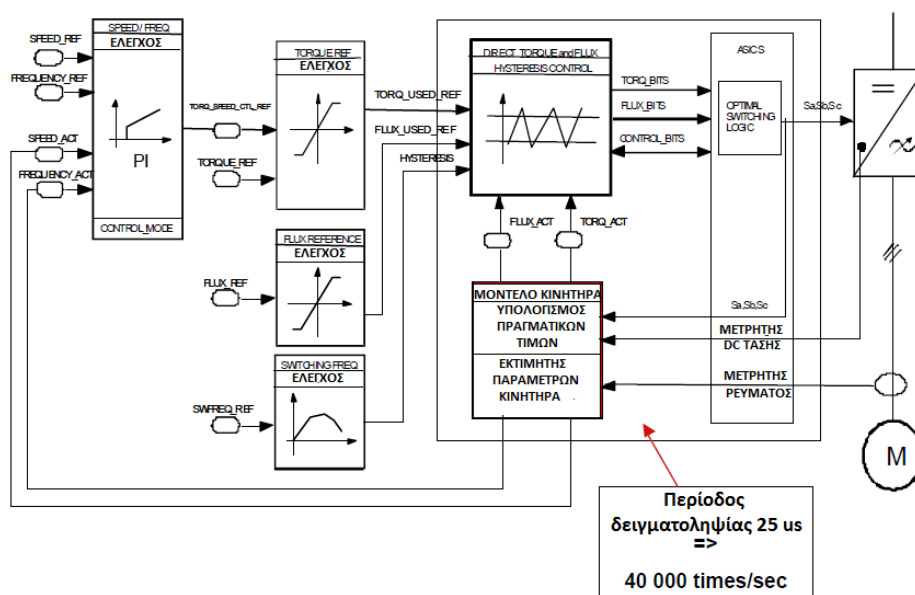
Ιδιαίτερα για τις εφαρμογές της ηλεκτροπρόωσης ο έλεγχος του κινητήρα υλοποιείται με διάφορες μεθόδους. Ο πλέον χρησιμοποιούμενος για επαγωγικό κινητήρα ηλεκτροπρόωσης είναι αυτός του ελέγχου της ροής.

Για τους λόγους αυτούς η βελτιστοποίηση του κινητήρα που έχει ήδη σχεδιαστεί καλείται να καλύψει δύο αντιμαχόμενες παραμέτρους, όπως αυτή της επίδοσης αλλά και της απόδοσης του. Στόχος είναι λοιπόν το ολικό βέλτιστο για τον κινητήρα που μελετάται που μπορεί να επιτευχθεί με την ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης κόστους που θα εμπλέκει τα κατάλληλα βάρη για κάθε όρο της.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένα τυπικό απλοποιημένο δομικό διάγραμμα για έλεγχο με λειτουργία ελαχιστοποίησης απωλειών σε κινητήρα. Ενώ στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ένα δομικό διάγραμμα με έλεγχο ροής σε κινητήρα κύριας πρόωσης.



Σχήμα 5.1: Σύστημα οδήγησης ηλεκτροκινητήρα με λειτουργία ελαχιστοποίησης απωλειών [24]

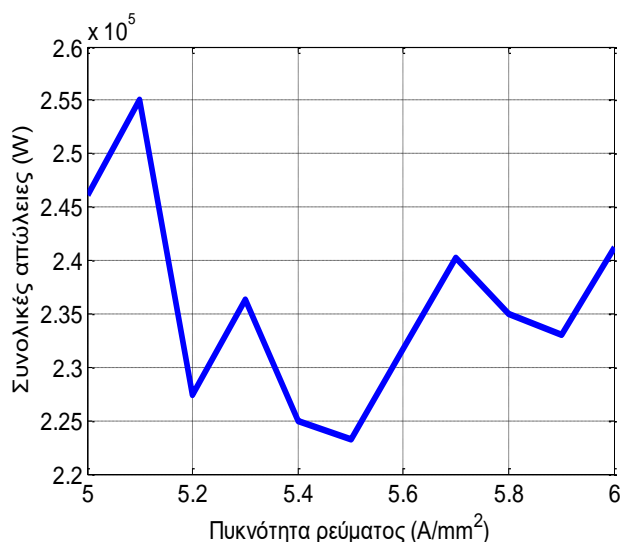


Σχήμα 5.2: Απλοποιημένο δομικό διάγραμμα για έλεγχο ροής, γνωστός και ως άμεσος έλεγχος ροπής [4]

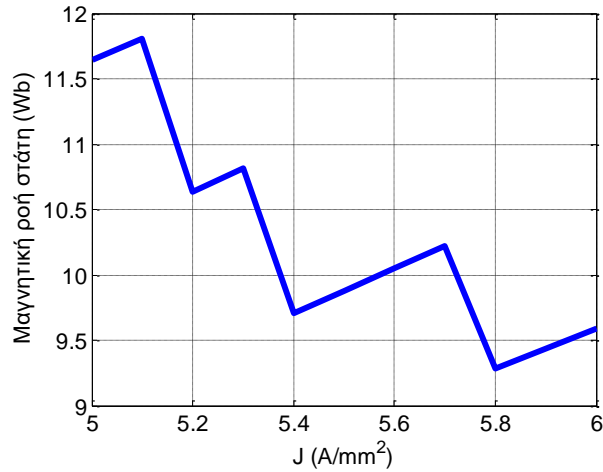
5.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο ένας προηγμένος επαγωγικός κινητήρας τροφοδοτείται από έναν μετατροπέα και όχι απευθείας από το δίκτυο. Το γεγονός αυτό προσφέρει τη δυνατότητα, κατά τη βελτιστοποίηση του αρχικά σχεδιασμένου κινητήρα, να μεταβάλλεται η πυκνότητα του ρεύματος που τροφοδοτούνται τα τυλίγματα του στάτη, εντός των ορίων θερμικής αντοχής των τυλιγμάτων καθώς επίσης και η ολίσθηση, προκειμένου να βρεθεί ένα βέλτιστο σημείο λειτουργίας του κινητήρα που θα αποδίδει την ονομαστική ροπή και συγχρόνως θα αυξάνει την απόδοση αυτού. Όπως έχει αναλυθεί και παραπάνω, για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση του κινητήρα αρκεί να επιτευχθεί ισοζύγιο μεταξύ ηλεκτρικής και μαγνητικής φόρτισης.

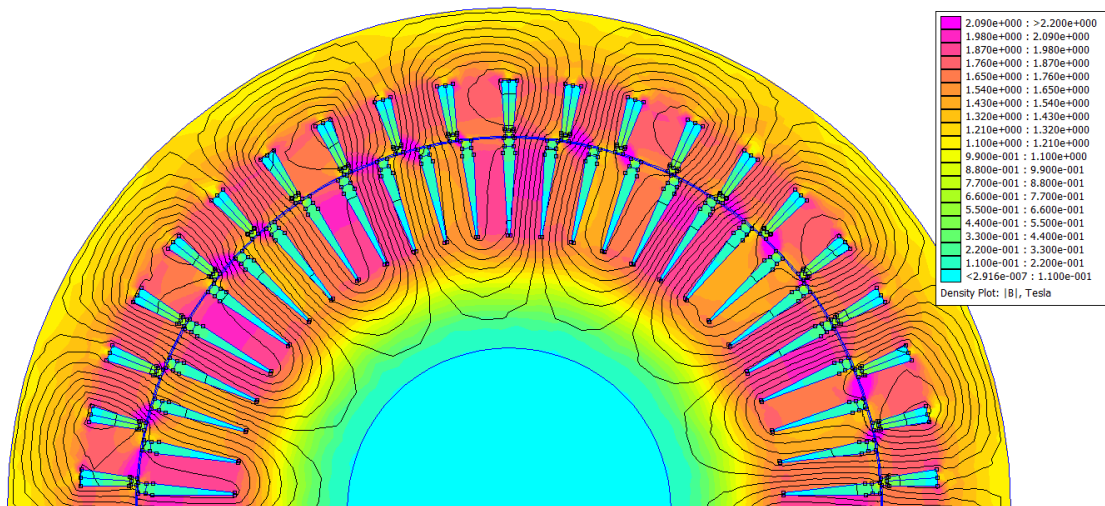
Η υλοποίηση του αλγορίθμου αυτού προέκυψε έπειτα από διερεύνηση στην αρχική γεωμετρία του κινητήρα. Συγκεκριμένα, υλοποιήθηκε ένας πρώτος αλγόριθμος μεταβολής της πυκνότητας ρεύματος των τυλιγμάτων του στάτη από 5 A/mm^2 έως 6 A/mm^2 με βήμα μεταβολής 0.1 A/mm^2 και της ολίσθησης λειτουργίας και βρέθηκαν τα νέα σημεία ονομαστικής λειτουργίας. Σχετικά με το εύρος της πυκνότητας ρεύματος των τυλιγμάτων του στάτη, μια αύξηση έως τα 6 A/mm^2 παρόλο που είναι το ανώτερο όριο ώστε να μην χρειάζεται εξαναγκασμένη είναι αποδεκτή λόγω του γεγονότος ότι ο κινητήρας είναι βυθισμένος στο θαλασσινό νερό οπότε υπάρχει επαρκής ψύξη στα τυλίγματα του στάτη. Αυτό που παρατηρήθηκε και φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα είναι ότι ο κινητήρας αποδίδει την ίδια ονομαστική ροπή, εφόσον αυτό τέθηκε ως συνθήκη ελέγχου, παρουσιάζει λίγο αυξημένες απώλειες χαλκού λόγω αύξησης της πυκνότητας ρεύματος αλλά συγχρόνως μειωμένες απώλειες πυρήνα, λόγω του μικρότερου κορεσμού που παρατηρείται, εφόσον επιλέγεται να λειτουργεί σε σημείο με μειωμένη ροή. Το αποτέλεσμα του αλγορίθμου αυτού φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα, όπου παρουσιάζονται οι συνολικές απώλειες του κινητήρα καθώς και η μαγνητική ροή του στάτη συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος για βέλτιστη ολίσθηση. Ενώ στην συνέχεια παρουσιάζονται και η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής για πυκνότητα ρεύματος $J = 5.2 \text{ A/mm}^2$ και $J = 5.5 \text{ A/mm}^2$ όπου παρουσιάζουν βέλτιστα σημεία λειτουργίας.



Σχήμα 5.3: Συνολικές απώλειες κινητήρα αρχικής γεωμετρίας συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος στη βέλτιστη ολίσθηση

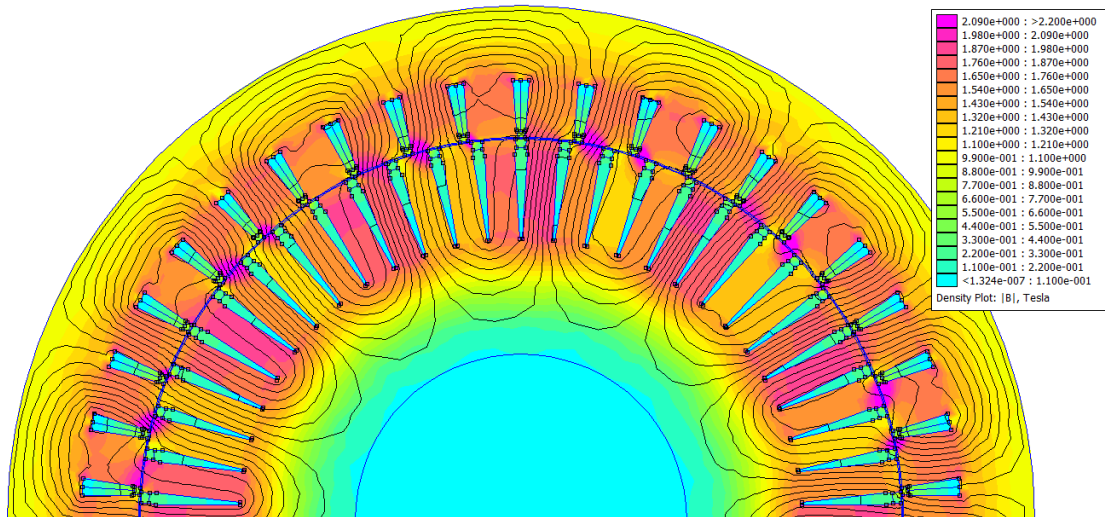


Σχήμα 5.4: Μαγνητική ροή στο στάτη του κινητήρα αρχικής γεωμετρίας συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος στη βέλτιστη ολίσθηση



Σχήμα 5.5: Κατανομή μαγνητικής επαγωγής στη συχνότητα της ονομαστικής ροπής και πυκνότητα ρεύματος $J=5.2 \text{ A/mm}^2$

Η μηχανή στην περίπτωση αυτή αποδίδει ροπή ίση με $T = 188810 \text{ Nm} = 188.8 \text{ kNm}$ ενώ παρουσιάζει συνολικές απώλειες $P_{total} = 227398 \text{ W} = 227.4 \text{ kW}$, οι οποίες είναι ήδη μειωμένες συγκριτικά με αυτές της αρχικής σχεδίασης. Επίσης, παρατηρείται μια μικρή βελτίωση ως προς την κατανομή της μαγνητικής επομένως ένας περιορισμός στους κορεσμούς.



Σχήμα 5.6: Κατανομή μαγνητικής επαγωγής στη συχνότητα της ονομαστικής ροπής και πυκνότητα ρεύματος $J=5.5 \text{ A/mm}^2$

Η μηχανή στην περίπτωση αυτή αποδίδει ροπή ίση με $T = 186578 \text{ Nm} = 186.6 \text{ kNm}$ ενώ παρουσιάζει συνολικές απώλειες $P_{total} = 223187 \text{ W} = 223.2 \text{ kW}$, οι οποίες είναι ήδη μειωμένες συγκριτικά με αυτές τις αρχικής σχεδίασης αλλά και την προηγούμενης λειτουργικής κατάστασης. Επίσης, παρατηρείται βελτίωση ως προς την κατανομή της μαγνητικής καθώς οι κορεσμοί παραμένουν τοπικά σε κάποια δόντια του δρομέα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, επιβεβαιώνεται μέσω υπολογιστικών εργαλείων προσομοίωσης η λογική της αύξησης της ηλεκτρικής φόρτισης και συγχρόνως μείωση της μαγνητικής φόρτισης προκειμένου να επιτευχθεί ένα ισοζύγιο που θα παρέχει την ονομαστική ροπή με μεγαλύτερους βαθμούς απόδοση.

Στην συνέχεια στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το διάγραμμα ροής του συνολικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Συγκεκριμένα, η βελτιστοποίηση της παρούσας εφαρμογής αφορά ταυτόχρονη βελτιστοποίηση δύο κριτηρίων. Πριν, αναλυθεί ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε κρίνεται σκόπιμο να αναλυθεί ο τρόπος που προσεγγίζεται το πολυκριτηριακό πρόβλημα.

Ο κλασικός χειρισμός ενός προβλήματος ταυτόχρονης βελτιστοποίησης πολλών κριτηρίων συνίσταται στον εκ των προτέρων καθορισμό των προτιμήσεων του αναλυτή σχετικά με τη μορφή της καλύτερα συμβιβαστικής λύσης. [25] Αυτό προϋποθέτει τη χρήση ενός τελεστή ενσωμάτωσης των επιμέρους κριτηρίων σε μια ενιαία έκφραση, που είναι ισοδύναμη της στοχικής συνάρτησης ή αλλιώς συνάρτησης κόστους ενός βαθμωτού προβλήματος. Η μέθοδος των βαρών είναι η πλέον τετριμμένη προσέγγιση, η οποία συνίσταται στη στάθμιση των κριτηρίων βελτιστοποίηση με χρήση προεπιλεγμένων συντελεστών βάρους, οπότε η συνάρτηση χρησιμότητας προκύπτει ως γραμμικός συνδυασμός των συνιστωσών της διανυσματικής στοχικής συνάρτησης. Συνεπώς, το πολυκριτηριακό πρόβλημα μετασχηματίζεται σε βαθμωτό της μορφής:

$$\min \sum_{i=1}^m w_i \cdot f_i(x) \quad (5.1)$$

όπου w_i συντελεστές βάρους που υποδηλώνουν τη σχετική σημασία των επιμέρους κριτηρίων. Κατά κανόνα θεωρείται ότι:

$$\sum_{i=1}^m w_i = 1 \quad (5.2)$$

Η βέλτιστη λύση εξαρτάται δραστικά από τις τιμές των συντελεστών βάρους ενώ ταυτόχρονα δεν υπάρχει αντικειμενικός τρόπος επιλογής τους. Ένας τρόπος προσδιορισμού των συντελεστών είναι μια ανάλυση ευαισθησίας κατά την οποία το ισοδύναμο πρόβλημα επιλύεται πολλές φορές με χρήση διαφορετικών τιμών των συντελεστών βαρών. Παρόλα αυτά, επειδή μια τέτοια μέθοδος απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό κόστος, στην παρούσα εφαρμογή εφαρμόζεται μια απλοποίηση της μεθόδου αυτής. Συγκεκριμένα, προσδιορίζονται οι τιμές των συντελεστών βάρους ανάλογα με το κριτήριο που θεωρείται πιο σημαντικό για τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας. Πρόκειται για μια μέθοδο βελτιστοποίησης η οποία εφαρμόζεται σε παρόμοιες εφαρμογές ενώ προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Όπως φαίνεται, λοιπόν, και στο διάγραμμα ροής του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, για κάθε γεωμετρία που σχεδιάζεται και ελέγχεται κάθε φορά επιλέγεται η λειτουργική κατάσταση που αποδίδει την ονομαστική ροπή σε διαφορετική τιμή ολίσθησης από αυτή της ολίσθησης ανατροπής για την ίδια τιμή ρεύματος. Αυτό συμβαίνει διότι όπως αναφέρθηκε παραπάνω αυτά τα σημεία λειτουργίας εμφανίζουν μικρότερη μαγνητική φόρτιση, μικρότερη τιμή ροής, οπότε λιγότερες απώλειες πυρήνα. Οι απώλειες χαλκού είναι σταθερές για κάθε σχεδιαζόμενη γεωμετρία και για κάθε τιμή πυκνότητας ρεύματος. Επομένως το αποτέλεσμα της επιλογής αυτής είναι η μείωση των συνολικών απωλειών του κινητήρα.

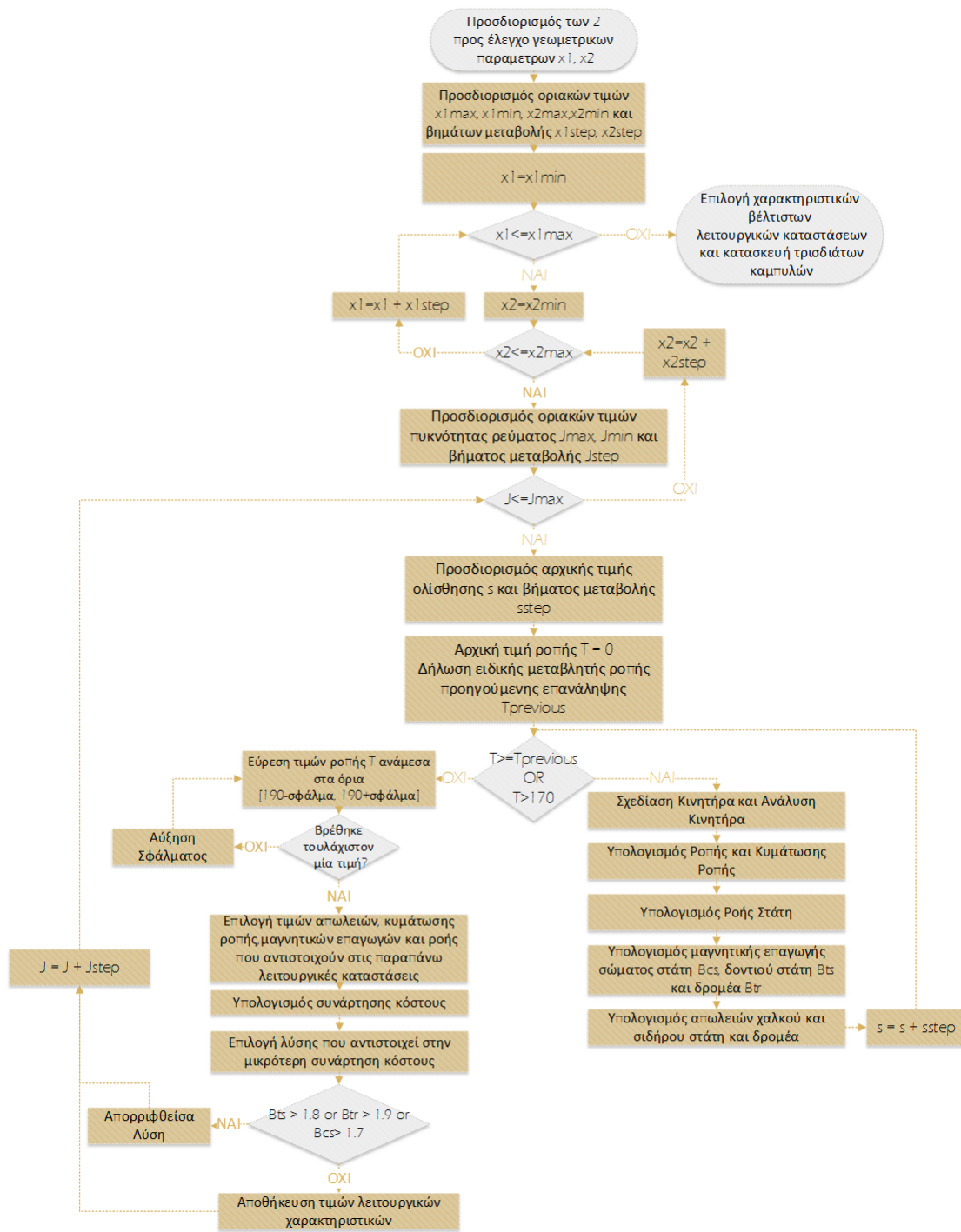
Για την επιλογή της βέλτιστης λειτουργικής κατάστασης αναπτύσσεται μια συνάρτηση κόστους προκειμένου να μετατραπεί το πολυκριτηριακό πρόβλημα σε βαθμωτό πρόβλημα. Οι όροι της συνάρτησης αυτής είναι τόσο οι συνολικές απώλειες, όσο και η κυμάτωση της ροπής πολλαπλασιασμένοι με τα κατάλληλα βάρη. Στόχος του αλγορίθμου βελτιστοποίησης είναι ελαχιστοποίηση της συνάρτησης αυτής. Αναλυτική έκφραση για τη συνάρτηση με τα αντίστοιχα βάρη για κάθε όρο φαίνεται στην ακόλουθη σχέση.

$$cost_f = 0.8 \frac{P_{total}}{P_{total_ref}} + 0.2 \frac{T_{ripple}}{T_{ripple_ref}} \quad (5.3)$$

Οι όροι P_{total} και T_{ripple} αφορούν τις συνολικές απώλειες και τη κυμάτωση της ροπής που υπολογίζεται για κάθε γεωμετρία καθώς και κάθε λειτουργική κατάσταση, ενώ οι όροι P_{total_ref} και T_{ripple_ref} , αφορούν τις συνολικές απώλειες και την κυμάτωση της ροπής της αρχικής μηχανής που σχεδιάστηκε. Οι τιμές των αντίστοιχων βαρών κάθε όρου του συνάρτησης επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε βελτιστοποίηση να βασίζεται κυρίως στη μείωση των απωλειών του κινητήρα, καθώς η κυμάτωση της ροπής αποτελεί ένα ιδιαίτερα ευμετάβλητο μέγεθος, το οποίο επηρεάζεται από την συχνότητα του πεδίου και τις αρμονικές αυτού.

Επιπλέον, κατά την ανάλυση καταγράφονται οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής τόσο στα δόντια του σάτη και του δρομέα, όσο και στο σώμα του σάτη, προκειμένου να διατηρούνται κάτω από τα επιθυμητά όρια. Στην περίπτωση που δεν πληρείται αυτό, η λύση αυτή απορρίπτεται.

Κάθε φορά η βελτιστοποίηση του κινητήρα αρχίζει με την επιλογή των δυο παραμέτρων που πρόκειται να βελτιστοποιηθούν. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας για το ύψος και το πλάτος των δοντιών του σάτη. Έπειτα, οι δύο μεταβλητές που βελτιστοποιήθηκαν μέσω ανάλυσης ευαισθησίας αφορούν το πέδιλο των δοντιών του σάτη και το ύψος αυτού. Ενώ το τελευταίο ζεύγος της ανάλυσης αποτελείται από το ύψος και το πλάτος των δοντιών του δρομέα. Οι αρχικές και τελικές τιμές των παραμέτρων, καθώς και το βήμα μεταβολής επιλέγεται με βάση κατασκευαστικούς περιορισμούς και τα ήδη υπάρχοντα αποτελέσματα της αρχικής γεωμετρίας. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα για τα τρία ζεύγη παραμέτρων που βελτιστοποιήθηκαν.

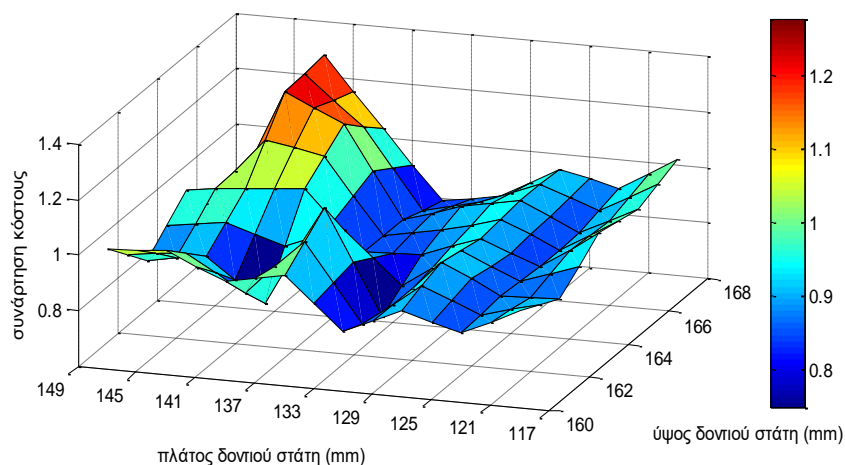


Σχήμα 5.7: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου βελτιστοποίησης

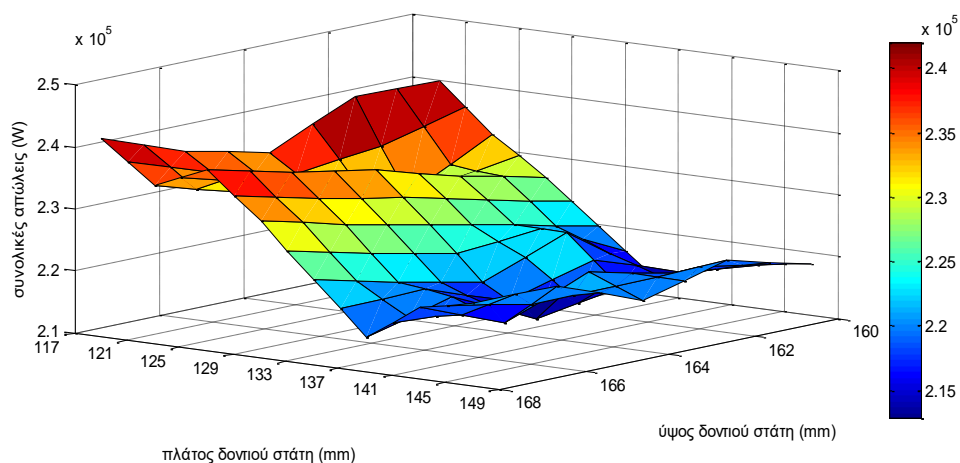
5.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΑΥΛΑΚΩΝ ΣΤΑΤΗ ΚΑΙ ΔΡΟΜΕΑ

5.3.1 Μεταβολή γεωμετρικών παραμέτρων αυλάκων στάτη

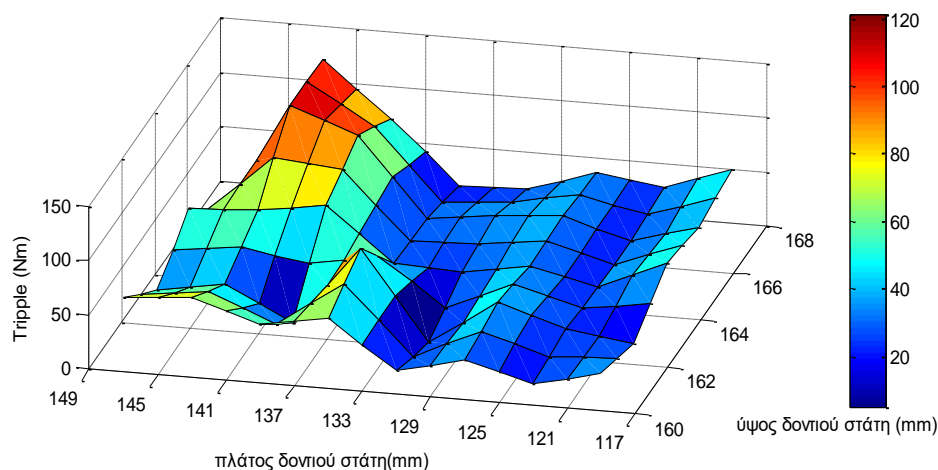
Αρχικά το πρώτο ζεύγος μεταβλητών αποτελείται από το ύψος και το πλάτος του δοντιού του στάτη. Στα διαγράμματα παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της συνάρτησης κόστους, της κυμάτωσης της ροπής και των συνολικών απωλειών συναρτήσει των δύο μεταβλητών.



Σχήμα 5.8: Συνάρτηση κόστους ως συνάρτηση του ύψους και του πλάτους του δοντιού του στάτη



Σχήμα 5.9: Συνολικές απώλειες ως συνάρτηση του ύψους και του πλάτους του δοντιού του στάτη

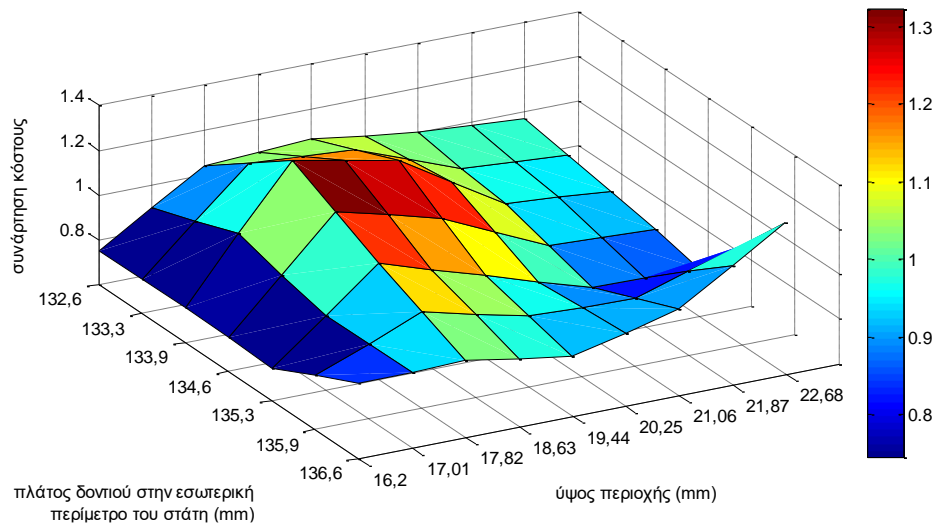


Σχήμα 5.10: T_{ripple} ως συνάρτηση του ύψους και του πλάτους του δοντιού του στάτη

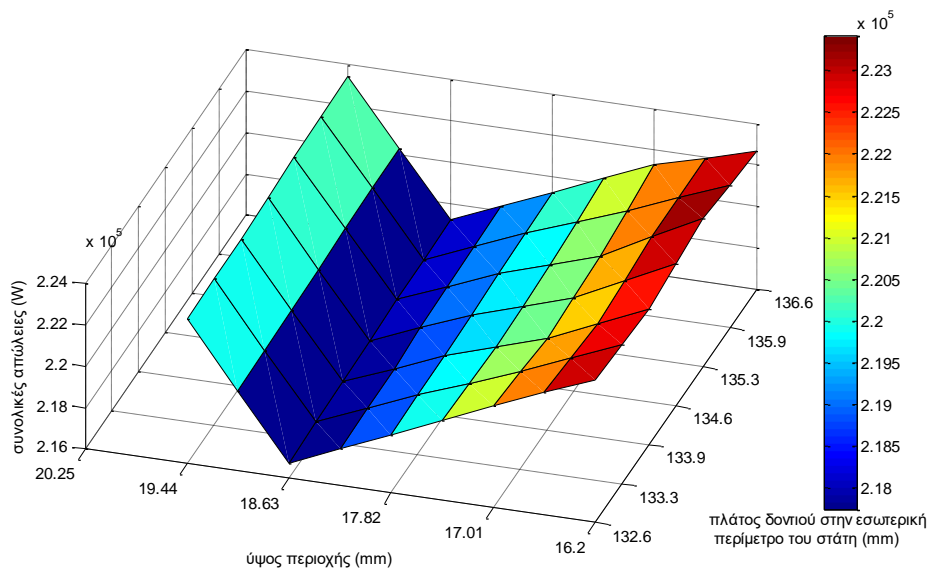
Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανές ότι η μορφή της συνάρτησης κόστους ακολουθεί αυτή της κυμάτωσης της ροπής, γεγονός που οφείλεται στο ότι η κυμάτωση της ροπής είναι ένα μέγεθος που επηρεάζεται έντονα από τη συχνότητα του πεδίου όσο και από τις αρμονικές αυτού. Σχετικά με τις συνολικές απώλειες εμφανίζονται ιδιαίτερα αυξημένες όσο μειώνεται το πλάτος των δοντιών του στάτη. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο και οφείλεται στους έντονους κορεσμούς που εμφανίζονται στα δόντια όσο μειώνεται το πλάτος τους.

Εφόσον ολοκληρώθηκε η ανάλυση για τις δύο πρώτες παραμέτρους, επιλέγεται το ζεύγος των βέλτιστων τιμών. Οι τιμές των παραμέτρων παρουσιάζονται συνολικά στον πίνακα 5.1 με την ολοκλήρωση της βελτιστοποίησης της μηχανής. Στη συνέχεια μεταβάλλεται το άνοιγμα το δοντιού στην περίμετρο του στάτη, καθώς και το ύψος της περιοχής αυτής και παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ίδιων μεγεθών με αυτών της προηγούμενης ανάλυσης.

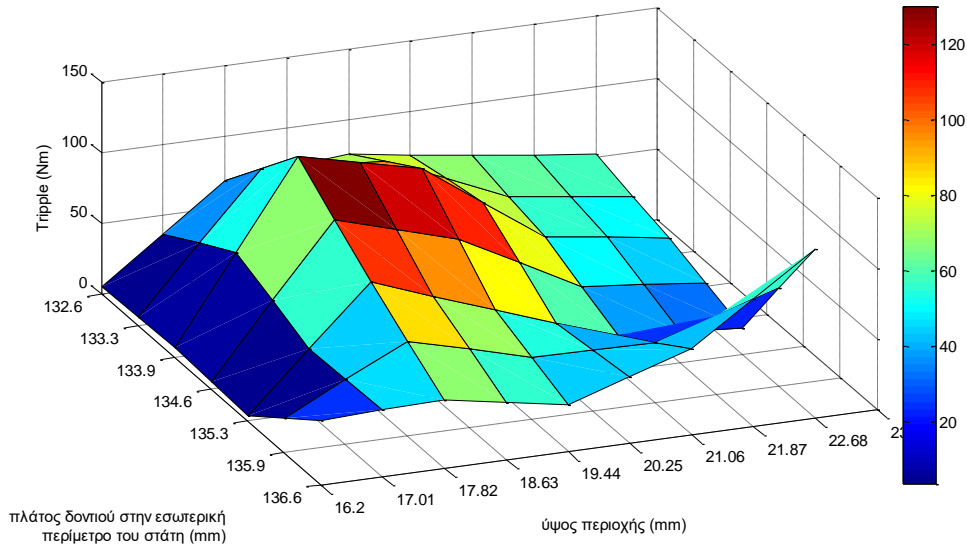
Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η μηχανή παρουσιάζει αυξημένες συνολικές απώλειες όσο μειώνεται το ύψος του πεδίου του δοντιού. Οι αυξημένες απώλειες οφείλονται στο γεγονός ότι μειώνοντας το ύψος του πεδίου του δοντιού, μειώνεται η παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η απαίτηση σε ρεύμα, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένες απώλειες χαλκού. Επιπλέον, με την μείωση του ύψους του πεδίου του δοντιού αυξάνονται τα επίπεδα κορεσμού στο άνοιγμα της αύλακας στο διάκενο, γεγονός που οδηγεί στην αύξηση των απωλειών σιδήρου.



Σχήμα 5.11: Συνάρτηση κόστους ως συνάρτηση του πλάτους και του ύψους του πεδίου των δοντιών του στάτη

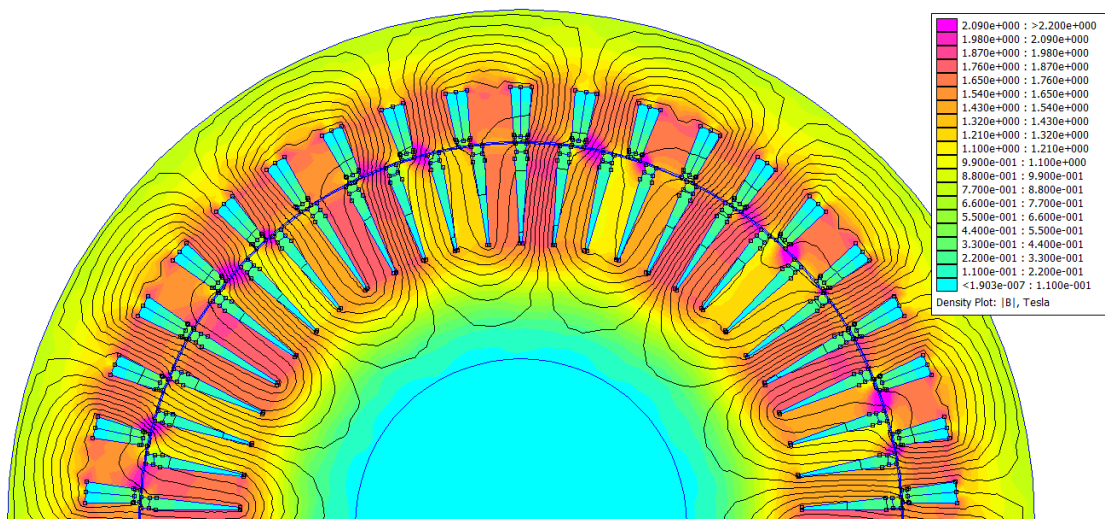


Σχήμα 5.12: Συνολικές απώλειες ως συνάρτηση του πλάτους και του ύψους του πεδίου των δοντιών του στάτη



Σχήμα 5.13: T_{ripple} ως συνάρτηση του πλάτους και του ύψους του πεδίου των δοντιών του στάτη

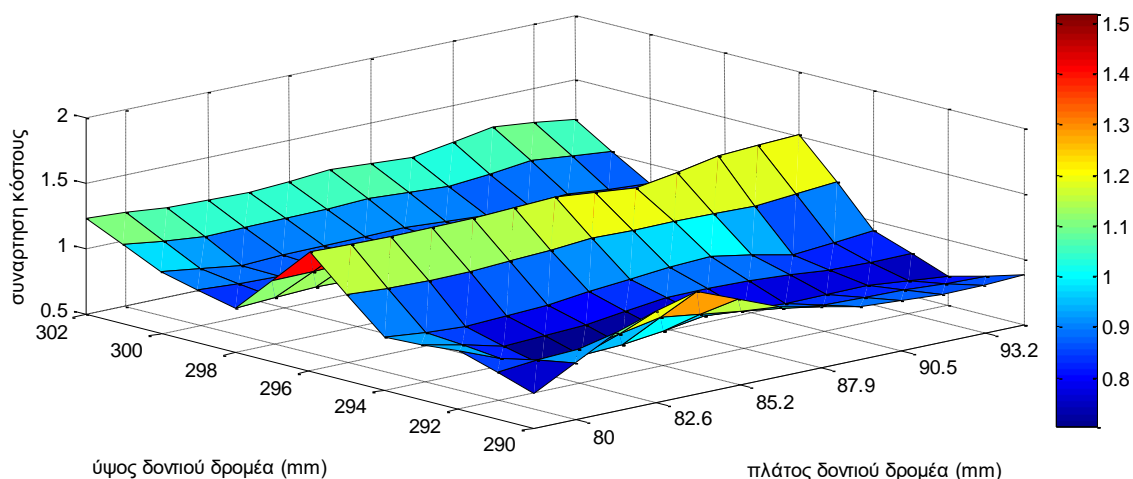
Μετά τη βελτιστοποίηση των γεωμετρικών παραμέτρων των δοντιών του στάτη προκύπτει η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής που φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Παρατηρείται ότι μετά τη βελτιστοποίηση δεν παρουσιάζονται έντονοι κορεσμοί στα δόντια του στάτη. Κάποιοι κορεσμοί παραμένουν σε κάποια δόντια του δρομέα, οπότε και ακολουθεί η βελτιστοποίηση αυτών. Η μηχανή σε αυτή τη κατάσταση λειτουργίας αποδίδει ροπή ίση με $T = 190890 \text{ Nm} = 191 \text{ kNm}$, ενώ η ανώτερη αρμονική της ηλεκτρομαγνητικής ροπής σε συχνότητα $f = 0.042 \text{ Hz}$ έχει πλάτος, $T_2 = 3.833 \text{ Nm}$. Οι συνολικές απώλειες είναι ίσες με $P_{\text{total}} = 223210 \text{ W} = 223.2 \text{ kW}$.



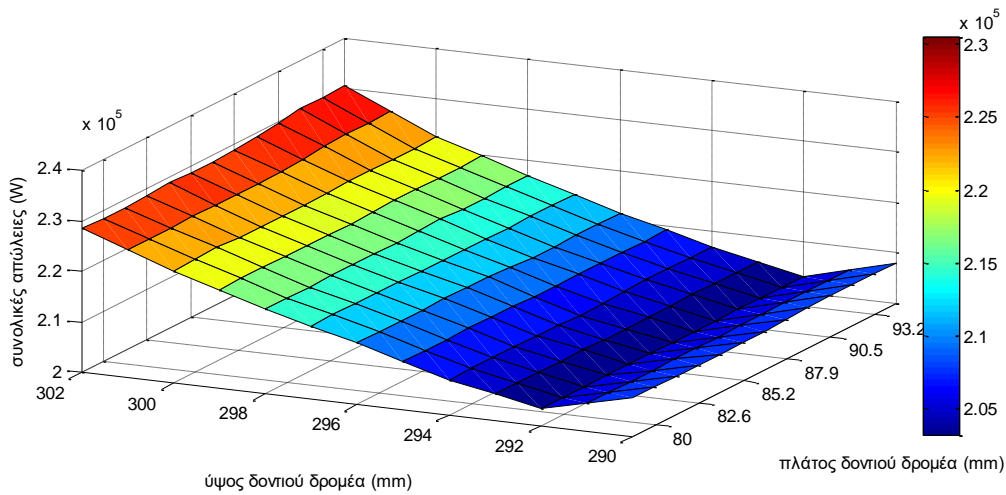
Σχήμα 5.14: Κατανομή μαγνητικής επαγωγής στη συχνότητα της ονομαστικής ροπής μετά την ανάλυση ευαισθησίας των γεωμετρικών παραμέτρων του στάτη

5.3.2 Μεταβολή γεωμετρικών παραμέτρων δοντιών δρομέα

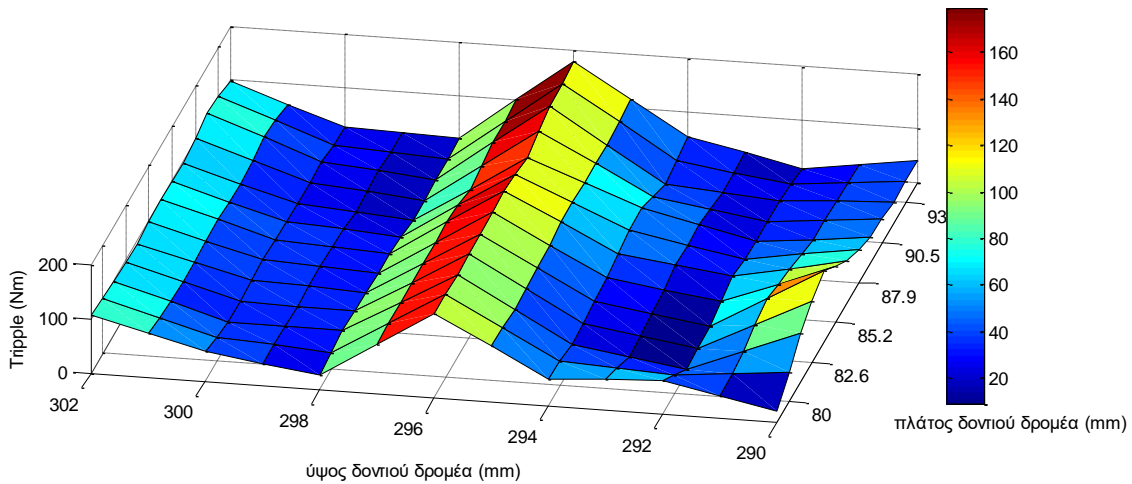
Το τελευταίο ζεύγος παραμέτρων που μεταβάλλεται αφορά τη γεωμετρία των δοντιών του δρομέα και πιο συγκεκριμένα αποτελείται από το ύψος και το πλάτος αυτών. Η βελτιστοποίηση αυτή λαμβάνει χώρα προκειμένου να γίνει καλύτερη αξιοποίηση των μπαρών του δρομέα καθώς παρατηρούνται πολύ χαμηλές ηλεκτρικές φορτίσεις σε αυτές. Τα παρακάτω διαγράμματα αφορούν και πάλι τη συνάρτηση κόστους, την κυμάτωση της ροπής καθώς και τις συνολικές απώλειες. Ιδιαίτερα για τις συνολικές απώλειες παρατηρείται σχεδόν μια γραμμικότητα στην μορφή της καμπύλης με τη μείωση του δοντιού γεγονός που οφείλεται στις σταθερές απώλειες χαλκού του στάτη εφόσον, δε μεταβάλλεται η γεωμετρία αυτών. Η μείωση του ύψους του δοντιού επιφέρει αυξημένες απώλειες χαλκού στις μπάρες του δρομέα, όμως φαίνεται να μειώνονται οι κορεσμοί στα δόντια επομένως μειώνονται και οι απώλειες του σιδήρου. Γενικά, οι συνολικές απώλειες της μηχανής επηρεάζονται σημαντικά από τις απώλειες του σιδήρου και του χαλκού του στάτη και πολύ λιγότερο από τις απώλειες χαλκού στις μπάρες του δρομέα.



Σχήμα 5.15: Συνάρτηση κόστους ως συνάρτηση του πλάτους και του ύψους των δοντιών του δρομέα



Σχήμα 5.16: Συνολικές απώλειες ως συνάρτηση του πλάτους και του ύψους των δοντιών του δρομέα

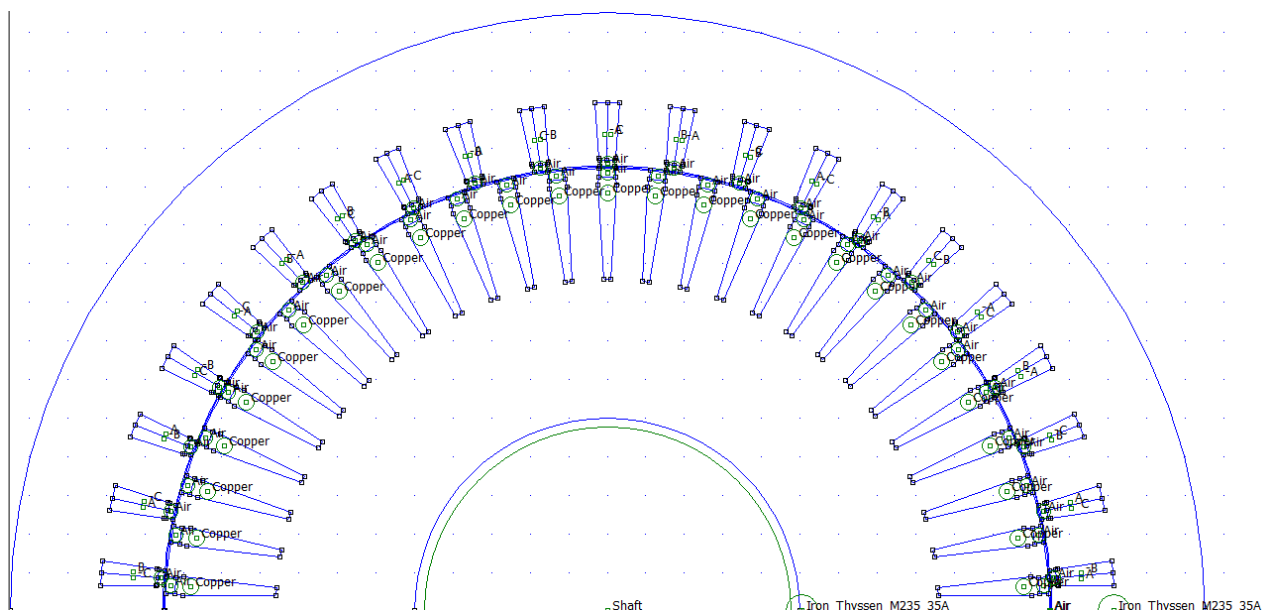


Σχήμα 5.17: T_{ripple} ως συνάρτηση του πλάτους και του ύψους των δοντιών του δρομέα

Εφόσον ολοκληρώθηκε η ανάλυση και για το τελευταίο ζεύγος των παραμέτρων είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι δεν πραγματοποιείται ανάλυση για τις κεφαλές των μπαρών του δρομέα. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι οι διαστάσεις των κεφαλών προκύπτουν ως ποσοστό του ύψους και του πλάτους των δοντιών του δρομέα. Επομένως, κατά την ανάλυση του τελευταίου ζεύγος, οι διαστάσεις των κεφαλών δεν παραμένουν σταθερές, αντιθέτως μεταβάλλονται συναρτήσει των κυρίων διαστάσεων των μπαρών.

5.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Με βάση τη βελτιστοποίηση που πραγματοποιήθηκε παρακάτω παρουσιάζεται η οριστική γεωμετρία που επιλέχθηκε καθώς και τα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης της. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι έχουν δημιουργηθεί δόντια μειωμένου μήκους και αυξημένου πλάτους τόσο στο δρομέα όσο και στον στάτη. Ενώ το άνοιγμα του δοντιού στην περιμετρο του στάτη και το ύψος της περιοχής αυτής έχει μεταβληθεί ελάχιστα. Επίσης, έχει αυξηθεί και η διάμετρος του άξονα της μηχανής σε σχέση με την προκαταρκτική σχεδίαση. Η αύξηση αυτή πραγματοποιήθηκε χωρίς διερεύνηση, καθώς ο σίδηρος του δρομέα παρέμενε αφόρτιστος κοντά στον άξονα.



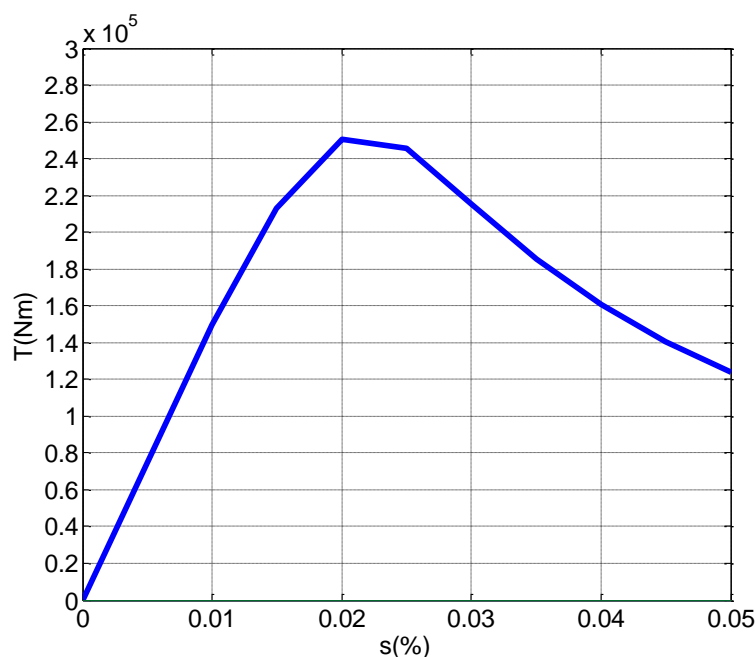
Σχήμα 5.18: Γεωμετρία ηλεκτρικής μηχανής ως αποτέλεσμα της ανάλυσης ευαισθησίας των γεωμετρικών παραμέτρων

Μέγεθος	Αρχική γεωμετρία	Τελική γεωμετρία
Ύψος δοντιού στάτη	$h=0.17\text{m}$	$h=0.162\text{m}$
Πάχος δοντιού στάτη	$b=0.148\text{m}$	$b=0.131\text{m}$
Πάχος πεδύλου δοντιού στάτη	$b_{\text{tooth}}=0.149\text{m}$	$b_{\text{tooth}}=0.135\text{m}$
Ύψος πεδύλου δοντιού στάτη	$h_{\text{tooth}}=0.017\text{m}$	$h_{\text{tooth}}=0.0162\text{m}$
Ύψος δοντιού δρομέα	$h_r=0.3\text{m}$	$h_r=0.288\text{m}$
Πάχος δοντιού δρομέα	$b=0.092\text{m}$	$b=0.081\text{m}$
Ακτίνα άξονα	$R_{\text{shaft}}=0.3\text{m}$	$R_{\text{shaft}}=0.5\text{m}$

Πίνακας 5.1 : Μεταβολή των γεωμετρικών παραμέτρων μετά την ανάλυση ευαισθησίας

5.4.1 Επίδοση και απόδοση τελικής γεωμετρίας

Στη συνέχεια, στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η καμπύλη ροπής – ολίσθησης για την βελτιστοποιημένη μηχανή. Η μηχανή αποδίδει την ονομαστική ροπή $T = 188051 \text{ Nm} = 188,1 \text{ kNm}$ για ολίσθηση $s = 0.035 \%$ και ονομαστική πυκνότητα ρεύματος $J = 5 \text{ A/mm}^2$ ενώ η ροπή της ανώτερης αρμονικής έχει πλάτος, $T_2 = 8.9533 \text{ Nm}$. Οι συνολικές απώλειες είναι ίσες με $P_{total} = 203380 \text{ W} = 203.4 \text{ kW}$.

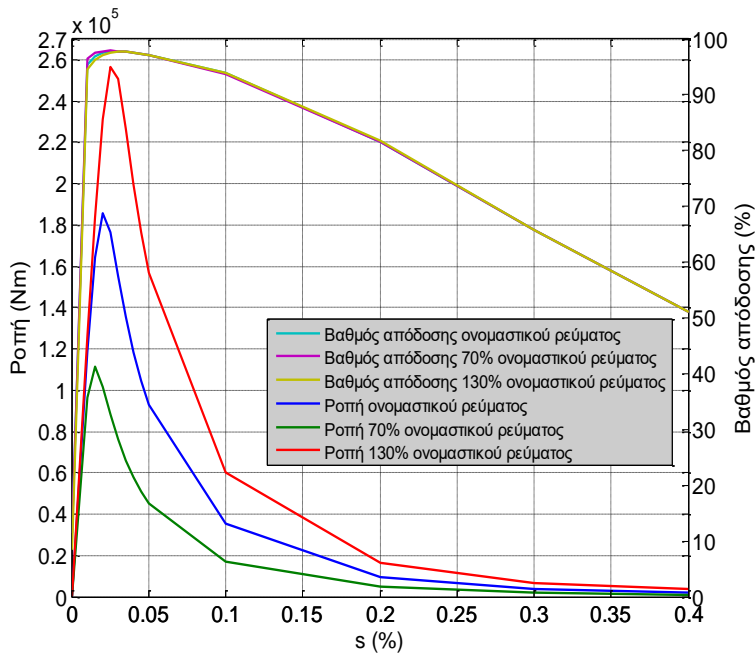


Σχήμα 5.19: Χαρακτηριστική ροπής – ολίσθησης τελικής γεωμετρίας

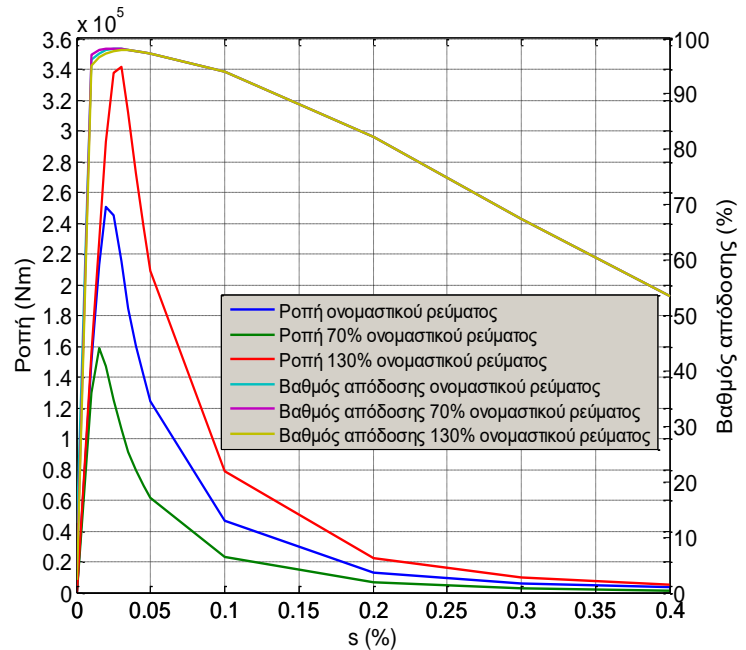
Στη συνέχεια στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά η αποδιδόμενη ροπή και ο βαθμός απόδοσης τόσο για την αρχική γεωμετρία όσο και για την τελική για την περίπτωση ονομαστικής πυκνότητας ρεύματος, 70% ονομαστικής πυκνότητας ρεύματος δηλαδή προσομοίωσης της εκκίνησης όπου υπάρχουν χαμηλές φορτίσεις και 130% ονομαστικής πυκνότητας ρεύματος, δηλαδή προσομοίωσης καταστάσεων μεγάλων ελιγμών.

Κάνοντας σύγκριση, των διαγραμμάτων συμπεραίνεται ότι ο κινητήρας έπειτα από την διαδικασία της βελτιστοποίησης έχει τη δυνατότητα να αποδώσει ροπή 30% μεγαλύτερη σε σχέση με την ονομαστική. Επίσης, ο βαθμός απόδοσης της τελικής γεωμετρίας είναι αυξημένος σε σχέση με αυτόν της αρχικής γεωμετρίας για κάθε σημείο λειτουργίας του κινητήρα για την ονομαστική πυκνότητα ρεύματος. Επιπλέον, τόσο για την αρχική γεωμετρία όσο και για την τελική γεωμετρία παρατηρείται μια μείωση και μια αύξηση της τάξης περίπου του 0.5% τόσο για την περίπτωση της υπερφόρτισης όσο και την περίπτωση της υποφόρτισης αντίστοιχα, η οποία δεν γίνεται ιδιαίτερα εμφανής στα αντίστοιχα διαγράμματα. Το αποτέλεσμα αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι η αποδιδόμενη ροπή της μηχανής αυξάνεται γραμμικά με το ρεύμα τροφοδοσίας, ενώ οι απώλειες χαλκού αυξάνονται με το τετράγωνο του ρεύματος. Για μεγαλύτερες μεταβολές της φόρτισης, οι μεταβολές και του

βαθμού απόδοσης θα ήταν πιο εμφανείς, παρόλα αυτά οι μεταβολές αυτές δεν αντιπροσωπεύουν κάποιες πραγματικές καταστάσεις, οπότε και δεν προσομοιώθηκαν.



Σχήμα 5.20: Χαρακτηριστική ροπής – ολίσθησης και βαθμού απόδοσης - ολίσθησης αρχικής γεωμετρίας για διάφορες φορτίσεις



Σχήμα 5.21: Χαρακτηριστική ροπής – ολίσθησης και βαθμού απόδοσης - ολίσθησης τελικής γεωμετρίας για διάφορες φορτίσεις

5.4.1.1 Απώλειες και απόδοση οριστικής σχεδίασης

Στην ολίσθηση της ονομαστικής ροπής της μηχανής υπολογίζονται οι απώλειες, μέσω των μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο.

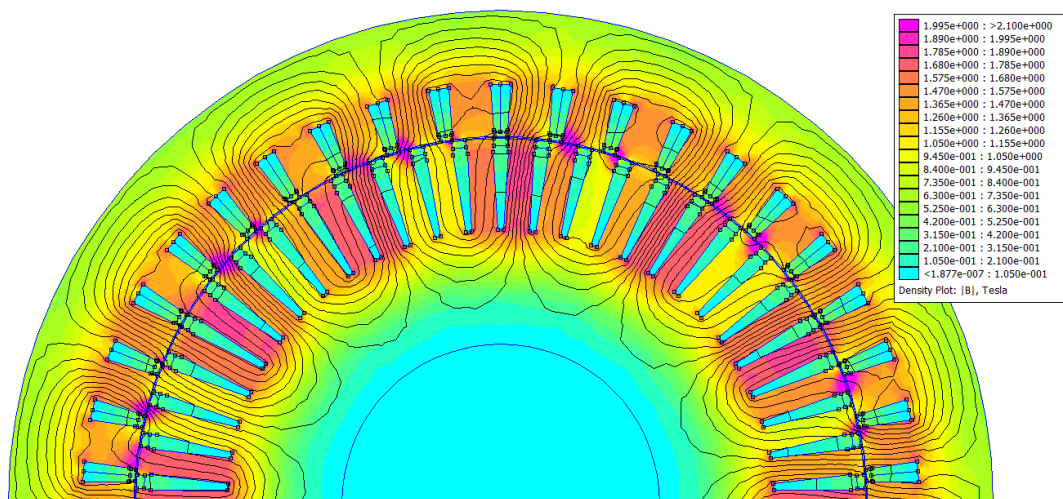
- Απώλειες χαλκού στάτη : $P_{cu_stator} = 141050 \text{ W} = 141.1 \text{ kW}$
 - Απώλειες χαλκού δρομέα : $P_{cu_rotor} = 3852 \text{ W} = 4 \text{ kW}$
 - Απώλειες σιδήρου: $P_{Fe} = 58480 \text{ W} = 58.5 \text{ kW}$
- Οι συνολικές απώλειες είναι ίσες με $P_{total} = 203380 \text{ W} = 203.4 \text{ kW}$

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει μια μηχανή με ιδιαίτερα χαμηλές απώλειες χαλκού συγκριτικά με τις απώλειες του σιδήρου. Το αποτέλεσμα αυτό ενώ φαίνεται να αντιτίθεται στη γενική θεωρία ότι οι συνολικές απώλειες πρέπει να ισοκατανέμονται στις απώλειες του χαλκού και του σιδήρου, [14] δικαιολογείται από το γεγονός ότι δεν έχουν υπολογιστεί τόσο οι μηχανικές απώλειες (τριβών και ανεμισμού) όσο και οι διαφεύγουσες απώλειες.

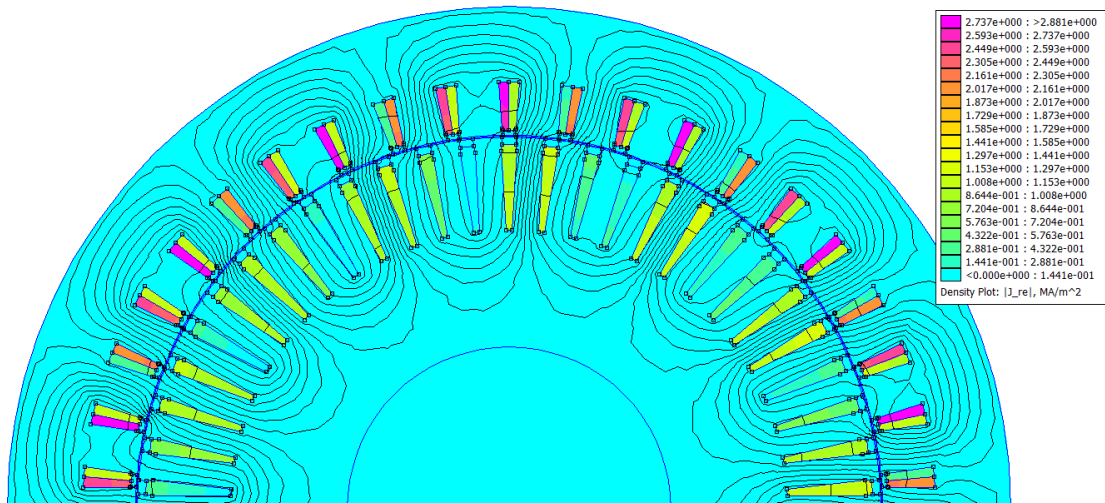
Έτσι, αμελώντας τις δευτερεύουσες απώλειες προκύπτει ο βαθμός απόδοσης της μηχανής ίσος με:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{T \cdot \omega}{T \cdot \omega + P_{cu_stator} + P_{cu_rotor} + P_{Fe}} = 0.981 \Rightarrow \eta = 98.1 \%$$

Στη συνέχεια, μέσω της αρμονικής ανάλυσης προκύπτει τόσο η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής όσο και της πυκνότητας ρεύματος του κινητήρα για την ολίσθηση ονομαστικής ροπής φαίνονται στα σχήματα 5.22 και 5.23 αντίστοιχα. Το μαγνητικό πεδίο της τελικής γεωμετρίας παρουσιάζει κάποιους τοπικούς κορεσμούς σε κάποια από τα δόντια του δρομέα, ενώ οι μαγνητικές φορτίσεις στα δόντια του στάτη είναι εμφανώς μειωμένες σε σύγκριση τόσο με αυτές της αρχικής γεωμετρίας όσο και με αυτές των επιθυμητών ορίων. Επιπλέον, παρατηρείται ότι στο σώμα του στάτη οι φορτίσεις είναι αρκετά πιο χαμηλές από τα επιθυμητά όρια. Επομένως, μια πρόταση θα ήταν η μείωση της εξωτερικής ακτίνας προκειμένου να μειωθεί η μάζα και ο όγκος της μηχανής.



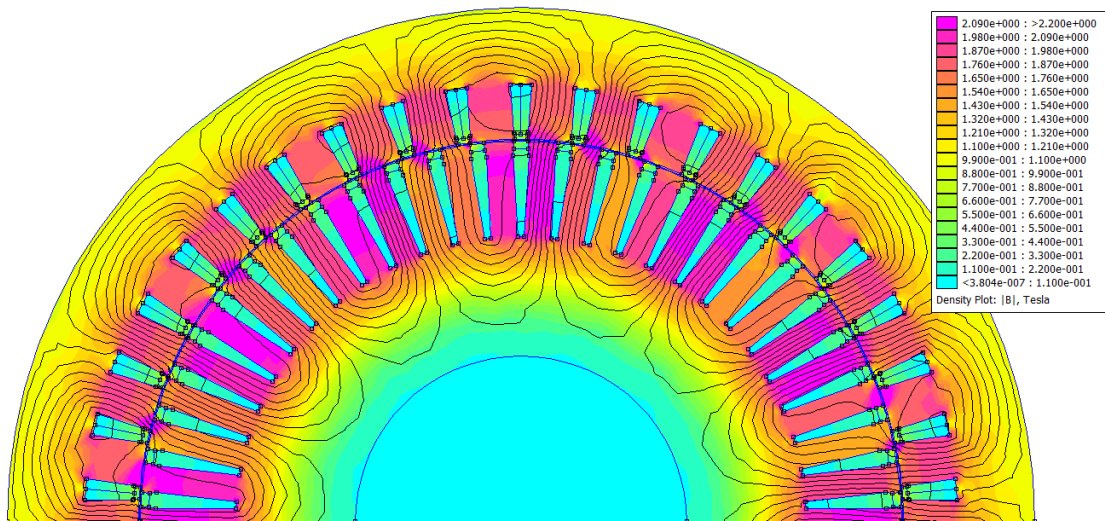
Σχήμα 5.22: Μαγνητική επαγωγή τελικής γεωμετρίας στη συχνότητα ονομαστικής ροπής



Σχήμα 5.23 : Πυκνότητα ρεύματος τελικής γεωμετρίας στη συχνότητα ονομαστικής ροπής

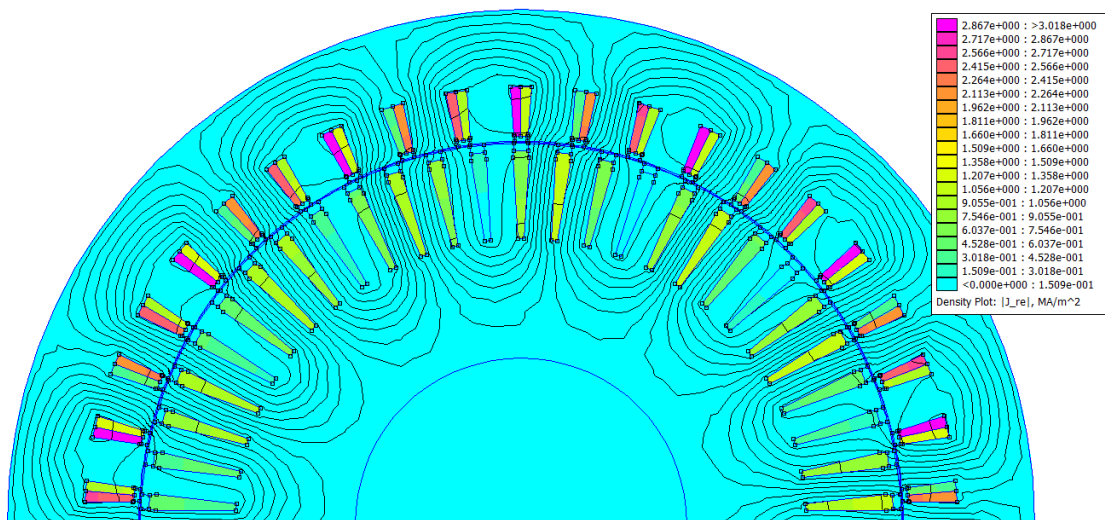
Η μηχανή όπως φαίνεται από τη χαρακτηριστική ροπής ολίσθησης, μετά τη βελτιστοποίηση μπορεί να αποδώσει ροπή 30% μεγαλύτερη από την ονομαστική. Παρακάτω στα σχήματα

5.24 και 5.25 αντίστοιχα φαίνεται η κατανομή της μαγνητικής επαγωγής όσο και της πυκνότητας ρεύματος του κινητήρα για την ολίσθηση μέγιστης ροπής.



Σχήμα 5.24 : Κατανομή μαγνητικής επαγωγής τελικής γεωμετρίας στην ολίσθηση μέγιστης ροπής-ανατροπής.

Η μηχανή στη συχνότητα μέγιστης ροπής παρουσιάζει κάποιους κορεσμούς στα δόντια τόσο του στάτη όσο και του δρομέα, οι οποίοι ξεπερνούν τα όρια. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη απαίτηση ροπής δύναται να απαιτηθεί για μικρή χρονική περίοδο, κυρίως στην περίπτωση απότομης μεταβολής του υδροδυναμικού φορτίου κατά μια απότομη αλλαγή κλίσης του πλοίου ή μια στιγμιαία επιτάχυνση .

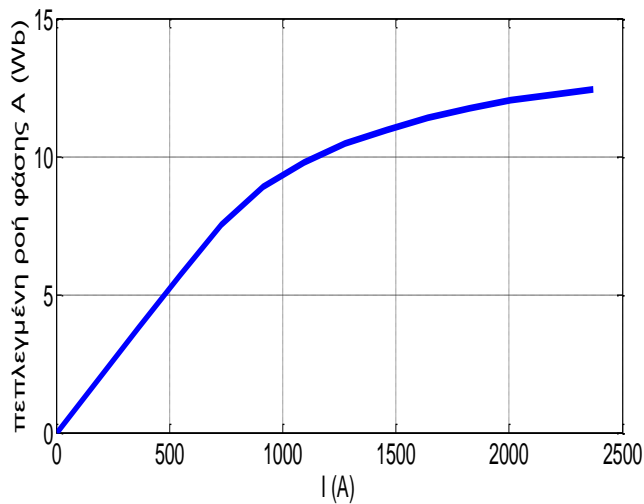


Σχήμα 5.25 : Πυκνότητα ρεύματος τελικής γεωμετρίας στην ολίσθηση μέγιστης ροπής-ανατροπής.

5.4.2 Υπολογισμός ισοδύναμου κυκλώματος

5.4.2.1 Δοκιμή κενού φορτίου

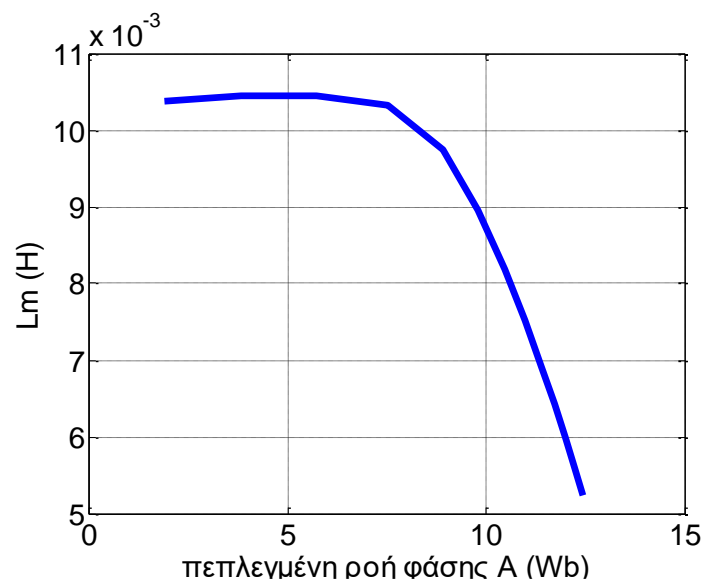
Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που έχει ήδη αναπτυχθεί στην 3.5.1 για τον προσδιορισμό της μη γραμμικής αντίδρασης μαγνήτισης, L_M , πραγματοποιείται η προσομοίωση από την οποία προκύπτει το ακόλουθο γράφημα.



Σχήμα 5.26: Πεπλεγμένη ροή σε συνάρτηση με το ρεύμα της φάσης A

Στο διάγραμμα είναι φανερός ο κορεσμός του μαγνητικού της μηχανής που ξεκινά μετά από γραμμικό τμήμα της καμπύλης.

Σύμφωνα με τη σχέση 3.51 της παραγράφου 3.5.1 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 5.27.



Σχήμα 5.27: Αντίδραση μαγνήτισης L_M ως συνάρτηση της πεπλεγμένης ροής

Η σταθερή τιμή της αντίδρασης μαγνήτισης που αντιστοιχεί στο γραμμικό τμήμα της καμπύλης του σχήματος 5.27 είναι $L_M = 0.0105 H$.

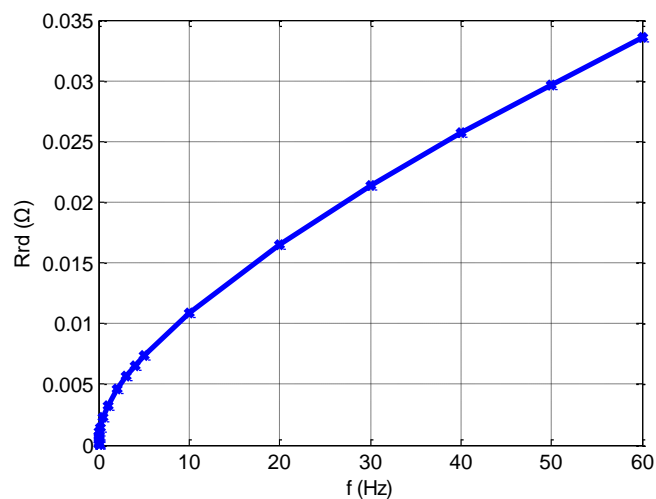
Για να είναι τα αποτελέσματα χρήσιμα γίνεται η θεώρηση ότι η εξάρτηση της L_M από τον κορεσμό είναι ίδια τόσο στην περίπτωση κενού φορτίου όσο και στη λειτουργία υπό φορτίο, δηλαδή:

$$L_M(\Lambda_{s0}) = L_M(\Lambda_s) \quad (5.4)$$

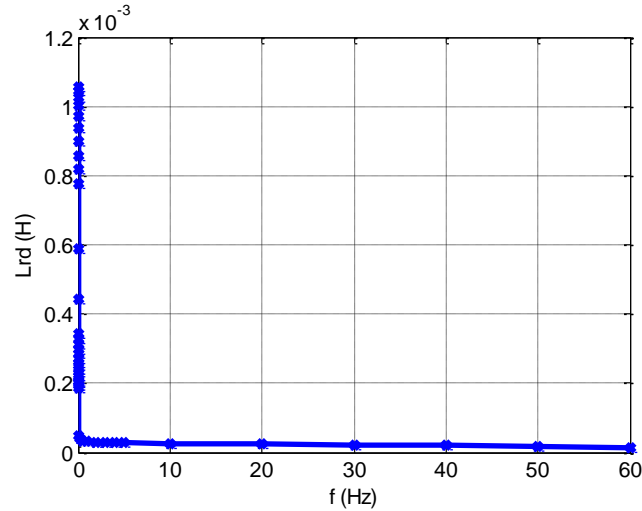
5.4.2.2 Δοκιμή ακινητοποιημένου δρομέα

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία που έχει ήδη αναπτυχθεί στην 3.5.2, αφού προσδιοριστούν οι τιμές των R_{eq} και L_{eq} με προσομοίωση για διάφορες τιμές της συχνότητας, πρέπει να υπολογιστούν στη συνέχεια τα $R_{r,2D}$ και $L_{r,2D}$. Αυτό γίνεται με λύση του συστήματος μη γραμμικών εξισώσεων που προκύπτει.

Στα σχήματα 5.28 και 5.29 φαίνονται οι συναρτήσεις $R_{r,2D}(f_r)$ και $L_{r,2D}(f_r)$ αντίστοιχα.



Σχήμα 5.28: Μεταβολή της αντίστασης $R_{r,2D}$ με τη συχνότητα του δρομέα



Σχήμα 5.29: Μεταβολή της αντίδρασης $L_{r,2D}$ με τη συχνότητα του δρομέα

5.4.2.3 Υπολογισμός παραμέτρων 3D φαινομένων

Όπως έχει ήδη αναλυθεί στην παράγραφο 3.5.3 του προηγούμενου κεφαλαίου, οι όροι που υπολείπονται για τον ολοκληρωτικό υπολογισμό του ισοδύναμου κυκλώματος είναι αυτοί που οφείλονται στα 3D φαινόμενα.

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

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

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

όπου λ_{ew} είναι ο ειδικός συντελεστής επιδεκτικότητας (οι τιμές του κυμαίνονται από 0.35 έως 0.55 ανάλογα με τον τύπο του τυλιγματος), $N=2N_s$ είναι το πλήθος των αγωγών ανά φάση και το ενεργό μήκος των συνδέσεων του L_{ew} υπολογίζεται όπως και στις απώλειες χαλκού. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή το ενεργό μήκος των συνδέσεων έχει υπολογιστεί ίσο με $L_{ew} = 3.128 \text{ m}$. Επομένως, γνωρίζοντας τις τιμές όλων των μεγεθών προκύπτει: $L_{\sigma_s,ew} = 0.000409 \text{ H}$.

Τελευταία υπολογίζεται η αντίσταση των δακτυλίων βραχυκύκλωσης του δρομέα μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$R_{r,3D} = \rho \frac{3 \cdot (k_w \cdot N)^2}{2 \cdot \pi \cdot p^2 \cdot S_{ring}} = 0.0045 \Omega \quad (5.6)$$

όπου S_{ring} το εμβαδό του δακτυλίου κάθε αύλακας και ρ η ειδική αντίσταση χαλκού για του 90°C που έχει αναφερθεί και παραπάνω.

Τέλος, η ανά φάση ωμική αντίσταση του τυλίγματος του στάτη έχει ήδη υπολογιστεί στον υπολογισμό των απωλειών χαλκού του στάτη και είναι ίση με $R_{phase} = 0.0117 \Omega$. Παρατηρείται μια μείωση στην αντίσταση, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι το μέγεθος είναι αντιστρόφως ανάλογο με το εμβαδό της αύλακας που έχει αυξηθεί.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος τόσο για την αρχική γεωμετρία του κινητήρα όσο και για την τελική που προέκυψε έπειτα από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης.

	Αρχική γεωμετρία	Τελική γεωμετρία
Αντίσταση στάτη	$R_s=0.0157 \Omega$	$R_s=0.0117 \Omega$
Ονομαστική αντίσταση δρομέα	$R_r=0.0007 \Omega$	$R_r=0.0008 \Omega$
Αυτεπαγωγή μαγνήτισης	$L_m=0.0125 \text{ H}$	$L_m=0.0105 \text{ H}$
Ονομαστική αυτεπαγωγή σκέδασης	$L_\sigma=0.0007 \text{ H}$	$L_\sigma=0.00022 \text{ H}$

Πίνακας 5.2 : Παράμετροι ισοδύναμου κυκλώματος για ονομαστική λειτουργία αρχικής και τελικής γεωμετρίας

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε αρχικά η προκαταρκτική σχεδίαση ενός κινητήρα επαγωγής υψηλής ισχύος ακολουθώντας τις κλασσικές τεχνικές σχεδίασης με σκοπό να ικανοποιεί τις προδιαγραφές για εφαρμογή σε ηλεκτροπρόωση πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου. Συγκεκριμένα, πρόκειται για έναν ασύγχρονο κινητήρα δρομέα κλωβού ονομαστικής ισχύος 10 MW, κατασκευαστικής κλάσης A. Η συγκεκριμένη κλάση επιλέχθηκε λόγω του γεγονότος ότι ο υπό μελέτη κινητήρας οδηγείται από αντιστροφή, επομένως είναι μεταβλητών στροφών. Με βάση τις κύριες διαστάσεις προέκυψε η αρχική σχεδίαση μέσω αριθμητικής ανάλυσης των εξισώσεων του μαγνητικού πεδίου με χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων.

Κατά την προκαταρκτική σχεδίαση, επιχειρήθηκε η σύγκριση διανεμημένου τυλίγματος μονής στρώσης καθώς και διπλής στρώσης κλασματικού βήματος 5/6. Υπολογίστηκε και για τις δύο τοπολογίες η παραγόμενη ροπή της θεμελιώδους συνιστώσας, καθώς και η διακύμανση ροπής από ανώτερης τάξης αρμονικές συνιστώσες και η αντίστοιχη κατανομή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο της μηχανής.

Για την τοπολογία του τυλίγματος διπλής στρώσης κλασματικού βήματος 5/6 που επιλέχθηκε, αναπτύχθηκε κατάλληλη διαδικασία κατασκευής ενός ισοδύναμου κυκλώματος με μεταβλητές παραμέτρους. Αυτό έχει ως στόχο, την εύκολη εισαγωγή της σχεδιασμένης μηχανής σε δυναμικό μοντέλο ελέγχου. Οι παράμετροι υπολογίστηκαν από μια σειρά αριθμητικών δοκιμών που προσομοιώθηκαν με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της μηχανής βάσει κριτηρίων ελαχιστοποίησης των απωλειών, μεγιστοποίησης επομένως της απόδοσης της για ονομαστική λειτουργία του κινητήρα. Η βελτιστοποίηση αυτή επιτυγχάνεται μέσω ισοζυγίου μεταξύ ηλεκτρικής και μαγνητικής φόρτισης της μηχανής. Η τεχνική βελτιστοποίησης προκύπτει μέσω ανάλυσης ευαισθησίας των βασικών γεωμετρικών παραμέτρων της μηχανής με σκοπό την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους που εμπλέκει τόσο τις συνολικές απώλειες όσο και τη διακύμανση της ροπής με τα κατάλληλα βάρη, σε ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας.

Έχοντας προσδιορίσει την τελική γεωμετρία του κινητήρα υπολογίστηκε τόσο η επίδοση όσο και η απόδοσή του. Τέλος, κατασκευάστηκε και πάλι το ισοδύναμο κύκλωμα με μεταβλητές παραμέτρους της τοπολογίας αυτής προκειμένου να είναι δυνατή η εισαγωγή της σχεδιασμένης μηχανής στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας του ως προς μελέτη πλοίου καθώς επίσης και σε δυναμικό μοντέλο ελέγχου.

6.2 ΚΥΡΙΟΤΕΡΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν τόσο από την αρχική σχεδίαση του εν λόγω κινητήρα όσο και από την οριστική βελτιστοποίησή του είναι τα ακόλουθα:

- Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή προτείνεται η χρήση διανεμημένου τυλίγματος διπλής στρώσης και κλασματικού βήματος 5/6 καθώς επιτυγχάνεται χαμηλότερο αρμονικό περιεχόμενο στη ΜΕΔ του διακένου, καθώς επίσης χαμηλότερες αρμονικές ταλαντώσεις ροπής λόγω αρμονικών συχνοτήτων.
- Κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης παρατηρήθηκε ότι τόσο το ύψος όσο και το πλάτος των δοντιών του στάτη και του δρομέα επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση του κινητήρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η επιλογή των κατάλληλων γεωμετρικών διαστάσεων περιορίζουν σημαντικά τις τοπικές μαγνητικές φορτίσεις στα δόντια της μηχανής, επομένως μειώνονται σημαντικά οι συνολικές απώλειες σιδήρου της μηχανής. Από την άλλη πλευρά, το πλάτος του δοντιού και το ύψος αυτού δεν επηρεάζει καθοριστικά, επειδή πρόκειται για μια πολυπολική μηχανή η οποία δεν προσφέρει ιδιαίτερα περιθώρια μεταβολής των δύο αυτών παραμέτρων, καθώς τα αυλάκια στάτη και δρομέα είναι πολυάριθμα και πρέπει να έχουν ικανοποιητικό άνοιγμα που να προσφέρει τη δυνατότητα διοχέτευσης της μαγνητικής ροής στο διάκενο.
- Ο κινητήρας σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό παρουσιάζει βαθμό απόδοσης για ονομαστική λειτουργία, ίσο με 97.6 % ενώ μετά από τη βελτιστοποίηση γεωμετρίας ο βαθμός απόδοσης αυξήθηκε σε 98.1 %.
- Η προτεινόμενη μεθοδολογία βελτιστοποίησης χρησιμοποιεί σύνθετη συνάρτηση κόστους για την ελαχιστοποίηση των συνολικών απωλειών και της κυμάτωσης της ροπής του κινητήρα μέσω κατάλληλων βαρών, σε ονομαστική λειτουργική κατάσταση της μηχανής.

6.3 ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΠΡΟΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ

Στην παρούσα εργασία προτείνεται μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία σχεδίασης και ανάλυσης κινητήρα επαγωγής υψηλής ισχύος για εφαρμογές ηλεκτροπρώσης πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG). Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της βελτιστοποίησης του κινητήρα είναι ταυτόχρονη η μείωση των απωλειών του και της διακύμανσης της ροπής.

Τα κυριότερα καινοτόμα σημεία της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι τα εξής:

- Η ανάπτυξη παραμετροποιημένης σχεδίασης του κινητήρα με τη βοήθεια του λογισμικού FEMM και της βιβλιοθήκης εντολών OctaveFEMM για το λογισμικό MATLAB. Μέσω της παραμετροποιημένης σχεδίασης, μειώνονται οι ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης, καθώς αξιοποιούνται κατάλληλες εξαρτήσεις μεταξύ ορισμένων γεωμετρικών μεταβλητών.
- Η υιοθέτηση της τεχνικής ανάλυσης ευαισθησίας γεωμετρικών και λειτουργικών παραμέτρων του κινητήρα με σκοπό τη βελτιστοποίηση των συνολικών απωλειών και την αύξηση της αξιοπιστίας του. Κατά τη διαδικασία αυτή επιχειρείται η μεγιστοποίηση της απόδοσης του κινητήρα μέσω κατάλληλης σύνθετης συνάρτησης κόστους που εμπλέκει και τη μείωση της κυμάτωσης της ροπής.

- Τέλος, ο προσδιορισμός των παραμέτρων ισοδυναμού κυκλώματος με μεταβλητές παραμέτρους προκειμένου να είναι εφικτή η απλή εισαγωγή της σχεδιασμένης μηχανής τόσο σε μοντέλο ανάλυσης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου, όσο και σε μοντέλο δυναμικού ελέγχου αυτής.

6.4 ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής αναδείχθηκαν ορισμένα σημεία που χρειάζονται περαιτέρω διερεύνηση. Προτείνεται λοιπόν, μελλοντική εργασία στα παρακάτω θέματα:

- Πειραματική επιβεβαίωση των λειτουργικών χαρακτηριστικών του κινητήρα που σχεδιάστηκε.
- Επέκταση της μεθοδολογίας βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε εστιάζοντας σε τεχνικές αναζήτησης ολικού βέλτιστου.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Χατζηλάου Ι. Κ., Γαλάνης Γ., Περτζινίδης Ν., "Συστήματα ηλεκτροπρόωσης υποβρυχίων του Π.Ν.", Διήμερο ΤΕΕ: "ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΑ ΜΕΣΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ - ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ", 12 - 13 Ιανουαρίου 2006.
- [2] Χατζηλάου Ι. Κ., Προυσαλίδης Ι. Μ., Γυπάρης Ι. Κ., Βαλλιανάτος Π., Εξελίξεις στην ηλεκτροπρόωση πλοίων και ανασκόπηση ζητημάτων σχεδιασμού στο πλήρως εξηλεκτρισμένο πλοίο.
- [3] Χατζηλάου Ι. Κ., Γυπάρης Ι. Κ., Ηλεκτροπρόωση Πολεμικών Πλοίων, Πειραιάς: Μονογραφία ΣΝΔ, 2001.
- [4] A. K. Adnanes, Maritime Electrical Installations and Diesel Electric Propulsion, ABB AS MArine, 2003.
- [5] J. S. Thongam, M. Tarbouchi, «Trends in Naval ship Propulsion drive motor technology,» Electrical Power & Energy Conference, IEEE, 2003.
- [6] M. R. Patel, Shipboard Propulsion, Power Electronics and Ocean Energy, Taylor & Francis Group, 2012.
- [7] Σ. Ιωάννης, Διπλωματική Εργασία : "Τεχνο-οικονομική μελέτη σε πλοία μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου με σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσομένου ρεύματος", Αθήνα: Ε. Μ. Π., 2015.
- [8] ABB, Product note : High voltage modular induction motors for the marine industry - Motor type AMI 1000, ABB, 2014.
- [9] «LNG Electric Ships, up to 30% more efficient,» 30 April 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://fuel-efficient-vehicles.org/energy-news/?p=1219>.
- [10] «GE to supply power systems for China's first electric LNG carriers,» 15 July 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.ship-technology.com/news/newsge-to-supply-power-and-propulsion-systems-for-six-lng-carriers-in-china>.
- [11] s. balu, «www.brighthubengineering.com,» [Ηλεκτρονικό]. Available: http://www.brighthubengineering.com/marine-engines-machinery/121954-modern-electrical-propulsion-system-for-lng-tankers/#imgn_1.
- [12] Wartsila Engines, Product guide, «[wartsila.com](http://www.wartsila.com),» June 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://cdn.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/df-engine/wartsila-o-e-w-50df-pg.pdf?sfvrsn=5>.
- [13] Jan Fredrik Hansen and Rune Lysebo, ABB AS Marine group, «Electric propulsion for LNG Carriers,» *LNGjournal*, pp. 11-12, September/October 2004.
- [14] Ι. Α. Τεγόπουλος, Ηλεκτρικές Μηχανές Μέρος Β', ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 1991.

- [15] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 2010.
- [16] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr., Electric Machinery, Stephen Umans.
- [17] S. J. Chapman, Ηλεκτρικές Μηχανές, ΤΖΙΟΛΑ, 2009.
- [18] Γ. Ι. Τσεκουράς, Μελέτη κατασκευής, Μεταπτυχιακή Εργασία : Ανάλυση κυκλωματικής και πεδιακής συμπεριφοράς δοκιμίου 2.5 kW και ανεμογεννήτριας 25 kW, Αθήνα: Ε.Μ.Π, 2000.
- [19] Κ. Α., Υποδειγματική Προκαταρκτική Σχεδίαση Γεννήτριας Μόνιμων Μαγνητών ισχύος 25 kW, Αθήνα: Ε. Μ. Π, 2015.
- [20] Juha Pyrohen, Tapani Jokinen, Valeria Hrabovcova, Design of Rotating Machines, John Wiley & Sons.
- [21] Ion Boldea, Syed A. Nasar, The Induction Machines Design Handbook, Taylor & Francis Group, 2010.
- [22] Μ. Η. ΜΠΕΝΙΑΚΑΡ, Διδακτορική Διατριβή : Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κινητήρων με θεώρηση των απωλειών των μόνιμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, Αθήνα: Ε. Μ. Π, 2014.
- [23] Ά. Α. Χριστοφή, Διπλωματική Εργασία: Σχεδίαση και Βελτιστοποίηση Δρομέα Ηλεκτρικής Μηχανής Επαγωγής Ισχύος 2 HP, Αθήνα: Ε. Μ. Π, Ιούλιος, 2010.
- [24] Κ. Β. Ντόβολος, Διπλωματική Εργασία : Σχεδίαση και συγκριτικά πλεονεκτήματα κινητήρα επαγωγής για ηλεκτρικό όχημα, Αθήνα: Ε. Μ. Π, Ιούλιος 2015.
- [25] D. Meeker, Finite Element Method Magnetics, User's Manual, 2010.
- [26] D. Meeker, Iron Loss Calculation in PM synchronous machines.
- [27] N. Bianchi, Electrical Machine Analysis Using Finite Elements, Taylor & Francis Group, 2005.
- [28] Σ. Ν. Μανιάς, Ηλεκτρονικά Ισχύος, Αθήνα: Εκδόσεις Συμείων, 2014.
- [29] R. Lateb, N. Takorabet, Performances comparison of induction motors and surface mounted PM motor for POD marine propulsion, IEEE, 2005.
- [30] cogent, «www.cogent-power.com,» June 2008. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://cogent-power.com/cms-data/downloads/m235-35a.pdf>.
- [31] D. Meeker, Finite Element Method : Magnetics OctaneFEMM, User's Manual, 2011.
- [32] R. Lateb, N. Takorabet, «Performances comparison of induction motors and surface mounted PM motor for POD marine propulsion,» IEEE, 2005.

- [33] T. M. ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ, Διδακτορική Διατριβή : Σχεδίαση ελάχιστου λειτουργικού - κατασκευαστικού κόστους και δυναμικός έλεγχος απωλειών κινητήρων για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, Αθήνα: Ε. Μ. Π, Δεκέμβριος 2012.
- [34] Goldberg D. E. , K. Deb, «A comparison of selection schemes used in genetic algorithms,» σε *Foundations of Genetic Algorithms*, G. A. Rawlins, Επιμ., San Mateo, Morgan Kaufman, 1991, pp. 69-93.
- [35] Ι. Α. Σταυρόπουλος, Διπλωματική Εργασία: Σχεδίαση και βελτιστοποίηση κινητήρα μονίμων μαγνητών για εφαρμογή ηλεκτροπρόωσης πλοίου, Αθήνα : Ε. Μ. Π, Ιούλιος 2014.
- [36] Α. Β. Στρατής, Διπλωματική Εργασία: Διερεύνηση Εφαρμοσιμότητας Τεχνολογίας Συνεχούς ρεύματος σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας Πλοίου, Αθήνα: Ε. Μ. Π, Φεβρουάριος 2016.
- [37] Κ. Ι. Νικολάου, Διπλωματική Εργασία: Σχεδίαση και σύγκριση εναλλακτικών τοπολογιών κινητήρα επαγωγής για εφαρμογή σε σύστημα ελιγμών πλοίου, Αθήνα: Ε. Μ. Π, 2014.
- [38] E. M. Tsambouris, A. G. Kladas, Efficiency Optimization Considerations for Standar Induction Motor Fed by PWM Inverter, IEEE, 2009.
- [39] Md. Abdul Mannan, Toshiaki Murata, Junji Tamura, Takeshi Tsuchiya, Efficiency Optimized Speed Control of Field Oriented Induction Motor Including Core Loss, IEEE, 2002.
- [40] D. H. Clayton, S. D. Sudhoff, G. F. Grater, Electric Ship Drive and Power System, IEEE, 2000.
- [41] Ali M. Bazzi, Philip T. Krein, Survey of Real-Time Power-Loss Minimizers for Induction Motors, IEEE, 2009.
- [42] A. G. Sarigiannidis, C. Patsios, A. Pittaras, A. Kladas, «Geometry Optimization of Synchronous Machines Used on Ship Shaft Generator Systems,» *Materials Science Forum*, pp. 245-250, 2014.
- [43] A. G. Sarigiannidis, A. Kladas, E. Chatzinikolaou, C. Patsios, «High efficiency Shaft Generator drive system for Ro-Ro tariler-passenger ship application,» *International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS)*, pp. 1-6, 2015.
- [44] A. G. Sarigiannidis, A. G. Kladas, A. Mountaneas, M. E. Beniakar, I. K. Pallis, S. E. Dallas, G. Politis, E. C. Tatakis, J. M. Proualidis, «Design of Surface PM motors for Pod application utilizing a 3D Hydrodynamic Model,» σε *XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM' 2016)*, Lausanne-Switzerland, 2016.

8 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το μηχανολογικό σχέδιο για τον άξονα και οι προδιαγραφές του κινητήρα κύριας πρόωσης.

