



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Σχεδίαση και βελτιστοποίηση κινητήρα μονίμων μαγνητών για
εφαρμογή ηλεκτροπρόωσης πλοίου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Α. Σταυρόπουλος

Επιβλέπων: Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Σχεδίαση και βελτιστοποίηση κινητήρα μονίμων μαγνητών για
εφαρμογή ηλεκτροπρόωσης πλοίου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Α. Σταυρόπουλος

Επιβλέπων: Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30η Ιουλίου 2014.

.....
Α. Κλαδάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σ. Μανιάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Σ. Παπαθανασίου
Επίκουρος καθηγητής
ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2014

.....

Ιωάννης Α. Σταυρόπουλος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών

Copyright © Ιωάννης Α. Σταυρόπουλος, 2014.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

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

Ευχαριστώ θερμά, τον Καθηγητή μου κ. Αντώνιο Κλαδά, για την καθοδήγησή του και την άψογη συνεργασία για την περάτωση της εργασίας, διαφωτίζοντας τις όποιες απορίες μου επί του θέματος της σχεδίασης και λειτουργίας των ηλεκτρικών κινητήρων.

Ευχαριστώ επίσης τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Μίνω Μπενιακάρ που πρόθυμα με στήριξε κατά τη διαδικασία της σχεδίασης.

Τέλος, ιδιαίτερος ευχαριστώ την οικογένειά μου, της οποίας η ηθική και υλική υποστήριξη ήταν πολύτιμη σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη σχεδίαση και βελτιστοποίηση γεωμετρίας ενός σύγχρονου κινητήρα επιφανειακών μονίμων μαγνητών για εφαρμογή σε συστήματα αζιμουθιακών προωστήριων μηχανισμών πλοίου. Συγκεκριμένα, πρόκειται για ένα σύστημα Azipod και αφορά εξωλέμβιες μονάδες πρόωσης πλοίων, στις οποίες ο κινητήρας βρίσκεται έξω από το κύτος, έχει δυνατότητα περιστροφής γύρω από τον εαυτό του και ο άξονας του είναι απευθείας συνδεδεμένος στην προπέλα. Η εργασία σε πρώτο στάδιο προσδιορίζει τις προδιαγραφές που χρειάζονται λαμβάνοντας υπόψιν τους περιορισμούς της εφαρμογής, και σε δεύτερο στάδιο προχωρά στην σχεδίαση και βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του με κύριο σκοπό την αύξηση της επίδοσης, με ταυτόχρονη θεώρηση κριτηρίων υψηλής απόδοσης και ποιότητας ισχύος. Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται στη συγκεκριμένη εφαρμογή χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή ισχύ (της τάξης των 4-5 MW), χαμηλή ταχύτητα περιστροφής (της τάξεως των 200 σ.α.λ.) και πολύ υψηλή απόδοση (λόγω του μεγάλου μεγέθους η θεωρητική απόδοση κυμαίνεται στο 98%).

Αρχικά γίνεται βιβλιογραφική διερεύνηση των δυνατοτήτων, των περιορισμών και των επιλογών που υπάρχουν στην ηλεκτροπρόωση πλοίων. Μετά από μια σύντομη περιγραφή των χαρακτηριστικών των κινητήρων μονίμων μαγνητών, ακολουθεί η ανάλυση των πλεονεκτημάτων της εφαρμογής της ηλεκτροπρόωσης σε πλοία.

Έπειτα εξηγείται αναλυτικά η διαδικασία προκαταρκτικής σχεδίασης του κινητήρα. Αυτή περιλαμβάνει τις αναλυτικές σχέσεις της κλασικής σχεδίασης, την επιλογή των υλικών, την επιλογή της γεωμετρίας δρομέα και την κατανομή τυλίγματος. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην εξήγηση της επιλογής μη επικαλυπτόμενου συγκεντρωμένου τυλίγματος διπλής στρώσης.

Τελικά, γίνεται η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του κινητήρα, η οποία βασίζεται στην παραμετροποιημένη σχεδίαση και την χρήση λογισμικού ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (βιβλιοθήκη εντολών OctaveFEMM του λογισμικού FEMM για το MATLAB). Πραγματοποιείται εκτεταμένη ανάλυση ευαισθησίας για αρκετές μεταβλητές σχεδίασης που επηρεάζουν σημαντικά τα λειτουργικά στοιχεία του κινητήρα, ενώ λαμβάνονται υπόψη τρεις διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Μετά την επιλογή της βέλτιστης γεωμετρίας, υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης της.

Λέξεις κλειδιά

Ηλεκτροπρόωση πλοίων, συστήματα αζιμουθιακών προωστήριων μηχανισμών πλοίου Azipod, σύγχρονος κινητήρας μονίμων μαγνητών, συγκεντρωμένο τύλιγμα, ανάλυση ευαισθησίας, ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.

Abstract

The current thesis undertakes the design and optimisation of a synchronous surface mounted permanent magnet electric motor for marine azimuth thruster applications. Specifically, it is about an Azipod system of electric podded propulsion units, in which the motor is placed outside the ship's vessel, can rotate around itself and its shaft is connected directly to the propeller. Initially, the thesis determines the specifications needed taking the limitations of the application into consideration, and then it moves to the design and optimisation of the motor's geometry with the main goal being the performance maximisation, also meeting high efficiency and power quality criteria. The motors used in this application are characterised by very high output power (in the range of 4-5 MW), low speed (in the range of 200 rpm) and very high efficiency (because of its large size the theoretical value of its efficiency is about 98%).

Firstly, the possibilities, constraints and options available in marine electric propulsion are investigated in the literature. After a brief description of the characteristics of permanent magnet motors, follows an analysis of the benefits of the implementation of electric propulsion on ships.

Then the preliminary design process of the engine is explained in detail. This involves the analytical relations of the preliminary design, the selection of materials, the selection of the geometry of the rotor and type of the coil. Particular emphasis is given to explaining the choice of concentrated non-overlapping double layer windings.

Finally, the optimization of the geometry of the engine is done, based on the parametric design and the use of finite element analysis software (FEMM's OctaveFEMM command library for MATLAB). Extensive sensitivity analysis is performed on several design variables that significantly influence the functional components of the engine, while taking into account three different loading conditions. After selecting the optimal geometry, performance and efficiency characteristics are calculated.

Key words

Marine electric propulsion, Azipod azimuth thruster, permanent magnet synchronous motor, concentrated winding, sensitivity analysis, finite element analysis.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1.1 Σκοπός της εργασίας.....	10
1.2 Δομή της εργασίας.....	10
1.3 Επιστημονική συνεισφορά της εργασίας.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ.....	13
2.1 Μόνιμοι μαγνήτες και ηλεκτρομαγνητική διέγερση.....	13
2.2 Συστήματα ηλεκτροκίνησης με σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.....	15
2.3 Αυξάνοντας την επίδοση των κινητήρων.....	16
2.4 Κατάταξη των ηλεκτρικών κινητήρων μόνιμων μαγνητών.....	18
2.5 Τάσεις στην βιομηχανία των κινητήρων μόνιμων μαγνητών.....	18
2.6 Εφαρμογές των κινητήρων μόνιμων μαγνητών.....	19
2.7 Υλικά και κυκλώματα των κινητήρων μόνιμων μαγνητών.....	20
2.7.1 Καμπύλη απομαγνήτισης και μαγνητικές παράμετροι.....	20
2.7.2 Ιδιότητες των μόνιμων μαγνητών.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ ΠΛΟΙΩΝ.....	24
3.1 Κίνητρα για την επιλογή της ηλεκτρικής πρόωσης σε πλοίο.....	24
3.2 Ροή ισχύος και αποδοτικότητα.....	25
3.3 Ιστορία της ηλεκτρικής πρόωσης.....	28
3.4 Εφαρμογές.....	30
3.4.1 Επιβατηγά σκάφη – Κρουαζιερόπλοια και φέρι μποτ...30	
3.4.2 Εξόρυξη πετρελαίου και φυσικού αερίου: Μονάδες γεώτρησης, τάνκερ.....	31
3.4.3 Γιοτ και σκάφη αναψυχής.....	31
3.4.4 Παγοθραυστικά.....	31
3.4.5 Πολεμικά πλοία.....	31
3.4.6 Ερευνητικά πλοία.....	32
3.5 Σύστημα ηλεκτρικής ισχύος πλοίου.....	32
3.5.1 Εισαγωγή.....	32
3.5.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.....	33
3.5.3 Διανομή ηλεκτρικής ισχύος.....	34
3.5.4 Μονάδες πρόωσης.....	35

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ
4,5MW.....38**

4.1	Προδιαγραφές.....	38
4.2	Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης.....	39
4.3	Προκαταρκτική σχεδίαση.....	41
4.3.1	Διαστασιολόγηση διακένου.....	41
4.3.2	Προσδιορισμός χαρακτηριστικών στάτη.....	43
4.3.3	Προσδιορισμός χαρακτηριστικών δρομέα.....	54

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....59

5.1	Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων.....	59
5.2	Παραμετροποιημένη σχεδίαση.....	64
5.3	Βελτιστοποίηση του κινητήρα.....	67
5.3.1	Υπολογισμός χαρακτηριστικών.....	69
5.3.2	Βελτιστοποίηση πλάτους μαγνήτη – πάχους δοντιού...73	
5.3.3	Βελτιστοποίηση πλάτους (k_1) και πάχους (k_2) πέδιλου.....	90
5.4	Χαρακτηριστικές τελικής μηχανής.....	105
5.4.1	Κυματομορφές ονομαστικού φορτίου.....	108
5.4.2	Κυματομορφές υποφόρτισης.....	111
5.4.3	Κυματομορφές υπερφόρτισης.....	114
5.4.4	Πίνακες διαστάσεων και χαρακτηριστικών λειτουργίας κινητήρα.....	117

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....119

6.1	Συμπεράσματα.....	119
6.2	Πρωτότυπη συνεισφορά της εργασίας.....	120
6.3	Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.....	121

Βιβλιογραφία.....122

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η σχεδίαση και βελτιστοποίηση ενός σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών για εφαρμογή ηλεκτροπρόωσης πλοίου. Η εφαρμογή αφορά χρήση του κινητήρα σε Aziprod, το οποίο είναι κατοχυρωμένη ονομασία της ABB για εξωλέμβιες μονάδες πρόωσης πλοίων, στις οποίες ο κινητήρας βρίσκεται έξω από το κύτος, έχει δυνατότητα περιστροφής γύρω από τον εαυτό του και ο άξονας του είναι απευθείας συνδεδεμένος στην προπέλα.

Με βάση τις απαιτήσεις που προκύπτουν από την συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέχθηκαν οι αντίστοιχες προδιαγραφές που τις καλύπτουν και έγινε η προκαταρκτική σχεδίαση του κινητήρα. Στην συνέχεια, μετά από ανάλυση ευαισθησίας με την χρήση παραμετροποιημένης σχεδίασης και λογισμικού ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, επιλέγεται η τελική γεωμετρία και αναλύονται τα χαρακτηριστικά επίδοσης και απόδοσης.

1.2 Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία αρχικά παρουσιάζει την επιλογή ηλεκτρικού κινητήρα μόνιμων μαγνητών και του συστήματος ηλεκτροπρόωσης με Aziprod, και έπειτα αναπτύσσει την διαδικασία σχεδίασης και ανάλυσης αυτού και εξάγει συμπεράσματα.

Πιο συγκεκριμένα, στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται οι ηλεκτρικοί κινητήρες μόνιμων μαγνητών, τα είδη τους, οι εφαρμογές τους, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους και τα πλεονεκτήματά τους σε σχέση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης αλλά και τους άλλους ηλεκτρικούς κινητήρες.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται η ηλεκτροπρόωση πλοίων. Αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα πρόωσης, γίνεται σύντομη αναφορά στην ιστορία της, παρουσιάζονται τα διάφορα είδη συστημάτων πρόωσης και οι εφαρμογές τους στους διάφορους τύπους πλοίων.

Στο **Κεφάλαιο 4** επιλέγονται οι προδιαγραφές του κινητήρα λαμβάνοντας υπ' όψιν τις απαιτήσεις ροπής, ταχύτητας και διαστάσεων που θέτει η συγκεκριμένη εφαρμογή, παρουσιάζονται τα βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης ενός κινητήρα, και με βάση τα παραπάνω γίνεται η προκαταρκτική σχεδίαση, όπου υπολογίζονται κάποιες βασικές διαστάσεις του κινητήρα όπως το μήκος και πλάτος του διακένου, επιλέγονται τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν στον στάτη και τον δρομέα και υπολογίζονται οι ειδικές φορτίσεις. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην επιλογή του τύπου του τύλιγματος, το οποίο είναι μη επικαλυπτόμενο συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης, με κριτήρια τις μειωμένες απώλειες, τα μικρά επίπεδα θορύβου και δονήσεων και την μικρή διακύμανση της ροπής.

Στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του κινητήρα με βάση μεταβλητές όπως το πλάτος των μαγνητών και το πάχος των δοντιών του στάτη, ενώ άλλες διαστάσεις επηρεάζονται από αυτές παραμετρικά (παραμετροποιημένη σχεδίαση). Τα κριτήρια περιλαμβάνουν την παραγόμενη ροπή, την διακύμανσή της, τις απώλειες σιδήρου και χαλκού, την τιμή της αντι-ΗΕΔ κοκ. Αφού επιλεγεί η τελική γεωμετρία του κινητήρα, υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά απόδοσης και επίδοσης του και η συμπεριφορά του σε υποφόρτιση και υπερφόρτιση.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 6** συγκεντρώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διαδικασία της μελέτης, της σχεδίασης και της βελτιστοποίησης του κινητήρα, ενώ αναφέρονται και τα σημεία καινοτομίας της εργασίας.

1.3 Επιστημονική συνεισφορά της εργασίας

Η εργασία επιχειρεί την σχεδίαση και βελτιστοποίηση ενός σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών για Aziprod, χαρακτηριστικό του οποίου είναι η υψηλή ισχύς εξόδου, της τάξης των 4,5 MW. Στον δρομέα χρησιμοποιούνται επιφανειακοί μόνιμοι μαγνήτες νεοδυμίου, ενώ στον στάτη τα δόντια είναι πεπλατυσμένα στις άκρες, για μεγιστοποίηση της ροπής και μείωση της πυκνότητας μαγνητικής ροής. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η το τύλιγμα του στάτη, το οποίο είναι συγκεντρωμένο με επικαλυπτόμενο τύλιγμα διπλής στρώσης, χάρη στο οποίο επιτυγχάνονται μικρές απώλειες σιδήρου και χαμηλή διακύμανση της ροπής. Για την σχεδίαση του εν λόγω κινητήρα αναπτύχθηκαν τεχνικές βελτιστοποίησης με την χρήση των λογισμικών Matlab και FEMM:

- Πρώτον, με την χρήση της παραμετροποιημένης σχεδίασης,

μεταβάλλονταν οι 4 διαστάσεις του κινητήρα που μας ενδιαφέρουν και αφορούν τους επιφανειακούς μαγνήτες και τα δόντια του στάτη, ενώ οι άλλες προσαρμόζονταν ανάλογα έτσι ώστε να διατηρούνται σταθερές η μαγνητική και ηλεκτρική φόρτιση. Έτσι αναλύθηκαν 198 διαφορετικές γεωμετρίες του κινητήρα.

- Δεύτερον, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας της ροπής, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του στάτη αλλά και του μαγνήτη. Κατά τη διαδικασία αυτή επιχειρείται κυρίως η μεγιστοποίηση της επίδοσης, και δευτερευόντως η μείωση της διακύμανσης της ροπής, ενώ η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυξάνεται λόγω της αυτοματοποιημένης σχεδίασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

2.1 Μόνιμοι μαγνήτες και ηλεκτρομαγνητική διέγερση

Η χρήση των μόνιμων μαγνητών στην κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα ^[5]:

- Δεν καταναλώνεται ηλεκτρική ενέργεια στο κύκλωμα διέγερσης και έτσι δεν υπάρχουν απώλειες διέγερσης, το οποίο συνεπάγεται σημαντική αύξηση στην απόδοση της μηχανής.
- Υψηλότερη ροπή και/ή ισχύς εξόδου ανά όγκο σε σχέση με όταν χρησιμοποιείται ηλεκτρομαγνητική διέγερση.
- Καλύτερη δυναμική επίδοση σε σχέση με κινητήρες με ηλεκτρομαγνητική διέγερση (υψηλότερη πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο).
- Απλοποίηση της κατασκευής και συντήρησης.
- Μείωση του κόστους για κάποιους τύπους μηχανών.

Τα πρώτα συστήματα διέγερσης με μόνιμους μαγνήτες εφαρμόστηκαν σε ηλεκτρικές μηχανές τον 19ο αιώνα από τους J. Henry (1831), H. Pixii (1832), W. Ritchie (1833), F. Watkins (1835), T. Davenport (1837) και M.H. Jacobi (1839). Φυσικά, η χρήση σκληρών μαγνητικών υλικών πολύ κακής ποιότητας (π.χ. ατσάλι) σύντομα οδήγησε στην προτίμηση των συστημάτων ηλεκτρομαγνητικής διέγερσης. Η εφεύρεση του Alnico (κράμα σιδήρου με αλουμίνιο, νικέλιο και κοβάλτιο) το 1932 επανέφερε τα συστήματα διέγερσης με μόνιμους μαγνήτες. Η εφαρμογή τους όμως ήταν περιορισμένη σε μηχανές συνεχούς ρεύματος μικρής ιπποδύναμης. Τώρα οι περισσότερες μηχανές συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη χρησιμοποιούν μαγνήτες από φερρίτη.

Οι κινητήρες επαγωγής κλωβού ήταν οι πιο διαδεδομένοι ηλεκτρικοί κινητήρες τον 20ό αιώνα. Πρόσφατα, χάρη στην ραγδαία πρόοδο στον τομέα των ηλεκτρονικών ισχύος και του ελέγχου, η εφαρμογή τους στην ηλεκτροκίνηση έχει αυξηθεί. Η ονομαστική ισχύς εξόδου τους κυμαίνεται από τα 70W μέχρι τα 500kW, με το 75% αυτών να έχει ταχύτητα περιστροφής τις 1500 σ.α.λ. Τα κύρια πλεονεκτήματά τους είναι η απλή κατασκευή τους, η απλή συντήρηση, η έλλειψη ψηκτρών, το χαμηλό κόστος και η αξιοπιστία. Τα μειονεκτήματά τους είναι το μικρό διάκενο, η πιθανότητα να σπάσουν οι ράβδοι του δρομέα λόγω θερμών σημείων, και η χαμηλότερη απόδοση και συντελεστής ισχύος σε σχέση με τους σύγχρονους κινητήρες.

Η χρήση των σύγχρονων κινητήρων μονίμου μαγνήτη έχει γίνει πιο ενδιαφέρουσα επιλογή σε σχέση με τους κινητήρες επαγωγής. Οι μαγνήτες από σπάνιες γαίες μπορούν όχι μόνο να βελτιώσουν την επίδοση μόνιμης κατάστασης αλλά και την πυκνότητα ισχύος (τον λόγο της ισχύος εξόδου προς την μάζα), την δυναμική επίδοση και την ποιότητα. Οι τιμές των μαγνητών σπάνιων γαιών επίσης μειώνονται, κάτι που κάνει αυτούς τους κινητήρες περισσότερο δημοφιλείς. Οι βελτιώσεις στον τομέα των ημιαγωγών έκαναν τον έλεγχο κινητήρων χωρίς ψήκτρες ευκολότερο και οικονομικότερο, με την δυνατότητα να λειτουργεί ο κινητήρας σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων διατηρώντας καλή αποδοτικότητα.

Ένας κινητήρας συνεχούς ή εναλλασσομένου ρεύματος χωρίς ψήκτρες έχει τους μαγνήτες τοποθετημένους στον δρομέα και το τύλιγμα τυμπάνου στον στάτη. Έτσι, το ρεύμα τυμπάνου δεν μεταφέρεται μέσω ψηκτρών ή δακτυλίων. Αυτά είναι τα κύρια μέρη που απαιτούν συντήρηση, και μια τυπική ρουτίνα συντήρησης στο 90% των κινητήρων έχει σχέση με αυτά. Σε έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος οι απώλειες ισχύος γίνονται κυρίως στον δρομέα, ο οποίος περιορίζει την μεταφορά θερμότητας και συνεπώς την πυκνότητα ρεύματος στο τύμπανο. Στους σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη οι απώλειες ισχύος είναι πρακτικά όλες στον στάτη, όπου η θερμότητα μπορεί να μεταφερθεί μέσω του πλαισίου, ή σε μεγαλύτερες μηχανές, μέσω υδρόψυξης. Σημαντικές βελτιώσεις στην δυναμική συμπεριφορά μπορεί να επιτευχθεί αφού ο δρομέας έχει μικρότερη ροπή αδράνειας και υπάρχει υψηλή πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο.

Τα συστήματα ηλεκτροκίνησης με σύγχρονο κινητήρα μόνιμων μαγνητών έχουν γίνει πιο βιώσιμη επιλογή σε σχέση με τα αντίστοιχα με κινητήρες επαγωγής για ισχύ μέχρι 10-15kW. Έχουν γίνει επίσης επιτυχημένες προσπάθειες να κατασκευαστούν κινητήρες με ισχύ πάνω από 1MW στην Γερμανία και τις ΗΠΑ. Οι μαγνήτες σπάνιων γαιών υψηλής επίδοσης έχουν αντικαταστήσει επιτυχώς τους μαγνήτες φερρίτη και Alnico σε όλες τις εφαρμογές όπου ο υψηλός λόγος ισχύος προς μάζα, η βελτιωμένη δυναμική επίδοση ή η υψηλότερη απόδοση είναι οι κύριες απαιτήσεις. Τυπικά παραδείγματα όπου αυτά τα χαρακτηριστικά είναι τα βασικά κριτήρια επιλογής είναι οι βηματικοί κινητήρες για εφαρμογές περιφερειακών ηλεκτρονικών υπολογιστών και σερβοκινητήρες για μηχανικά εργαλεία και ρομπότ.

2.2 Συστήματα ηλεκτροκίνησης με σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη

Γενικά, όλα τα ηλεκτρομηχανικά συστήματα κίνησης μπορούν να χωριστούν σε συστήματα σταθερής ταχύτητας, συστήματα σερβοκινητήρων και συστήματα μεταβλητής ταχύτητας.

Ένα σύστημα μεταβλητής ταχύτητας συνήθως χρησιμοποιεί έναν σύγχρονο κινητήρα ο οποίος μπορεί να διατηρεί σταθερή ταχύτητα χωρίς ηλεκτρονικό μετατροπέα, ανάδραση ή οποιοδήποτε άλλο κινητήρα όταν υπάρχουν λίγοι περιορισμοί στις ανοχές μεταβολής της ταχύτητας.

Ένα σύστημα σερβοκινητήρων αποτελείται από διάφορες συσκευές που παρακολουθούν σε μόνιμη βάση πληροφορίες όπως η ταχύτητα και η θέση, συγκρίνουν αυτές τις τιμές με το επιθυμητό αποτέλεσμα και κάνουν τις απαραίτητες διορθώσεις για να ελαχιστοποιήσουν το σφάλμα.

Σε ένα σύστημα μεταβλητής ταχύτητας η ακρίβεια και ο χρόνος απόκρισης στον οποίο ο κινητήρας ακολουθεί τις εντολές δεν είναι σημαντικοί παράγοντες. Η κύρια απαίτηση είναι η δυνατότητα μεταβολής της ταχύτητας σε ένα μεγάλο εύρος.

Σε όλα τα ηλεκτρομηχανικά συστήματα κίνησης όπου ελέγχονται η ταχύτητα και η θέση, ένας ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος παρεμβάλλεται μεταξύ του δικτύου και του κινητήρα. Υπάρχουν τρεις τύποι ηλεκτρομηχανικών συστημάτων με κινητήρες μόνιμου μαγνήτη:

- συστήματα με κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες
- συστήματα με κινητήρα χωρίς ψήκτρες (συνεχούς ρεύματος και σύγχρονους εναλασσομένου ρεύματος)
- συστήματα με βηματικούς κινητήρες

Οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες χωρίζονται σε κινητήρες ημιτονοειδούς διέγερσης και σε κινητήρες διέγερσης με τετραγωνικό παλμό. Οι κινητήρες ημιτονοειδούς διέγερσης τροφοδοτούνται με τριφασική ημιτονοειδή τάση και λειτουργούν χάρη σε ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Αποκαλούνται απλώς *σύγχρονοι κινητήρες μονίμων μαγνητών*. Όλα τα τυλίγματα των φάσεων άγουν ρεύμα ανά πάσα στιγμή. Οι κινητήρες διέγερσης με τετραγωνικό παλμό επίσης τροφοδοτούνται από τριφασικές κυματομορφές μετατοπισμένες κατά 120° μεταξύ τους, αλλά αυτές οι κυματομορφές είναι τετραγωνικές ή τραπεζοειδείς.

Τέτοια κυματομορφή παράγεται όταν το ρεύμα τυμπάνου συγχρονίζεται ακριβώς με την στιγμιαία θέση και ταχύτητα του δρομέα. Αυτό επιτυγχάνεται με αισθητήρα απόλυτης γωνιακής θέσης τοποθετημένο στον άξονα του δρομέα. Μόνο δύο από τα τρία τυλίγματα διαρρέονται από ρεύμα ταυτόχρονα.

2.3 Αυξανοντας την επίδοση των κινητήρων

Τα προβλήματα που αντιμετωπίζει ο πλανήτης μπορούν να έχουν απρόβλεπτες συνέπειες:

- αυξανόμενο οικονομικό κενό μεταξύ πλουσίων και φτωχών
- τεράστια αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας
- μόλυνση του περιβάλλοντος

Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και της μόλυνσης είναι στο χέρι των επιστημόνων και των μηχανικών. Στατιστικές δείχνουν ότι τουλάχιστον 26 εκατομμύρια τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου (ΜΤΟΕ) πρωτογενούς ενέργειας καταναλώνεται καθημερινώς από όλη την ανθρωπότητα, από τους οποίους 7,6 ΜΤΟΕ χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας εκτιμάται ότι θα είναι 1,5% ανά έτος για τις ερχόμενες δεκαετίες.

Η παγκόσμια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμάται στις 12000 TWh ανά έτος το 1996 και αναμένεται να αυξηθεί στις 22000 TWh μέχρι το 2020. Ο βιομηχανικός τομέας στις ανεπτυγμένες χώρες χρησιμοποιεί πάνω από το 30% της ηλεκτρικής ενέργειας. Πάνω από 65% αυτής της ενέργειας καταναλώνεται από ηλεκτρικούς κινητήρες. Ο αριθμός των εγκατεστημένων ηλεκτρικών μηχανών μπορεί να εκτιμηθεί με βάση την παγκόσμια παραγωγή τους η οποία είναι πάνω από 5 εκατομμύρια ετησίως για όλα τα μεγέθη, από μικροκινητήρες μέχρι μεγάλες σύγχρονες μηχανές.

Η αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια προκαλεί μεγάλη ανησυχία για την μόλυνση του περιβάλλοντος. Τα εργοστάσια που χρησιμοποιούν ορυκτά και πυρηνικά καύσιμα και τα οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης είναι σημαντικοί συντελεστές στην ρύπανση του αέρα, την όξινη βροχή και το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι η ηλεκτροκίνηση και η εξοικονόμηση ενέργειας μπορούν να περιορίζουν αυτές τις συνέπειες σημαντικά. Για παράδειγμα, ο πληθυσμός της Ιαπωνίας είναι περίπου ο μισός αυτού των ΗΠΑ. Όμως οι εκπομπές άνθρακα είναι 4 φορές λιγότερες. Τα μέσα μαζικής μεταφοράς στην Ιαπωνία που βασίζονται σε μοντέρνα ηλεκτρικά τρένα

παίζουν σημαντικό ρόλο στην μείωση των εκπομπών άνθρακα.

Έχει εκτιμηθεί ότι στις ανεπτυγμένες βιομηχανικές χώρες περίπου 20% της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να εξοικονομηθεί χρησιμοποιώντας πιο αποδοτικές τεχνικές ελέγχου των ηλεκτρομηχανικών συστημάτων. Αυτό σημαίνει ότι οι ηλεκτρικές μηχανές έχουν τεράστια επίδραση στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να μειωθεί με τους ακόλουθους τρόπους:

- καλό “νοικοκύρεμα”
- χρήση συστημάτων μεταβλητής ταχύτητας
- κατασκευή μηχανών με καλύτερη απόδοση

Το μέτρα καλού “νοικοκυρέματος” είναι οικονομικά, γρήγορα και εύκολα στην υλοποίηση, όπως να τίθενται εκτός λειτουργίας κινητήρες που είναι σε αδράνεια. Η χρήση συστημάτων μεταβλητής ταχύτητας μπορεί να δώσει μια δυνητική μείωση στην κατανάλωση ισχύος μέχρι 50% σε εφαρμογές όπως οι ανεμιστήρες και οι αντλίες.

Η εφαρμογή των μονίμων μαγνητών στις ηλεκτρικές μηχανές βελτιώνει την απόδοσή τους μέσω της έλλειψης απωλειών διέγερσης. Η πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο αυξάνεται, το οποίο σημαίνει μεγαλύτερη ισχύ εξόδου για τις ίδιες διαστάσεις.

Μια αύξηση της απόδοσης του κινητήρα κατά 3% μπορεί να εξοικονομήσει το 2% της ενέργειας που χρησιμοποιείται. Η περισσότερη ενέργεια χρησιμοποιείται σε τριφασικούς κινητήρες επαγωγής ισχύος μικρότερης των 10 kW. Ας θεωρήσουμε έναν μικρό τριφασικό τετραπολικό κινητήρα επαγωγής του 1,5kW. Η απόδοση πλήρους φορτίου ενός τέτοιου κινητήρα είναι συνήθως 75%. Αντικαθιστώντας τον με έναν σύγχρονο κινητήρα μονίμων μαγνητών η απόδοση μπορεί να αυξηθεί στο 88%. Αυτό σημαίνει ότι ο κινητήρας απορροφά από το δίκτυο μόνο 1704W αντί για 2000W που απορροφά ο ασύγχρονος. Η εξοικονόμηση είναι 296W ανά κινητήρα. Αν υποθέσουμε ότι σε μια χώρα είναι εγκατεστημένοι 1 εκατομμύριο τέτοιοι κινητήρες, η μείωση στην κατανάλωση ισχύος θα είναι 296MW. Με άλλα λόγια, μια μεγάλη γεννήτρια θα μπορεί να αποσυνδεθεί από το δίκτυο. Επίσης, αυτό σημαίνει μείωση στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και οξειδίων του αζώτου εάν η ενέργεια παράγεται από θερμικούς σταθμούς.

2.4 Κατάταξη των ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών

Εν γένει, οι κινητήρες μονίμων μαγνητών είναι τριών ειδών:

- κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες
- κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες
- σύγχρονοι κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος

Η κατασκευή ενός κινητήρα μονίμων μαγνητών ΣΡ με ψήκτρες είναι παρόμοια με ενός κινητήρα ΣΡ με το σύστημα ηλεκτρομαγνητικής διέγερσης αντικατεστημένο από μόνιμους μαγνήτες. Οι κινητήρες ΣΡ χωρίς ψήκτρες και οι σύγχρονοι κινητήρες μονίμων μαγνητών είναι πρακτικά ίδιοι, με πολυφασικό στάτη και τους μαγνήτες τοποθετημένους στον δρομέα. Η μόνη διαφορά είναι στον έλεγχο και το σχήμα της τάσης διέγερσης: ένας σύγχρονος κινητήρας τροφοδοτείται με ημιτονοειδείς κυματομορφές οι οποίες παράγουν ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Στους κινητήρες ΣΡ χωρίς ψήκτρες το ρεύμα τυμπάνου είναι τετραγωνικής ή τραπεζοειδούς μορφής, μόνο δύο φάσεις άγουν ρεύμα ταυτόχρονα και η διακοπτική ακολουθία συγχρονίζεται με την γωνιακή θέση του δρομέα.

Το ρεύμα τυμπάνου των σύγχρονων κινητήρων και των κινητήρων ΣΡ χωρίς ψήκτρες δεν μεταφέρεται μέσω ψηκτρών, οι οποίες φθείρονται και χρειάζονται συντήρηση. Ένα ακόμη πλεονέκτημα του κινητήρα χωρίς ψήκτρες είναι ότι οι απώλειες ισχύος γίνονται κατά κύριο λόγο στον στάτη, όπου οι συνθήκες μεταφοράς της παραγόμενης θερμότητας είναι πιο ευνοϊκές. Συνεπώς η πυκνότητα ισχύος μπορεί να αυξηθεί σε σχέση με τους κινητήρες ΣΡ με ψήκτρες. Επιπρόσθετα, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική βελτίωση στην δυναμική επίδοση του κινητήρα επειδή η πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο είναι υψηλή, ο δρομέας έχει μικρότερη αδράνεια και δεν υπάρχει ο περιορισμός της εξάρτησης του ρεύματος από την ταχύτητα. Έτσι, ο όγκος ενός κινητήρα μονίμων μαγνητών χωρίς ψήκτρες μπορεί να μειωθεί περισσότερο από 40% διατηρώντας την ίδια ισχύ με αυτή ενός κινητήρα με ψήκτρες.

2.5 Τάσεις στην βιομηχανία των κινητήρων μονίμων μαγνητών

Η οικογένεια των ηλεκτρομηχανικών συστημάτων κίνησης έχει το μεγαλύτερο μερίδιο στην αγορά των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών ειδών. Αναλύσεις δείχνουν ότι οι πωλήσεις κινητήρων συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες αυξάνουν ελάχιστα κάθε χρόνο, ενώ η ζήτηση για κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος αυξάνεται σημαντικά. Το ίδιο μπορεί να παρατηρηθεί και για τους κινητήρες

μόνιμου μαγνήτη χωρίς και με ψήκτρες, αντίστοιχα.

Υπάρχει ζήτηση για μικρούς κινητήρες μόνιμου μαγνήτη κυρίως από κατασκευαστές περιφερειακών ηλεκτρονικών υπολογιστών, εξοπλισμού γραφείου, ιατρικών οργάνων, τεχνολογίας μετρήσεων, αυτοκινήτων και ρομπότ. Με βάση τα σημερινά δεδομένα, οι χώρες της Άπω Ανατολής, οι ΗΠΑ και η Ευρώπη θα παραμείνουν ως οι σημαντικότερες αγορές.

Η πρόοδος στα ηλεκτρονικά και την ποιότητα των μαγνητών έχει ξεπεράσει παρόμοιες βελτιώσεις στα αντίστοιχα μηχανικά συστήματα μετάδοσης, κάνοντας μηχανισμούς όπως τα κιβώτια ταχυτήτων περιοριστικούς παράγοντες στον έλεγχο της κίνησης. Ωστόσο, πάντα υπάρχει το θέμα του οικονομικού κόστους, το οποίο είναι ο κύριος παράγοντας για τον πελάτη. Ως ένα σύστημα κατασκευής προσανατολισμένο στο κόστος, η σχεδίαση μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή (computer aided design, CAD) είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο.

2.6 Εφαρμογές των κινητήρων μονίμων μαγνητών

Οι κινητήρες μονίμων μαγνητών χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος ισχύος, από μερικά mW έως την τάξη των MW. Έτσι καλύπτουν μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών, από βηματικούς κινητήρες για ρολόγια χειρός και βιομηχανικούς κινητήρες σε μηχανικά εργαλεία μέχρι μεγάλους σύγχρονους κινητήρες για την πρόωση πλοίων (φρεγάτες Πολεμικού Ναυτικού, κρουαζιερόπλοια, φορτηγά πλοία και παγοθραυστικά). Τα πεδία εφαρμογής των ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών περιλαμβάνουν:

- Την βιομηχανία: αντλίες, ανεμιστήρες, συμπιεστές, μύλοι, εργαλεία, σερβοκινητήρες, αυτοματισμοί, ρομπότ, εσωτερικά συστήματα μεταφοράς.
- Δημόσια ζωή: συστήματα κλιματισμού, αυτόματοι πωλητές, εκδοτικές μηχανές, ρολόγια, πάρκα διασκέδασης.
- Ιδιωτική ζωή: συσκευές κουζίνας και μπάνιου, πλυντήρια, ηλεκτρικές σκούπες, παιχνίδια, εξοπλισμός εικόνας/ήχου, γκαραζόπορτες.
- Εξοπλισμός πληροφορικής και γραφείου: Η/Υ, εκτυπωτές, σαρωτές, φωτοτυπικά μηχανήματα.
- Συμβατικά αυτοκίνητα: κινητήρες υαλοκαθαριστήρων, αντλίες καυσίμων, ηλεκτρικά παράθυρα κοκ.
- Μεταφορές: ανελκυστήρες, τρένα, τραμ, ηλεκτρικά αυτοκίνητα, ηλεκτρικά πλοία.

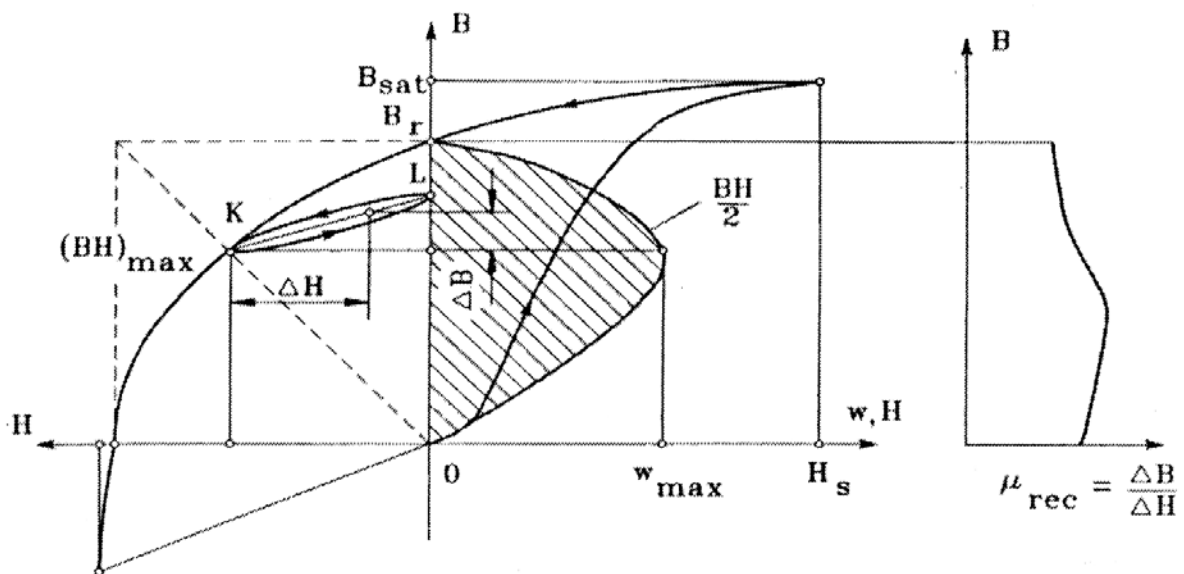
- Ιατρικός εξοπλισμός: τροχός οδοντίατρου, εξοπλισμός αποκατάστασης ΚΟΚ.
- Ηλεκτρικά εργαλεία: τρυπάνια, κατσαβίδια, τροχοί, πριόνια.
- Συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- Εξοπλισμός έρευνας και εξερεύνησης.

2.7 Υλικά και κυκλώματα μόνιμων μαγνητών

2.7.1 Καμπύλη απομαγνήτισης και μαγνητικές παράμετροι

Ένας μόνιμος μαγνήτης παράγει μαγνητικό πεδίο στο διάκενο χωρίς τύλιγμα διέγερσης και χωρίς απώλειες ηλεκτρικής ισχύος. Εξωτερική ενέργεια απαιτείται μόνο στην μεταβολή της ενέργειας του μαγνητικού πεδίου και όχι στην διατήρησή του. Όπως κάθε άλλο φερρομαγνητικό υλικό, ένας μόνιμος μαγνήτης μπορεί να περιγραφεί από τον βρόχο υστέρησης του. Οι μόνιμοι μαγνήτες αποκαλούνται επίσης σκληρά μαγνητικά υλικά, εννοώντας τα φερρομαγνητικά υλικά με μεγάλο βρόχο υστέρησης.

Η βάση για την μελέτη ενός μόνιμου μαγνήτη είναι το κομμάτι του βρόχου υστέρησης που βρίσκεται στο δεύτερο τεταρτημόριο, που ονομάζεται καμπύλη απομαγνήτισης. Εάν μια αντίστροφη ένταση μαγνητικού πεδίου εφαρμοστεί σε ένα προηγούμενως μαγνητισμένο υλικό, η πυκνότητα μαγνητικής ροής του μειώνεται (σημείο K). Όταν η αντίστροφη ένταση αφαιρεθεί, η πυκνότητα ροής επιστρέφει στο αρχικό σημείο L σύμφωνα με έναν βρόχο υστέρησης.



Σχήμα 2.1: Καμπύλη απομαγνήτισης και βρόχος υστέρησης μόνιμου μαγνήτη.

Δύο κύρια χαρακτηριστικά των μόνιμων μαγνητών είναι:

- η παραμένουσα πυκνότητα μαγνητικής ροής B_r , η οποία αντιστοιχεί σε μηδενική ένταση μαγνητικού πεδίου. Εάν αυτή είναι υψηλή ο μαγνήτης μπορεί να δεχθεί υψηλότερη πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο του μαγνητικού κυκλώματος.
- Το πεδίο επαναφοράς ή συνέχουσα δύναμη H_c , δηλαδή το μέγεθος της έντασης πεδίου που χρειάζεται για να μηδενίσει την πυκνότητα μαγνητικής ροής σε ένα προηγουμένως μαγνητισμένο υλικό. Υψηλή τιμή του H_c σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί λεπτότερος μαγνήτης που να αντέχει στο πεδίο απομαγνήτισης.

2.7.2 Ιδιότητες των μόνιμων μαγνητών

Υπάρχουν τρία είδη υλικών μόνιμων μαγνητών που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικούς κινητήρες:

- Alnico (αλουμίνιο, νικέλιο, κοβάλτιο, σίδηρος).
- Φερρίτες, π.χ. φερρίτης βαρίου $BaO_x6Fe_2O_3$ και φερρίτης στροντίου $SrO_x6Fe_2O_3$.
- Σπάνιες γαίες, π.χ. σαμάριο - κοβάλτιο $SmCo$ και νεοδύμιο - σίδηρος - βόριο $NdFeB$.

2.7.2.1 Alnico

Τα κύριο πλεονεκτήματα του Alnico είναι η υψηλή παραμένουσα πυκνότητα μαγνητικής ροής και οι χαμηλοί θερμοκρασιακοί συντελεστές. Ο θερμοκρασιακός συντελεστής του B_r είναι $-0,02\%/^{\circ}\text{C}$ και η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας οι 520°C . Αυτά τα πλεονεκτήματα επιτρέπουν υψηλή πυκνότητα μαγνητικής ροής σε υψηλές θερμοκρασίες. Δυστυχώς, το Alnico απομαγνητίζεται πολύ εύκολα. Κυριάρχησε ως υλικό στην αγορά των κινητήρων μονίμων μαγνητών με ισχύ μέχρι 150kW από την δεκαετία του 1940 μέχρι την δεκαετία του 1960, όταν οι φερρίτες έγιναν τα περισσότερο χρησιμοποιούμενα υλικά.

2.7.2.2 Φερρίτες

Οι φερρίτες βαρίου και στροντίου εφευρέθηκαν την δεκαετία του 1950. Έχουν υψηλότερο H_c από το Alnico, και ταυτοχρόνως μικρότερη μόνιμη πυκνότητα μαγνητικής ροής. Οι θερμοκρασιακοί συντελεστές είναι σχετικά υψηλοί, $-0,2\%/^{\circ}\text{C}$ για το B_r και $-0,27\%/^{\circ}\text{C}$ για το H_c . Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας είναι οι 400°C . Τα κύρια πλεονεκτήματα των φερριτών είναι το χαμηλό κόστος και η πολύ υψηλή ηλεκτρική αντίσταση, που πρακτικά μηδενίζει τις απώλειες δινορρευσμάτων στην μηχανή. Οι κινητήρες με μαγνήτες φερρίτη είναι οικονομικότεροι από τους αντίστοιχους με Alnico για ισχύ περίπου μέχρι $7,5\text{kW}$. Μόνιμοι μαγνήτες από φερρίτη βαρίου χρησιμοποιούνται συνήθως σε μικρούς κινητήρες ΣΡ για αυτοκίνητα (ανεμιστήρες, μοτέρ υαλοκαθαριστήρων, αντλίες) και ηλεκτρικά παιχνίδια.

2.7.2.3 Μαγνήτες σπάνιων γαιών

Τις τρεις τελευταίες δεκαετίες έχει σημειωθεί μεγάλη πρόοδος σχετικά με την διαθέσιμη πυκνότητα ενέργειας χάρη στην ανάπτυξη των μαγνητών σπάνιων γαιών. Οι σπάνιες γαίες αντίθετα με το τι υπονοεί το όνομά τους, γενικά δεν είναι καθόλου σπάνιες, αλλά απαντώνται στην φύση σε μια ποικιλία μιγμάτων. Για να παραχθεί ένα τέτοιο μέταλλο, πρέπει να αφαιρεθούν πρώτα άλλα για τα οποία δεν υπάρχει καμία εμπορική εφαρμογή.

Η πρώτη γενιά αυτών των νέων κραμάτων βασίστηκε στο SmCo_5 , που εφευρέθηκε την δεκαετία του 1960 και παράγεται από τις αρχές της δεκαετίας του 1970. Σήμερα είναι ένα εδραιωμένο σκληρό μαγνητικό υλικό. Έχει το πλεονέκτημα της υψηλής παραμένουσας πυκνότητας ροής, του υψηλού H_c , της γραμμικής καμπύλης απομαγνήτισης και των χαμηλών θερμοκρασιακών

συντελεστών (0,03-0,045%/°C για το B_r , 0,14-0,4%/°C για το H_c). Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας είναι μεταξύ 300 και 350°C. Είναι κατάλληλο για κινητήρες μικρού όγκου και μεγάλης πυκνότητας ισχύος. Το μόνο μειονέκτημα είναι το κόστος, επειδή τόσο το samáριο όσο και το κοβάλτιο είναι ακριβά λόγω της περιορισμένης προσφοράς.

Με την ανακάλυψη τα τελευταία χρόνια της δεύτερης γενιάς μαγνητών σπάνιων γαιών με βάση το φτηνό νεοδύμιο (Nd), επιτεύχθηκε αξιοσημείωτη πρόοδος στην μείωση των τιμών των πρωτογενών υλικών. Το νεοδύμιο είναι πολύ πιο κοινό στοιχείο από το samáριο. Οι μαγνήτες NdFeB, οι οποίοι παράγονται σε αυξανόμενες ποσότητες, έχουν καλύτερες μαγνητικές ιδιότητες από το SmCo, αλλά δυστυχώς μόνο σε θερμοκρασία δωματίου. Η καμπύλη απομαγνήτισης και ιδιαίτερα το H_c εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την θερμοκρασία. Ο θερμοκρασιακός συντελεστής του B_r είναι -0,09 έως -0,15%/°C και για το H_c -0,4 έως -0,8%/°C. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας είναι 250°C. Το NdFeB επίσης είναι ευπαθές στην διάβρωση, γι' αυτό χρησιμοποιούνται επικαλύψεις από μέταλλο ή ρητίνη.

Οι μαγνήτες NdFeB έχουν την δυναμική να μειώσουν τον λόγο επίδοσης/κόστους για πολλές εφαρμογές. Για τον λόγο αυτό θα έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην ανάπτυξη και την εφαρμογή κινητήρων μονίμων μαγνητών στο μέλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ ΠΛΟΙΩΝ

3.1 Κίνητρα για την επιλογή της ηλεκτρικής πρόωσης σε πλοίο

Η ηλεκτρική πρόωση πλοίων δεν είναι μια νέα έννοια, η πρώτη ιδέα γεννήθηκε πάνω από 100 χρόνια πριν. Όμως, με την δυνατότητα ελέγχου ηλεκτρικών κινητήρων με μεταβλητή ταχύτητα σε μεγάλο εύρος ισχύος με συμπαγή, αξιόπιστα και οικονομικά συστήματα, η χρήση της ηλεκτρικής πρόωσης εμφανίστηκε σε νέες εφαρμογές μόνο μετά την δεκαετία του 1980.

Η ηλεκτρική πρόωση 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 εφαρμογών σε υποβρύχια και 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 την διατήρηση θέσης έχουν συγχωνευτεί ώστε να χρησιμοποιούνται βέλτιστα οι εγκατεστημένες μονάδες πρόωσης.

Η ηλεκτρική πρόωση εφαρμόζεται κυρίως στους ακόλουθους τύπους πλοίων: κρουαζιερόπλοια, φέρι μποτ, σκάφη γεωτρήσεων, τάνκερ, παγοθραυστικά και πολεμικά πλοία. Επίσης διεξάγεται σημαντική έρευνα για την χρήση της ηλεκτρικής πρόωσης σε νέα σχέδια σκαφών για υπάρχοντα και νέα πεδία εφαρμογών.

Τα ακόλουθα χαρακτηριστικά συνοψίζουν τα κύρια πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής πρόωσης σε αυτούς τους τύπους σκαφών [6]:

- Βελτιωμένο κόστος στο σύνολο του κύκλου ζωής λόγω μειωμένης κατανάλωσης καυσίμου και συντήρησης, ιδιαίτερα όταν υπάρχει μεγάλη μεταβλητότητα του φορτίου.
- Μειωμένη ευαισθησία σε βλάβες και δυνατότητα να βελτιστοποιηθεί το φορτίο των πρωτευόντων κινητήρων (ντίζελ ή αεριοστρόβιλοι).
- Χρήση ελαφρών κινητήρων ντίζελ μεσαίας ή μεγάλης ταχύτητας.
- Ο μικρότερος όγκος και η ευελιξία στην εκμετάλλευση του χώρου

αυξάνουν το ωφέλιμο φορτίο του πλοίου.

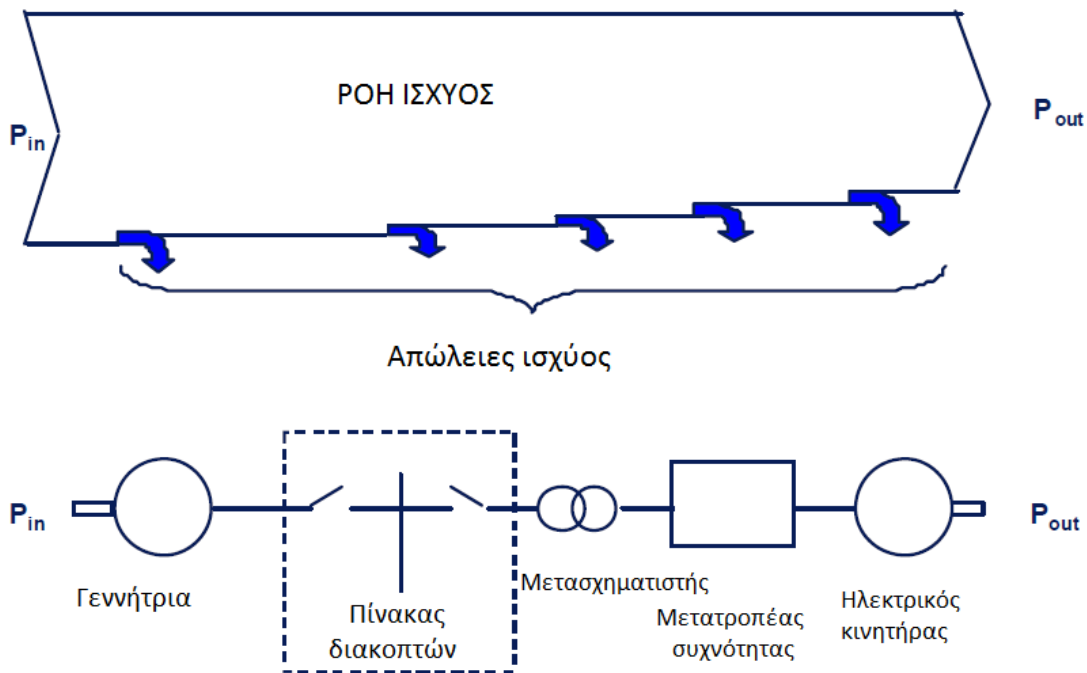
- Ευελιξία στην τοποθέτηση των κινητήρων επειδή τροφοδοτούνται με ισχύ μέσω καλωδίων, επομένως μπορούν να τοποθετηθούν ανεξάρτητα από την γεννήτρια.
- Βελτιωμένη ευκολία χειρισμού του σκάφους με την χρήση περιστρεφόμενων εξωλέμβιων κινητήρων.
- Λιγότερος θόρυβος και δονήσεις αφού οι άξονες μετάδοσης είναι κοντύτεροι, οι γεννήτριες λειτουργούν σε σταθερή ταχύτητα.

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

- Αυξημένο κόστος επένδυσης, το οποίο όμως αναθεωρείται συνεχώς καθώς το κόστος τείνει να μειώνεται όσο αυξάνονται οι μονάδες που παράγονται.
- Τα επιπλέον εξαρτήματα μεταξύ του πρωτεύοντος κινητήρα 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.

3.2 Ροή ισχύος και αποδοτικότητα

Σε κάθε απομονωμένο σύστημα, η ποσότητα της παραγόμενης ισχύος πρέπει να είναι ίση με την καταναλισκόμενη ισχύ συν τις απώλειες. Για ένα ηλεκτρικό σύστημα που αποτελείται από μια γεννήτρια, ένα σύστημα διανομής συμπεριλαμβανομένων των μετασχηματιστών διανομής και έναν κινητήρα μεταβλητής ταχύτητας, η ροή ισχύος απεικονίζεται στην εικόνα 3.1:



Σχήμα 3.1: Ροή ισχύος σε ένα απλοποιημένο σύστημα ηλεκτρικής ισχύος.

Οι πρωτεύοντες κινητήρες, συνήθως μηχανές ντίζελ ή αεριοστρόβιλοι, παρέχουν ισχύ στον άξονα της ηλεκτρικής γεννήτριας. Ο ηλεκτρικός κινητήρας, που μπορεί να είναι ο κινητήρας πρόωσης, έχει ως φορτίο την κίνηση της προπέλας. Η ισχύς που χάνεται στα μέρη μεταξύ του άξονα της μηχανής ντίζελ και του άξονα του ηλεκτρικού κινητήρα είναι μηχανικές και ηλεκτρικές απώλειες που παράγουν θερμότητα και αυξάνουν την θερμοκρασία στον εξοπλισμό και στο περιβάλλον του σκάφους.

Η ηλεκτρική απόδοση του παραπάνω συστήματος είναι:

$$\eta = \frac{P_{εξ}}{P_{εισ}} = \frac{P_{εξ}}{P_{εξ} + P_{απωλειών}} \quad (3.1)$$

Για κάθε ένα από τα εξαρτήματα μπορεί να υπολογιστεί η απόδοση, και οι τυπικές τιμές σε πλήρη ισχύ είναι:

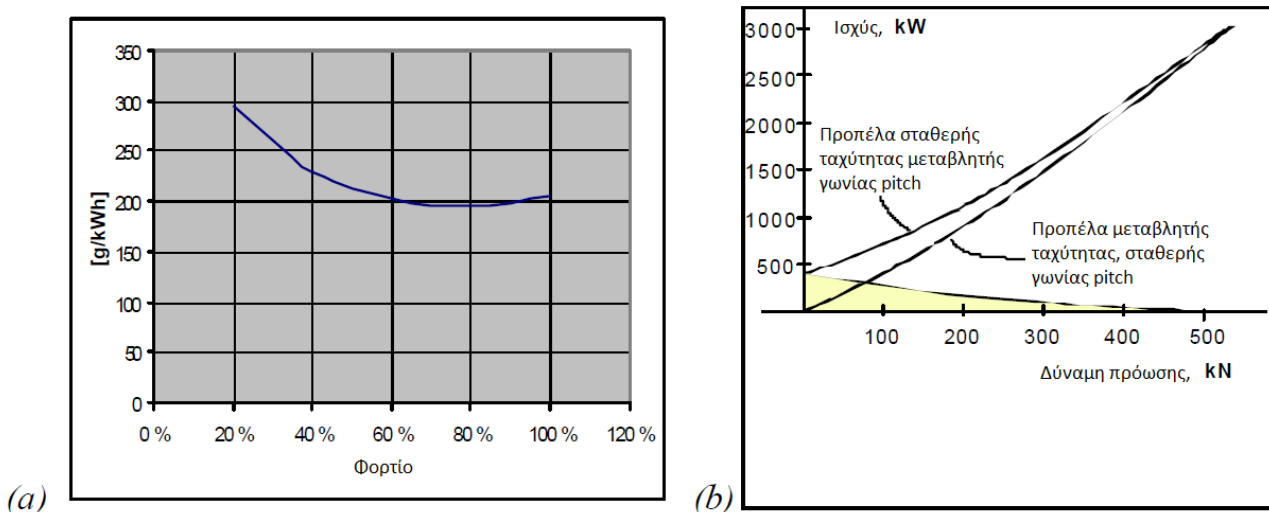
- για την γεννήτρια: $\eta=0,95-0,97$
- για τον πίνακα διακοπών: $\eta=0,999$
- για τον μετασχηματιστή: $\eta=0,99-0,995$
- για τον μετατροπέα συχνότητας: $\eta=0,98-0,99$
- για τον ηλεκτρικό κινητήρα: $\eta=0,95-0,97$

Επομένως, η απόδοση ενός ντιζελοηλεκτρικού συστήματος, από τον άξονα του κινητήρα ντίζελ στον άξονα του ηλεκτρικού κινητήρα, είναι συνήθως μεταξύ

0,88 και 0,92 σε πλήρες φορτίο. Η απόδοση εξαρτάται από το φορτίο του συστήματος.

Εφόσον τα επιπλέον μέρη μεταξύ του πρωτεύοντος κινητήρα και του άξονα της προπέλας σε ένα ντιζελοηλεκτρικό σύστημα πρόωσης συνεισφέρουν συνολικά περίπου 10% απώλειες, η δυνατότητα εξοικονόμησης καυσίμου δεν οφείλεται στην ηλεκτρική συνιστώσα. Πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η υδροδυναμική απόδοση μιας προπέλας ελεγχόμενης ταχύτητας σε σύγκριση με μια προπέλα σταθερής ταχύτητας ελεγχόμενης κλίσης πτερυγίων ή αλλιώς γωνίας *pitch* ή βήματος (controllable pitch propeller, CPP), και την κατανάλωση καυσίμου του πρωτεύοντος κινητήρα εγκατεστημένου σε ένα ντιζελοηλεκτρικό σύστημα με σταθερή ταχύτητα και υψηλό φορτίο, σε σύγκριση με ένα μηχανικό σύστημα πρόωσης με έντονα μεταβαλλόμενο φορτίο. Οι διαφορές μπορεί να είναι σημαντικές, ειδικά σε λειτουργίες χαμηλού φορτίου όπως οι ελιγμοί.

Η εικόνα 3.2 δείχνει την απόδοση καυσίμου μια τυπικής μηχανής ντιζελ μεσαίας ταχύτητας, και την σύγκριση ισχύος/δύναμης πρόωσης μιας προπέλας μεταβλητής ταχύτητας και μιας προπέλας ελεγχόμενης γωνίας *pitch*.

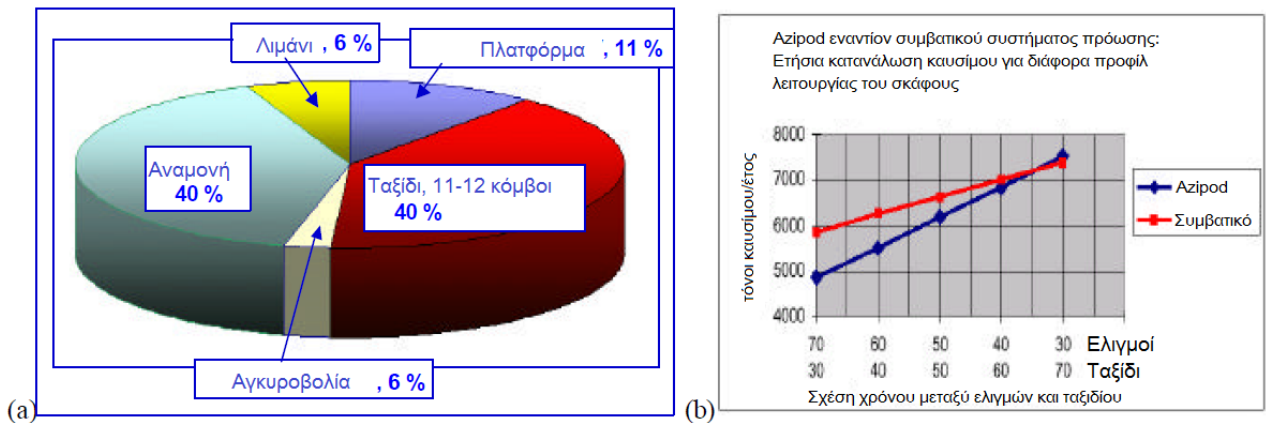


Σχήμα 3.2: (α) Ειδική κατανάλωση καυσίμου μηχανής ντιζελ.
(β) Χαρακτηριστικές ισχύος-πρόωσης προπέλας.

Οι υδροδυναμικές απώλειες μεταβάλλονται σημαντικά ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας για μια προπέλα ελεγχόμενου βήματος σε σύγκριση με μια προπέλα σταθερού βήματος (fixed pitch propeller, FPP) που χρησιμοποιείται κανονικά στην ηλεκτρική πρόωση πλοίων. Σε κατάσταση χαμηλού φορτίου οι υδροδυναμικές απώλειες μηδενικού φορτίου μιας CPP είναι κατά κανόνα ίσες με 15%, ενώ είναι σχεδόν μηδενικές για μια FPP.

Οι χαρακτηριστικές απόδοσης καυσίμου μιας μηχανής ντίζελ, η οποία έχει μέγιστη απόδοση για φορτίο μεταξύ 60% και 100%, συνεισφέρουν στην διαφορά κατανάλωσης ισχύος ενός παραδοσιακού μηχανικού συστήματος και ενός ντιζελοηλεκτρικού συστήματος πρόωσης. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να γίνεται από πολλές μικρές ντιζελομηχανές, ώστε για κάθε επίπεδο συνολικής παραγόμενης ισχύος όλες οι μηχανές να λειτουργούν στο βέλτιστο σημείο.

Για ένα συγκεκριμένο σκάφος, με το προφίλ λειτουργίας που φαίνεται στην εικόνα 3.3, υπολογίστηκε ότι η εξοικονόμηση καυσίμου λόγω της ντιζελοηλεκτρικής πρόωσης ήταν της τάξης των 700 τόνων ντίζελ ετησίως. Με μια τιμή περίπου 0,4 δολαρίων ανά λίτρο, η ετήσια εξοικονόμηση χρημάτων είναι 280000 δολάρια. Η εξοικονόμηση εξαρτάται πολύ από το προφίλ λειτουργίας του σκάφους, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.3 (b).



Σχήμα 3.3: (a) Προφίλ λειτουργίας του σκάφους
(b) Σύγκριση κατανάλωσης καυσίμου Azipod και συμβατικής μηχανικής πρόωσης

3.3 Ιστορία της ηλεκτρικής πρόωσης

Μετά τις μάλλον πειραματικές εφαρμογές της ηλεκτροπρόωσης με μπαταρία στα τέλη του 19ου αιώνα που έγιναν στην Ρωσία και την Γερμανία, η ηλεκτροπρόωση πρώτης γενιάς ήρθε στο προσκήνιο την δεκαετία του 1920 ως αποτέλεσμα του έντονου ανταγωνισμού για την αύξηση της ταχύτητας των υπερωκεάνιων επιβατικών πλοίων. Εκείνη την εποχή, υψηλή ισχύς πρόωσης μπορούσε να επιτευχθεί μόνο με ηλεκτρικές μηχανές. Το "S/S Normandie" ήταν ένα από τα πιο φημισμένα ηλεκτρικά πλοία. Γεννήτριες κινούμενες από ατμοστρόβιλο παρείχαν ηλεκτρική ισχύ σε στους σύγχρονους ηλεκτρικούς κινητήρες 29MW σε κάθε ένα από τους 4 άξονες. Η ταχύτητα περιστροφής οριζόταν από την ηλεκτρική συχνότητα των γεννητριών. Οι γεννήτριες συνήθως οδηγούσαν έναν κινητήρα η καθεμία, αλλά υπήρχε επίσης η δυνατότητα να

οδηγούνται δυο κινητήρες από μια γεννήτρια στις χαμηλότερες ταχύτητες ταξιδιού.

Με την εισαγωγή των οικονομικών και αποδοτικών μηχανών ντίζελ στα μέσα του 20ού αιώνα, η τεχνολογία του ατμοστροβίλου και της ηλεκτροπρόωσης εξαφανίστηκε από τα εμπορικά σκάφη μέχρι την δεκαετία του 1980.

Η ανάπτυξη των ηλεκτρικών συστημάτων μεταβλητής ταχύτητας, πρώτα με τον ανορθωτή AC/DC την δεκαετία του 1970 και μετά με τους μετατροπείς AC/AC τις αρχές της δεκαετίας του 1980 έκανε δυνατή την παραγωγή συστημάτων ηλεκτροπρόωσης με ντιζελογεννήτρια, που είναι η τυπική διάταξη της ηλεκτροπρόωσης δεύτερης γενιάς. Ένας σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σταθερής τάσης και συχνότητας αποτελούμενος από μια σειρά γεννητριών που τροφοδοτούν το ίδιο δίκτυο παρείχε την πρόωση όπως επίσης και την ηλεκτρική ενέργεια για όλα τα φορτία του πλοίου. Ο έλεγχος της πρόωσης γινόταν ελέγχοντας την ταχύτητα της προπέλας σταθερού βήματος. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιήθηκαν αρχικά σε ειδικά σκάφη όπως ερευνητικά πλοία και παγοθραυστικά, αλλά και σε κρουαζιερόπλοια. Το "S/S Queen Elizabeth II" δέχθηκε μετατροπή με σύστημα ηλεκτροπρόωσης στα μέσα της δεκαετίας του 1980, και ακολουθήθηκε από διάφορα άλλα κρουαζιερόπλοια και τάνκερ.

Η εξωλέμβια πρόωση εισήχθη στις αρχές της δεκαετίας του 1990, όπου ο ηλεκτρικός κινητήρας εγκαθίσταται απευθείας στην προπέλα σταθερού pitch μέσα σε έναν υποβρύχιο περιστρεφόμενο φορέα. Ενώ αυτή η διάταξη αρχικά αναπτύχθηκε για να βελτιώσει την επίδοση των παγοθραυστικών, διαπιστώθηκε σύντομα ότι έχει πλεονεκτήματα στην υδροδυναμική απόδοση και την ευελιξία του σκάφους. Μετά την πρώτη εφαρμογή στο κρουαζιερόπλοιο "M/S Elation", τα πλεονεκτήματα ήταν τόσο πειστικά που η εξωλέμβια πρόωση έγινε δεδομένη για τα νέα κρουαζιερόπλοια σχεδόν άμεσα.



Σχήμα 3.4: Το κρουαζιερόπλοιο “M/S Elation” (κάτω δεξιά) εξοπλισμένο με Azipod έχει περισσότερο ελεύθερο χώρο σε σχέση με άλλα αντίστοιχα πλοία, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλους σκοπούς, όπως π.χ. επεξεργασία λυμάτων.

3.4 Εφαρμογές

3.4.1 Επιβατηγά σκάφη – Κρουαζιερόπλοια και φέρι μποτ

Τα επιβατηγά σκάφη έχουν απαιτήσεις για άνεση σχετικές με τον θόρυβο και τις δονήσεις. Επίσης η αξιοπιστία είναι πολύ σημαντική για την ασφάλεια των επιβατών και του σκάφους. Ως αποτέλεσμα, 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 και 10%.

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

3.4.2 Εξόρυξη πετρελαίου και φυσικού αερίου: Μονάδες γεώτρησης, τάνκερ

Τα σκάφη αυτού του τύπου έχουν μεγάλη ισχύ πρόωσης, τυπικά 20-50 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.

3.4.3 Γιοτ και σκάφη αναψυχής

Μια μικρή περιοχή εφαρμογή της ηλεκτροπρόωσης είναι η αγορά των γιοτ. Η άνεση και η φιλικότητα προς το περιβάλλον είναι βασικά κριτήρια σχεδίασης για αυτά τα πλοία, και για αυτούς τους λόγους η ηλεκτροπρόωση χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο. Η εγκατεστημένη ισχύς πρόωσης είναι της τάξης των 500kW με 2MW, και για μεγαλύτερα πλοία ακόμη υψηλότερη.

3.4.4 Παγοθραυστικά

Οι απαιτήσεις για μετατροπείς συχνότητας στις εφαρμογές πρόωσης είναι χαμηλές σε σχέση με άλλες βιομηχανικές εφαρμογές. Αλλά στα παγοθραυστικά πλοία, οι μεταβολές του φορτίου μπορεί να είναι σημαντικές και γρήγορες, επομένως 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 5-55MW, ανάλογα με τις δυνατότητες του σκάφους.

3.4.5 Πολεμικά πλοία

Υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον στην εφαρμογή της ηλεκτροπρόωσης σε πολεμικά πλοία, και έχουν κατασκευαστεί ήδη αρκετά 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 είναι συνήθως αυστηρότερες. Επίσης, η δυνατότητα αντοχής κραδασμών και ο χαμηλός παραγόμενος

θόρυβος είναι προαπαιτούμενα για την εφαρμογή της ηλεκτροπρόωσης σε ένα πολεμικό πλοίο.

3.4.6 Ερευνητικά πλοία

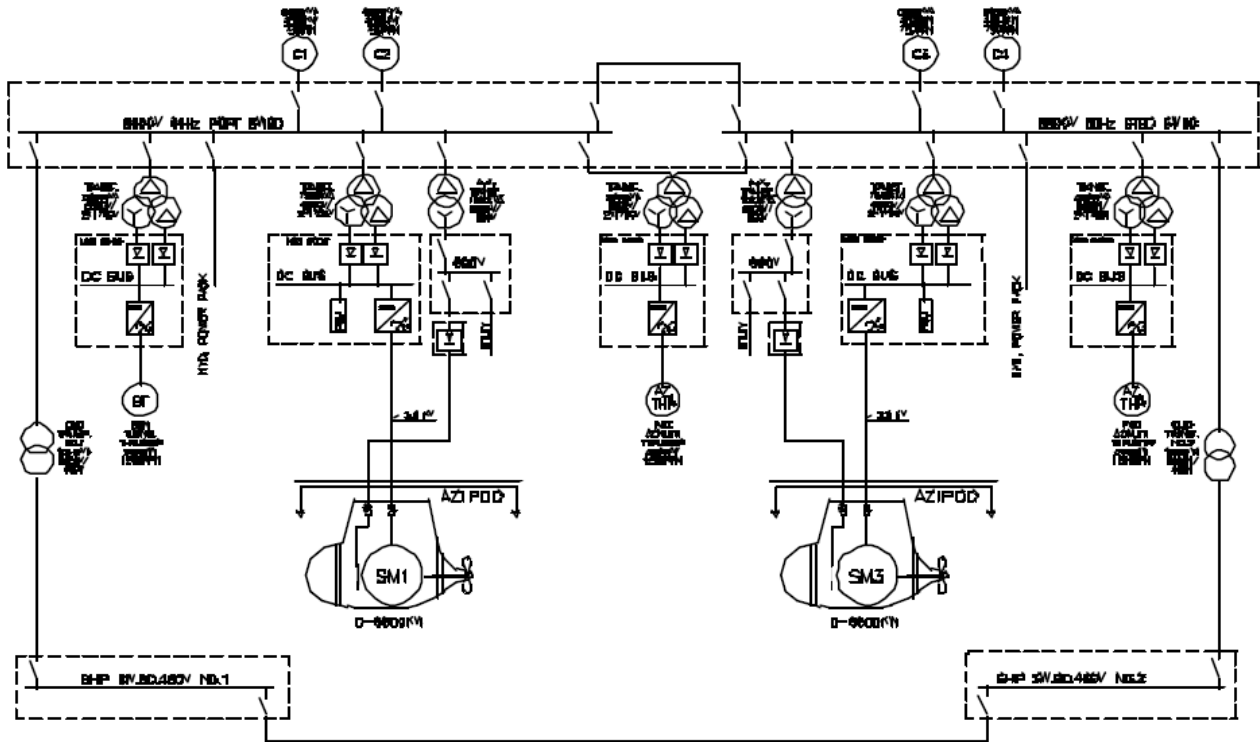
Γεωτεχνικά ερευνητικά πλοία, ωκεανογραφικά και σκάφη αλιευτικής έρευνας έχουν πολύ αυστηρές απαιτήσεις για χαμηλό υποβρύχιο θόρυβο, τυπικά αρκετές δεκάδες dB κάτω από τα επίπεδα άλλων εφαρμογών. Αυτό παραδοσιακά επιτυγχάνονταν με την χρήση άμεσης πρόωσης με κινητήρες ΣΡ, με ειδικές προβλέψεις για φιλτράρισμα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

3.5 Σύστημα ηλεκτρικής ισχύος πλοίου

3.5.1 Εισαγωγή

Η κύρια διαφορά μεταξύ ενός επίγειου συστήματος ηλεκτρικής ισχύος κι ενός 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 υψηλά ρεύματα βραχυκύκλωσης πρέπει να αντιμετωπιστούν με ασφάλεια. Το σύστημα ελέγχου στα επίγεια συστήματα είναι διαιρεμένο σε αρκετά υποσυστήματα, ενώ στο σκάφος υπάρχει η δυνατότητα για περισσότερη ενσωμάτωση.

Η εικόνα 3.5 δείχνει το μονογραμμικό σχέδιο της εγκατάστασης ενός πλοίου με ηλεκτροπρόωση:



Σχήμα 3.5: Μονογραμμικό σχέδιο εγκατάστασης πλοίου με Azipod. G1-G4: γεννήτριες, SWBD: Πίνακας διακοπών, TRANSF: μετασχηματιστής, AZ THR: Περιστρεφόμενος προωστήρας, AZIPOD: Αζιμουθιακός προωστήρας

3.5.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος

3.5.2.1 Κύριος κινητήρας

Η πηγή της ισχύος είναι συνήθως ένα 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 σκάφη, ή όπου το φυσικό αέριο είναι ένα φτηνό 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.

3.5.2.2 Γεννήτριες

Η πλειοψηφία των νέων σκαφών έχει έναν σταθμό παραγωγής ενέργειας και δίκτυο διανομής εναλλασσόμενης τάσης. Οι γεννήτριες είναι σύγχρονες

μηχανές, με το τύλιγμα διέγερσης στον 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 του αριθμού των πόλων p :

$$f = \frac{p \times n}{120} \quad (3.2)$$

3.5.3 Διανομή ηλεκτρικής ισχύος

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

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

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 (690V) συνήθως χρησιμοποιούνται σε πολύ υψηλότερα επίπεδα ισχύος από τα 300kW. Πρέπει πρώτα να ληφθούν υπ' όψιν το ρεύμα φορτίου και τα χαρακτηριστικά εκκίνησης του κινητήρα.
- Η διανομή 440V είναι αρκετά κοινή στις εγκαταστάσεις πλοίων. Πολλά είδη εξοπλισμού είναι διαθέσιμα μόνο στα 440V, που σημαίνει ότι είναι δύσκολο να αποφευχθεί αυτό το επίπεδο τάσης στις εφαρμογές αυτές.

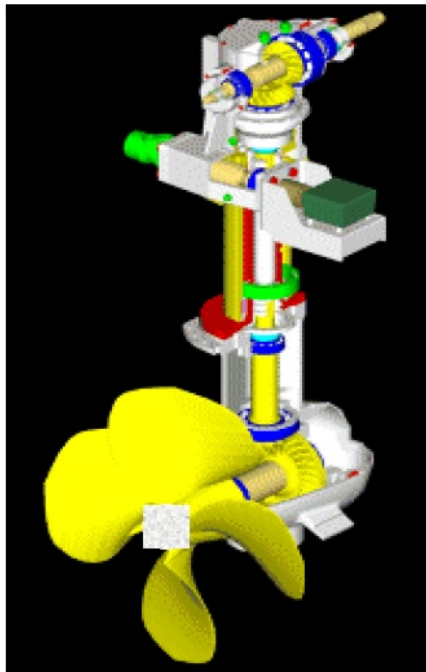
3.5.4 Μονάδες πρόωσης

3.5.4.1 Πρόωση με άξονα

Σε ένα ντιζελοηλεκτρικό σύστημα πρόωσης με προπέλα στον άξονα, οι προπέλες συνήθως οδηγούνται από κινητήρες μεταβλητής ταχύτητας. Οι κινητήρες μπορεί να είναι συνδεδεμένοι απευθείας 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.

3.5.4.2 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.



Σχήμα 3.6: Παράδειγμα περιστρεφόμενου προωστήρα, που απεικονίζει μέρη όπως η προπέλα, οι άξονες και τα γρανάζια.

3.5.4.3 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 (pod) 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 εταιρεία έχει παραδώσει πάνω από 250 μονάδες.

Η εικόνα 3.7 δείχνει τον ηλεκτρικό κινητήρα που βρίσκεται στον κλειστό και συμπαγή φορέα. Η προπέλα σταθερού βήματος είναι τοποθετημένη απευθείας στον άξονα. Έτσι 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.

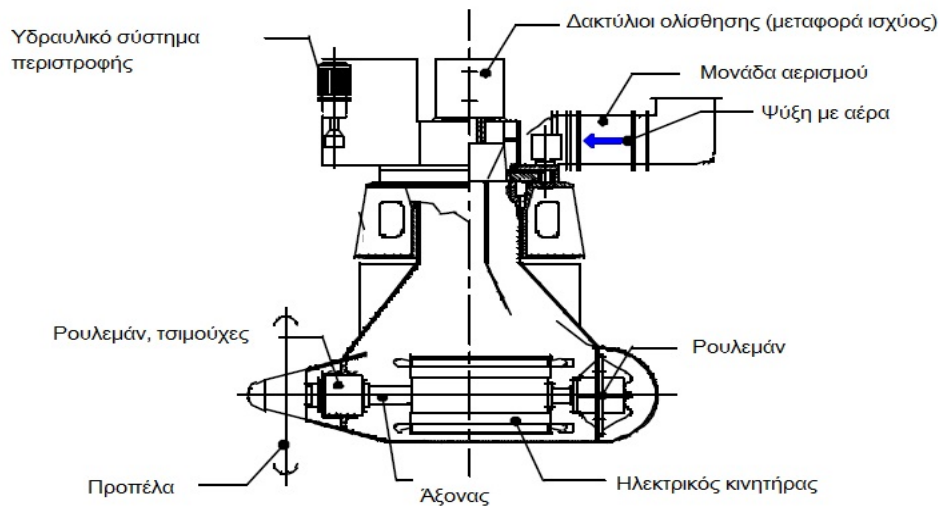
Ο φορέας μπορεί να σχεδιαστεί για λειτουργία ώθησης ή έλξης. Η μονάδα πρόωσης μπορεί να περιστραφεί και στις δύο φορές. Η προπέλα συνήθως είναι βελτιστοποιημένη μόνο για μια φορά περιστροφής, αλλά έχει μια μειωμένη ικανότητα αντίθετης ώθησης χωρίς τους μηχανικούς περιορισμούς του προηγούμενου συστήματος.

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 1MW και 25MW. Οι μεγαλύτερες μονάδες παρέχουν πρόσβαση μέσα στον φορέα για επιθεώρηση.

Συνοψίζοντας τα κύρια πλεονεκτήματα των Azipod έναντι των άλλων συστημάτων ηλεκτροπρόωσης είναι τα εξής ^[6]:

- Μειωμένες μηχανικές απώλειες λόγω της απευθείας μετάδοσης της κίνησης από τον άξονα του κινητήρα στην προπέλα χωρίς την 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 έμπροσθεν όσο και όπισθεν με σχεδόν την ίδια αποδοτικότητα.
- Μεγαλύτερη ευελιξία στην χωροθέτηση της γεννήτριας αφού ο κινητήρας βρίσκεται έξω από το κύτος.



Σχήμα 3.7: Μονάδα αζιμουθιακής πρόωσης.



Σχήμα 3.8: Προωστήρας Azipod έτοιμος για τοποθέτηση σε ναυπηγείο της Soviknes Verft.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ 4,5MW

4.1 Προδιαγραφές

Οι προδιαγραφές που επιλέχθηκαν για τον κινητήρα συμβαδίζουν με τις απαιτήσεις από τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτροπρόωσης με Azipod [6]. Πιο συγκεκριμένα:

- Η ισχύς επιλέχθηκε να είναι 4,5MW, επαρκής π.χ. για μικρά και μεσαία επιβατηγά πλοία με μέγιστη ταχύτητα πλεύσης 21 κόμβους.
- Ταχύτητα περιστροφής κινητήρα (και κατ' επέκταση της προπέλας) 200 ΣΑΛ.
- Τάση 690V, 50Hz. Τόσο χαμηλό επίπεδο τάσης είναι σύνηθες στα ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης πλοίων ακόμη και για κινητήρες ισχύος της τάξης των MW, ώστε να υπάρχουν χαμηλές απαιτήσεις μόνωσης.
- Επιπλέον, λόγω της εξωτερικής τοποθέτησης του κινητήρα απευθείας στην προπέλα, επιλέχθηκε να έχει εξωτερική διάμετρο το πολύ 1,5m, ούτως ώστε να μην εμποδίζει την ροή του νερού.

Επομένως η γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα είναι:

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60} = 2\pi \frac{200 \text{ ΣΑΛ}}{60} = 20,94 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (4.1)$$

και η ροπή:

$$T = \frac{P_m}{\omega} = \frac{4500000 \text{ W}}{20,94 \frac{\text{rad}}{\text{s}}} = 214900 \text{ Nm} \quad (4.2).$$

Συνοψίζοντας τις προδιαγραφές του κινητήρα προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

Ισχύς	4,5 MW
Ταχύτητα	200 ΣΑΛ
Τάση	690 V, 50Hz
Εξωτερική διάμετρος	<1,5 m
Ροπή	214,9 kNm

Πίνακας 4.1: Προδιαγραφές κινητήρα.

4.2 Βασικά μεγέθη διαστασιολόγησης

Η σωστή διαστασιολόγηση ενός ηλεκτρικού κινητήρα γίνεται ελέγχοντας τις τιμές βασικών μαγνητικών, ηλεκτρικών και θερμικών μεγεθών. Πιο συγκεκριμένα [8]:

1. Την ειδική μαγνητική φόρτιση \bar{B} , που συνδέει τον αριθμό των πόλων p με τη ροή ανά πόλο Φ και την επιφάνεια του διακένου, σύμφωνα με την σχέση:

$$\bar{B} = \frac{p\Phi}{\pi DL} \quad (4.3)$$

όπου D η διάμετρος του διακένου και L το ενεργό μήκος της μηχανής. Τυπικές τιμές της παραμέτρου αυτής είναι 0,5T-0,6T, ώστε να αποφεύγεται ο κορεσμός του μαγνητικού κυκλώματος.

2. Την ειδική ηλεκτρική φόρτιση ac , η οποία προσδιορίζεται από την ενεργό τιμή των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο περιφέρειας του διακένου, σύμφωνα με την σχέση:

$$ac = \frac{3 \times 2 N_s I}{\pi D} \quad (4.4)$$

Τυπικές τιμές είναι 15000 έως 45000 Αε/m για τις σύγχρονες μηχανές, οι οποίες επιδρούν στις απώλειες χαλκού και στην επαγωγική αντίδραση των τυλιγμάτων.

Αν ληφθεί υπόψη ότι :

α. η ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης E δίνεται από τη σχέση :

$$E = 4,44 k_w f N_s \Phi \quad (4.5)$$

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

β. η φαινόμενη ισχύς της μηχανής δίνεται από τη σχέση :

$$S = 3 E I \quad (4.6)$$

όπου I το ρεύμα φάσης.

γ. η ηλεκτρική συχνότητα f συνδέεται με τη μηχανική συχνότητα περιστροφής n σύμφωνα με την σχέση:

$$f = \frac{p}{2} n \quad (4.7)$$

Σε συνδυασμό με τις προηγούμενες σχέσεις προκύπτει ότι :

$$S = 1,11 k_w \pi^2 \bar{B} a c D^2 L n \quad (4.8)$$

Η τελευταία σχέση συνδέει τα δύο βασικά μεγέθη της διαστασιολόγησης -ειδική ηλεκτρική και ειδική μαγνητική φόρτιση - με την ονομαστική φαινόμενη ισχύ της μηχανής.

3. Την οριακή τάση διακένου, η οποία αποτελεί βασικό μέγεθος της μηχανικής αντοχής της γεννήτριας, το οποίο δεν πρέπει να λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες των 10 tn/cm^2 . Το μέγεθος αυτό προσδιορίζεται, αν διαιρέσουμε τη φυγόκεντρο δύναμη του δρομέα που δίνεται από τη σχέση :

$$F = m \omega_{rm}^2 R \quad (4.9)$$

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

Με δεδομένο το εμβαδόν του διακένου :

$$A = \pi D L \quad (4.10)$$

προκύπτει ότι :

$$\text{Οριακή Τάση Διακένου} = \frac{F}{A} \quad (4.11)$$

4. Την πυκνότητα ρεύματος τυλίγματος. Αποτελεί βασικό ηλεκτρικό μέγεθος της μηχανής που σχετίζεται άμεσα με τη θερμική της ισορροπία, καθώς από την πυκνότητα ρεύματος εξαρτώνται οι απώλειες των τυλιγμάτων, οι οποίες προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας των μονώσεων και των λοιπών υλικών της. Αν ξεπεραστεί ένα δεδομένο όριο θερμοκρασίας, μπορεί να μειωθεί η διηλεκτρική αντοχή των μονώσεων ή σε ακόμη πιο σπάνιες περιπτώσεις να οδηγηθούν σε τήξη κάποια υλικά της γεννήτριας. Αν η πυκνότητα του ρεύματος ξεπεράσει τα $3,5 - 4 \text{ A/mm}^2$, χρειάζεται εξαναγκασμένη ψύξη, η οποία - ανάλογα με τις ανάγκες - μπορεί να είναι τεχνητός αερισμός, κλειστό κύκλωμα νερού στο

στάτη ή υγρού υδρογόνου στο δρομέα για μεγάλες ισχύεις. Ιδιαίτερα στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας η θερμική ισορροπία εξαρτάται από τις δυνατότητες αερισμού. Ο υπολογισμός της απαιτούμενης ποσότητας αέρα Q σε m^3/sec εξαρτάται από την ισχύ απωλειών $P_{απ}$ σε μονάδες kW, από τη θερμοκρασιακή αύξηση της μηχανής $\theta_{μχ}$ σε °C, από τη θερμοκρασία της κρύας μηχανής $\theta_{κρ}$ σε °C και από την πίεση H σε mmHg σύμφωνα με τη σχέση :

$$Q = 0,78 \frac{P_{απ}}{\theta_{μχ}} \frac{\theta_{κρ} + 273}{273} \frac{760}{H} \quad (4.12)$$

5. Την αναλογία διαστάσεων D και L για βελτιστοποίηση χαλκού και σιδήρου. Συγκεκριμένα για μικρές μηχανές ισχύει $D \approx L$, ενώ για μεγάλες γεννήτριες - όπως μεγάλες μονάδες παραγωγής - η διάμετρος διακένου περιορίζεται σε $D \approx 1m$ για διπολικές μηχανές και $D \approx 2m$ για τετραπολικές. Σε αργόστροφες μηχανές μπορεί αυτό το κριτήριο να μην εφαρμοστεί. Τα πιο πάνω μεγέθη αποτελούν βασικούς παράγοντες διαστασιολόγησης της μηχανής που πρόκειται να κατασκευαστεί.

4.3 Προκαταρκτική σχεδίαση

Με βάση τις βασικές προδιαγραφές που διατυπώθηκαν παραπάνω, γίνεται η προκαταρκτική σχεδίαση του κινητήρα, η οποία αφορά την διαστασιολόγηση του διακένου, τον καθορισμό της διαμόρφωσης του δρομέα και του στάτη και τον υπολογισμό των ειδικών φορτίσεων (μαγνητικής και ηλεκτρικής).

4.3.1 Διαστασιολόγηση διακένου

Η ροπή διακένου T_e συνδέεται με τη μέση εφαπτομενική πίεση των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο P_t και με την επιφάνεια του διακένου A με τις εξής εξισώσεις:

$$F_t = P_t A \quad (4.13)$$

$$T_e = \frac{1}{2} D F_t \quad (4.14)$$

$$T_e = \frac{\pi}{2} D^2 L P_t \quad (4.15),$$

όπου D και L η διάμετρος και το μήκος του διακένου, αντίστοιχα.

Η δύναμη του διακένου δίνεται από την σχέση:

$$F_t = L \oint B_n H_t dc = \frac{L}{\mu_0} \oint B_n B_t dc \quad (4.16)$$

όπου B_n και B_t η εφαπτομενική και η κάθετη συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο.

Άρα η μέση πίεση P_t είναι:

$$P_t = \frac{F_t}{A} = \frac{F_t}{\pi DL} = \frac{1}{\pi D \mu_0} \oint B_n B_t dc \quad (4.17)$$

Σε αυτό το σημείο θεωρούμε την ειδική μαγνητική φόρτιση ίση με:

$$\bar{B} = 0,7 T \quad (4.18)$$

και την γωνία της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο $\theta \approx 85^\circ$, εφόσον η ακτινική συνιστώσα υπερिशύει της εφαπτομενικής. Επομένως:

$$P_t = \frac{1}{\pi D \mu_0} \oint B_n B_t dc = \frac{\bar{B} \sin(\theta) \bar{B} \cos(\theta) \pi D}{\pi D \mu_0} = \frac{0,7^2 * \sin(85^\circ) * \cos(85^\circ)}{4\pi * 10^{-7}} = 33855 \frac{N}{m^2} \quad (4.19)$$

Λόγω του περιορισμού για εξωτερική διάμετρο το πολύ 1,5m, επιλέγεται η διάμετρος του διακένου να είναι:

$$D = 1,25 m \quad (4.20)$$

Έτσι το ενεργό μήκος του κινητήρα προκύπτει:

$$L = \frac{2T_e}{\pi D^2 P_t} = \frac{2 \times 214900 Nm}{\pi \times (1,25 m)^2 \times 33855 \frac{N}{m^2}} = 2,586 m \quad (4.21)$$

Πλάτος διακένου

Το πλάτος του διακένου επηρεάζει σημαντικά τα χαρακτηριστικά μιας ηλεκτρικής μηχανής. Όσο μικρότερο είναι το πλάτος του διακένου, τόσο μικρότερος όγκος μόνιμου μαγνήτη ή ρεύμα διέγερσης απαιτείται για την παραγωγή δεδομένης ροπής. Ταυτόχρονα όμως αυξάνουν οι απώλειες δινορρευμάτων στην επιφάνεια του δρομέα και του στάτη. Παρ' όλο που το διάκενο έχει μεγάλη σημασία, δεν έχει υπολογιστεί θεωρητικό βέλτιστο για το πλάτος του. Αντίθετα, συνήθως χρησιμοποιούνται εμπειρικές εξισώσεις όπως οι παρακάτω [7]:

$$\delta(mm)=1,6\sqrt{D(m)}-0,25 \quad (4.22)$$

$$\text{ή } \delta(mm)=0,18+0,006\times P(W)^{0,4} \quad (4.23)$$

Για την περίπτωση των ηλεκτρικών κινητήρων για Azipods, οι συγκεκριμένοι τύποι δίνουν μικρές τιμές πλάτους. Λόγω των απαιτήσεων για υψηλή αντοχή σε κραδασμούς που έχουν οι εφαρμογές ηλεκτροπρόωσης πλοίων, μόνο μεγάλα πλάτη διακένου είναι κατάλληλα. Για κινητήρες υψηλής ισχύος για πρόωση πλοίων, ένας συμβιβασμός μεταξύ των αναγκών για επιδόσεις, σωστή διαστασιολόγηση και ανοχή στους κραδασμούς οδηγεί στον παρακάτω περιορισμό [9]:

$$4\text{mm} \leq \delta \leq 6\text{mm} \quad (4.24)$$

Με βάση τον περιορισμό αυτό για την μηχανή της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε το μέγιστο δυνατό πλάτος διακένου:

$$\delta = 6\text{mm} \quad (4.25)$$

4.3.2 Προσδιορισμός χαρακτηριστικών στάτη

Ο αριθμός των πόλων p προσδιορίζεται έτσι ώστε να είναι δυνατή η απευθείας σύνδεση της προπέλας στον άξονα του κινητήρα. Δεδομένου ότι έχει επιλεγθεί ταχύτητα περιστροφής της προπέλας ίση με 200 ΣΑΛ και ηλεκτρική συχνότητα 50Hz, ο αριθμός των πόλων του κινητήρα προκύπτει από την σχέση:

$$p = \frac{120 f}{n} = \frac{120 \times 50 \text{ Hz}}{200 \text{ rpm}} = 30$$

4.3.2.1 Τύλιγμα κινητήρα

Για τον κινητήρα αυτής της εργασίας επιλέχθηκε μη επικαλυπτόμενο συγκεντρωμένο τύλιγμα. Μη επικαλυπτόμενα συγκεντρωμένα ονομάζονται τα τυλίγματα τα οποία έχουν αριθμό αυλακιών ανά πόλο και φάση q μικρότερο της μονάδας και είναι συγκεντρωμένα γύρω από τα δόντια του στάτη, δηλαδή δεν επικαλύπτονται από το τύλιγμα του διπλανού δοντιού. Αυτός ο τύπος τυλίγματος έχει διάφορα πλεονεκτήματα που κάνουν την επιλογή του στην σχεδίαση μιας μηχανής ενδιαφέρουσα [3]:

- Έχουν πολύ μικρότερο μήκος μη ενεργών αγωγών σε σχέση με τα κατανεμημένα τυλίγματα. Ως αποτέλεσμα, οι απώλειες χαλκού είναι μικρότερες.
- Μπορούν να τοποθετηθούν πολύ εύκολα στα αυλάκια αφού τα μη ενεργά

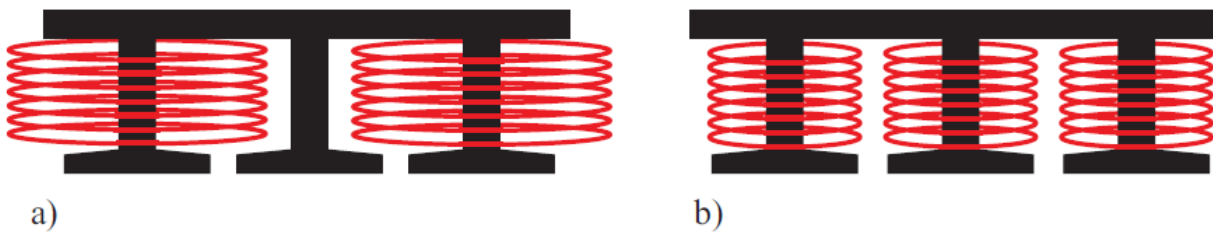
άκρα των τυλιγμάτων είναι μη επικαλυπτόμενα. Αυτό απλοποιεί την διαδικασία κατασκευής και μειώνει το κόστος.

- Κάποιες διαμορφώσεις τυλιγμάτων παρουσιάζουν μικρή διακύμανση στην ροπή.

Τα συγκεντρωμένα τυλίγματα όμως έχουν και κάποια μειονεκτήματα. Ο αριθμός των πόλων και των αυλακιών πρέπει να επιλεγθεί προσεκτικά, αλλιώς ο συντελεστής τυλίγματος μπορεί να είναι χαμηλός, η διακύμανση της ροπής και οι απώλειες στον δρομέα υψηλές και ο κινητήρας να είναι πολύ θορυβώδης.

α) Επιλογή αριθμού στρώσεων

Τα συγκεντρωμένα τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών μπορεί να είναι είτε μονής στρώσης ή διπλής στρώσης. Τα τυλίγματα μονής στρώσης έχουν πηνία τυλιγμένα ανά δύο δόντια, ενώ τα τυλίγματα διπλής στρώσης έχουν πηνία τυλιγμένα σε κάθε δόντι. Αυτό απεικονίζεται στην εικόνα 4.2:



Σχήμα 4.2: a) Τύλιγμα μονής στρώσης b) Τύλιγμα διπλής στρώσης

Η επιλογή του αριθμού των στρώσεων εξαρτάται κυρίως από την εφαρμογή. Στον πίνακα 4.3 συγκρίνονται κάποια χαρακτηριστικά των συγκεντρωμένων τυλιγμάτων μονής και διπλής στρώσης:

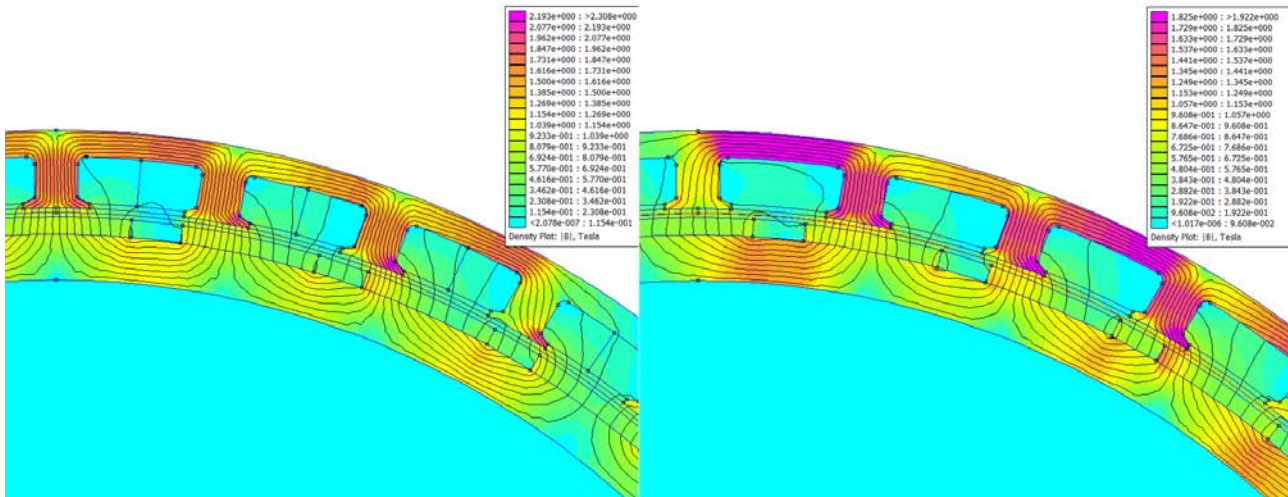
	Μονής στρώσης	Διπλής στρώσης
Θεμελιώδης συντελεστής τυλίγματος	υψηλότερος	χαμηλότερος
Μήκος μη ενεργών αγωγών	μεγαλύτερο	μικρότερο
Συντελεστής πληρότητας αυλακιών	υψηλότερος	χαμηλότερος
Αυτεπαγωγές	μεγαλύτερες	μικρότερες
Αμοιβαία επαγωγή	μικρότερη	μεγαλύτερη
ΗΕΔ	Πιο τραπεζοειδής	Πιο ημιτονοειδής
Αρμονικό περιεχόμενο της ΜΕΔ	υψηλότερο	χαμηλότερο
Απώλειες δινορρευσμάτων στον μόνιμο μαγνήτη	μεγαλύτερες	μικρότερες
Ικανότητα υπερφόρτισης	υψηλότερη	χαμηλότερη

Πίνακας 4.3: Σύγκριση μεταξύ συγκεντρωμένων τυλιγμάτων μονής και διπλής στρώσης.

Τα τυλίγματα μονής στρώσης προτιμούνται όταν απαιτείται υψηλή αντοχή στα σφάλματα επειδή οι φάσεις των τυλιγμάτων είναι θερμικά και ηλεκτρικά απομονωμένες, η αυτεπαγωγή είναι μεγάλη (κάτι που περιορίζει τα ρεύματα βραχυκύκλωσης), και η αμοιβαία επαγωγή είναι πολύ μικρή (κάτι που απομονώνει τις φάσεις μαγνητικώς). Λόγω της μεγαλύτερης τους επαγωγής, τα τυλίγματα μονής στρώσης επίσης προτιμώνται σε εφαρμογές που απαιτούν λειτουργία σταθερής ισχύος σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων. Αλλιώς, τα τυλίγματα διπλής στρώσης είναι προτιμότερα για περιορισμό των απωλειών και της διακύμανσης της ροπής. Επίσης, υπάρχουν περισσότεροι πιθανοί συνδυασμοί αριθμού πόλων και αυλακιών με τα τυλίγματα διπλής στρώσης σε σχέση με τα μονής στρώσης.

Για τον κινητήρα αυτής της εργασίας χρησιμοποιήθηκε τύλιγμα διπλής στρώσης, αφού κρίθηκαν προτιμότερες η μικρή διακύμανση της ροπής και οι χαμηλές απώλειες. Πράγματι, σε κάποιες πρώιμες προσομοιώσεις με το λογισμικό FEMM παρατηρήθηκε ότι για το ίδιο μαγνητικό κύκλωμα το τύλιγμα μονής στρώσης δίνει πολύ υψηλότερες τιμές μαγνητικής ροής, που οδηγεί σε κορεσμό του σιδήρου και υψηλές απώλειες. Επίσης, η εφαρμογή για την οποία προορίζεται ο κινητήρας δεν απαιτεί σταθερή ισχύ σε μεγάλο εύρος στροφών,

οπότε αυτό το πλεονέκτημα του τυλίγματος μονής στρώσης δεν κρίθηκε σημαντικό. Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε δύο στιγμιότυπα του ίδιου κινητήρα με τύλιγμα διπλής στρώσης (αριστερά) και μονής στρώσης (δεξιά). Είναι εμφανής ο κορεσμός του μαγνητικού κυκλώματος του δεύτερου κινητήρα:



Σχήμα 4.4: Σύγκριση μαγνητικού πεδίου κινητήρα με τύλιγμα διπλής στρώσης (αριστερά) και μονής στρώσης (δεξιά).

Άλλα μειονεκτήματα τα οποία έχει το τύλιγμα μονής στρώσης είναι οι αυξημένες απώλειες σιδήρου και η μεγάλη αρμονική παραμόρφωση της αντι-ΗΕΔ, όπως φαίνεται συνοπτικά στον πίνακα 4.5:

	Τύλιγμα διπλής στρώσης	Τύλιγμα μονής στρώσης
Μέγιστο B στον στάτη	1,76 T	1,92 T
Απώλειες σιδήρου	5078 W	5669 W
THD	11,61%	24,07%

Πίνακας 4.5: Σύγκριση τυλιγμάτων μονής και διπλής στρώσης.

β) Επιλογή αριθμού αυλακιών

Το επόμενο βήμα μετά την επιλογή του αριθμού των πόλων και των στρώσεων είναι να επιλεγεί ο αριθμός των αυλακιών. Η επιλογή γίνεται με βάση τον συντελεστή τυλίγματος, την διακύμανση της ροπής και τα επίπεδα θορύβου και δονήσεων.

Συντελεστής τυλίγματος

Στον πίνακα 4.6 δίνονται οι συντελεστές τυλίγματος για διάφορους συνδυασμούς αριθμών πόλων-αυλακιών:

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

	$q=1/2, 1/4$		$q=3/8, 3/10$		$Q_s=21+6k, p=Q_s \pm 1, k=0, 1, 2 \dots$
	$q=3/7, 3/11$		$q=5/14, 5/16$		$Q_s=24+6k, p=Q_s \pm 2, k=0, 1, 2 \dots$
	$q=2/5, 2/7$		not appropriate		$kw1 < 0.866$

Πίνακας 4.6: Συντελεστές τυλίγματος για διάφορους συνδυασμούς αριθμών πόλων-αυλακιών.

Όπως διαπιστώνουμε από τον παραπάνω πίνακα, οι καλύτερες επιλογές για κινητήρα 30 πόλων με βάση τον συντελεστή τυλίγματος είναι τα 27 ή 36 αυλάκια, που έχουν συντελεστή τυλίγματος 0,945 και 0,933 αντίστοιχα.

Θόρυβος και δονήσεις

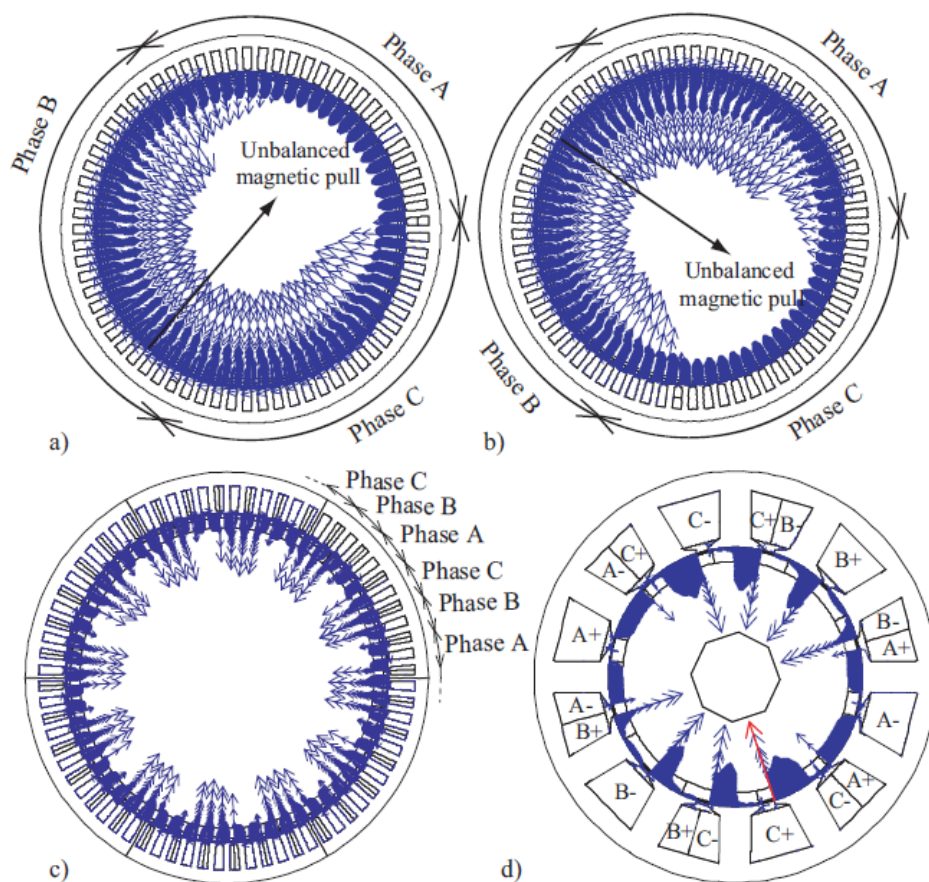
Η μηχανή μπορεί να παράγει πολλές δονήσεις και θόρυβο ανάλογα με τον συνδυασμό πόλων-αυλακιών. Οι δονήσεις και ο θόρυβος οφείλονται κυρίως στις ακτινικές μαγνητικές δυνάμεις στο διάκενο, ενώ οι εφαπτομενικές δυνάμεις επιδρούν στον δρομέα παράγοντας ροπή.

Η ακτινική μαγνητική δύναμη δίνεται από τον ταυνοστή του Maxwell και μπορεί να υπολογιστεί από την εφαπτομενική και την ακτινική συνιστώσα της πυκνότητας ροής του διακένου χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$\sigma(\theta, t) = \frac{1}{2\mu_0} (B_n^2(\theta, \tau) - B_t^2(\theta, t)) \quad (4.26)$$

όπου σ είναι η ακτινική μαγνητική πυκνότητα δύναμης ως συνάρτηση της γωνιακής συντεταγμένης θ και του χρόνου t , B_n είναι η ακτινική συνιστώσα της ροής και B_t η εφαπτομενική συνιστώσα.

Αν οι ακτινικές δυνάμεις δεν είναι κανονικά κατανομημένες κατά μήκος του διακένου, το άθροισμά τους έχει ως αποτέλεσμα μια ελκτική δύναμη που περιστρέφεται με τον χρόνο και παράγει θόρυβο και δονήσεις στην μηχανή. Αυτή η δύναμη, που ονομάζεται μη ισορροπημένη μαγνητική έλξη, οφείλεται στην ασυμμετρία των τυλιγμάτων.



Σχήμα 4.7: Μαγνητικές δυνάμεις στον στάτη σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών με: α) και β): 68 πόλους και 69 αυλάκια, γ) 60 πόλους, 72 αυλάκια, δ) 10 πόλους, 12 αυλάκια.

Οι μηχανές που παρουσιάζουν μη ισορροπημένη μαγνητική έλξη είναι αυτές που δεν έχουν καμία συμμετρία στα τυλίγματα τους, χωρίς να λαμβάνεται υπ' όψη η φορά των αγωγών. Ο αριθμός των συμμετριών δίνεται από τον μέγιστο κοινό διαιρέτη του αριθμού των πόλων p και του αριθμού των αυλακιών Q , και πρέπει να είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Στον πίνακα 4.8 παρατηρούμε ότι και οι δύο πιθανοί συνδυασμοί για την μηχανή της εργασίας (30 πόλοι, 27 αυλάκια και 30

πόλοι, 36 αυλάκια) έχουν ικανοποιητικό αριθμό συμμετριών:

Qs\p	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
6	2		2													
9		3	1	1	3											
12			4	2		2	4									
15			5			1	1		5							
18				6	2	2		2	2	6						
21					7	1		1	1		1	7				
24					8		4	2		2	4		8			
27						9	1	1	3	1	1	3	1	1		
30							10	2		2	2		2	2	2	
33								11		1	1		1	1		
36									12	2	4	6	4	2		

Πίνακας 4.8: Αριθμός των συμμετριών στο τύλιγμα χωρίς να λαμβάνεται υπ' όψη η φορά των αγωγών.

Διακύμανση ροπής

Η ροπή του κινητήρα παρουσιάζει διακύμανση εξαιτίας:

- Της ροπής ευθυγράμμισης, που παράγεται από την μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας που “βλέπουν” οι μόνιμοι μαγνήτες λόγω των αυλακώσεων της επιφάνειας του στάτη, ακόμα κι όταν δεν υπάρχει διέγερση του στάτη.
- Της μεταβολής της διαπερατότητας λόγω του μαγνητικού κορεσμού.
- Των αρμονικών χώρου, δηλαδή της αλληλεπίδρασης μεταξύ των αρμονικών χώρου του πεδίου που παράγεται από τους μόνιμους μαγνήτες και των αρμονικών στο πεδίο που παράγεται από τα τυλίγματα. Εάν η μηχανή τροφοδοτείται με ημιτονοειδές ρεύμα, η διακύμανση της ροπής χωρίς την ροπή ευθυγράμμισης μπορεί να υπολογιστεί από τις αρμονικές της αντι-ΗΕΔ.
- Των αρμονικών χρόνου. Ο αντιστροφέας εισάγει αρμονικές χρόνου στο πεδίο που δημιουργείται από τα τυλίγματα, οι οποίες παράγουν μια παλλόμενη ροπή όταν αυτό αλληλεπιδρά με το πεδίο του δρομέα.
- Τις ανεπιθύμητες ατέλειες στον κινητήρα όπως η εκκεντρότητα του δρομέα ή η άνιση μαγνήτιση των μαγνητών.

Μπορεί να επιτευχθεί πολύ χαμηλή ροπή ευθυγράμμισης αν οι αριθμοί των πόλων και των αυλακιών επιλεγούν έτσι ώστε το ελάχιστο κοινό πολλαπλάσιό

τους (ΕΚΠ) να είναι μεγάλο. Ο πίνακας 4.9 δείχνει τις τιμές των ΕΚΠ των p και Q . Παρατηρούμε ότι οι δύο πιθανοί συνδυασμοί που μελετάμε έχουν μεγάλο ΕΚΠ:

$Qs \setminus p$	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
6	12		24													
9		18	72	90	36											
12			24	60		84	48									
15				30		210	240		60							
18					36	126	144		180	198	72					
21						42	336		420	462		546	84			
24							48		120	264		312	168		96	
27								54	540	594	216	702	756	270	864	918
30									60	330		390	420		480	510
33										66		858	924		1056	1122
36											72	468	252	180	288	612

Πίνακας 4.9: Ελάχιστα κοινά πολλαπλάσια των αριθμών πόλων και αυλακιών.

Επιπλέον, η ροπή ευθυγράμμισης εξαρτάται από πολλές άλλες παραμέτρους όπως το πλάτος του ανοίγματος αυλακιού, το πλάτος του μαγνήτη κοκ. Η προσεκτική επιλογή αυτών των παραμέτρων μπορεί να μειώσει τη ροπή ευθυγράμμισης ακόμη κι αν ο συνδυασμός πόλων-αυλακιών δεν είναι ευνοϊκός. Παρ' όλα αυτά, η χαμηλή ροπή ευθυγράμμισης δεν εγγυάται χαμηλή διακύμανση της ροπής.

Και οι δύο πιθανοί συνδυασμοί πόλων-αυλακιών ($p=30, Q=27$ και $p=30, Q=36$) ικανοποιούν τα τρία κριτήρια (υψηλό συντελεστή τυλίγματος, χαμηλά επίπεδα θορύβου και χαμηλή ροπή ευθυγράμμισης). Τελικά επιλέγεται ο συνδυασμός με τα περισσότερα αυλάκια, ώστε αυτά να μην είναι πολύ πεπλατυσμένα. Άρα τελικά:

$$p=30$$

και

$$Q=36$$

4.3.2.2 Υπολογισμός υπόλοιπων παραμέτρων

Αφού επιλέχθηκε ο αριθμός των πόλων και των αυλακιών μπορούν να υπολογιστούν οι υπόλοιπες παράμετροι του στάτη. Η μαγνητική ροή ανά πόλο θα είναι ίση με:

$$\Phi = \frac{\bar{B} \pi D L}{p} = \frac{0,7 T \times \pi \times 1,25 m \times 2,586 m}{30} = 0,237 Wb$$

Έπειτα, υπολογίζεται ο αριθμός των σπειρών ανά φάση του τυλίγματος με βάση την εξίσωση:

$$N_s = \frac{e_{ph}}{4,44 k_w f \Phi} = \frac{690 / \sqrt{3} V}{4,44 \times 0,933 \times 50 Hz \times 0,237 Wb} = 8,12 \approx 8 \text{ σπείρες / φάση}$$

όπου e_{ph} η φασική τάση και $k_w=0,933$ ο συντελεστής τυλίγματος που αντιστοιχεί σε συνδυασμό 36 αυλακιών και 30 πόλων.

Επομένως, ο αριθμός των σπειρών ανά αύλακα θα είναι:

$$n_c = \frac{N_s}{Q/6} = \frac{8}{36/6} = 1,33 \Rightarrow 2 \text{ σπείρες / αύλακα} \quad (4.27),$$

όπου Q ο αριθμός των αυλακιών.

Το ρεύμα στάτη στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, θεωρώντας την ισχύ εισόδου $P_{el} \approx P_{out}$ και τον συντελεστή ισχύος $\cos\varphi=0,8$, είναι:

$$I_N = \frac{P_{el}}{\sqrt{3} V \cos\varphi} = \frac{4500000 W}{\sqrt{3} * 690 V * 0,8} = 4706,7 A \quad (4.28)$$

Συνεπώς η συνολική μαγνητηγεργτική δύναμη δίνεται από τη σχέση:

$$ME\Delta = N_s I = 8 \text{ ελίγματα} \times 4706,7 A = 37653,6 A\epsilon \quad (4.29)$$

Σε αυτό το σημείο θεωρούμε πυκνότητα ρεύματος:

$$J = 6 A / mm^2, \quad (4.30)$$

παρόλο που είναι πάνω το ανώτερο όριο ώστε ο κινητήρας να μην χρειάζεται εξαναγκασμένη ψύξη. Επειδή όμως ο κινητήρας είναι βυθισμένος στο

θαλασσινό νερό, υπάρχει επαρκής ψύξη του στάτη.

Έτσι μπορούμε να βρούμε την απαιτούμενη διατομή χαλκού ανά αύλακα από τον τύπο:

$$A_{Cu} = \frac{n_c I}{J} = \frac{2 \text{ σπείρες / αύλακα} \times 4706,7 \text{ A}}{6 \text{ A/mm}^2} = 1569 \text{ mm}^2 / \text{αύλακα} \quad (4.31)$$

Αν θεωρήσουμε συντελεστή πληρότητας χαλκού στο αυλάκι:

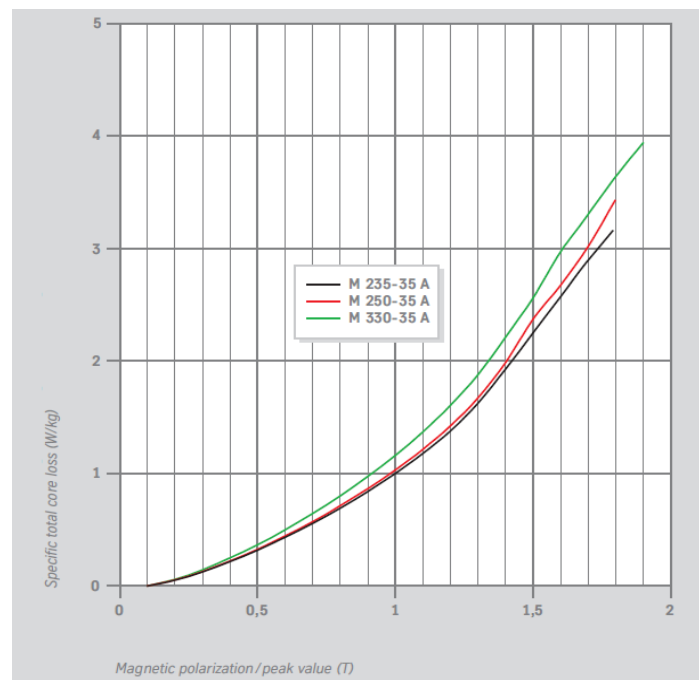
$$ff = 0,6 \quad (4.32)$$

Τότε η συνολική διατομή του αυλακιού θα είναι:

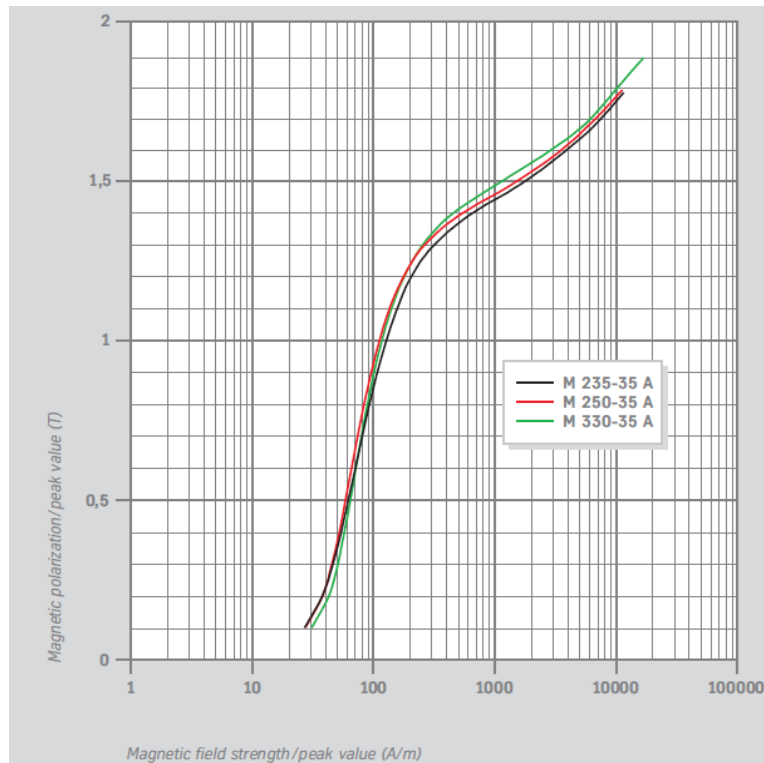
$$A_{slot} = \frac{A_{cu}}{ff} = \frac{1569 \text{ mm}^2}{0,6} = 2615 \text{ mm}^2 \quad (4.33)$$

4.3.2.3 Υλικό στάτη

Το υλικό που επιλέχθηκε για τον στάτη είναι το ατσάλι M 235-35 A της ThyssenKrupp με πάχος 0,35mm. Είναι κατάλληλο για εφαρμογές υψηλής απόδοσης, όπως μεγάλες ηλεκτρικές μηχανές. Στις εικόνες 4.10 και 4.11 δίνονται η καμπύλη ειδικών απωλειών και η καμπύλη μαγνήτισης για πεδίο συχνότητας 50Hz, αντίστοιχα:



Σχήμα 4.10: Καμπύλη ειδικών απωλειών του ατσαλιού M 235-35 A σε πεδίο συχνότητας 50Hz.



Σχήμα 4.11: Καμπύλη μαγνήτισης του ατσαλιού M 235-35 A σε πεδίο συχνότητας 50Hz.

4.3.3 Προσδιορισμός χαρακτηριστικών δρομέα

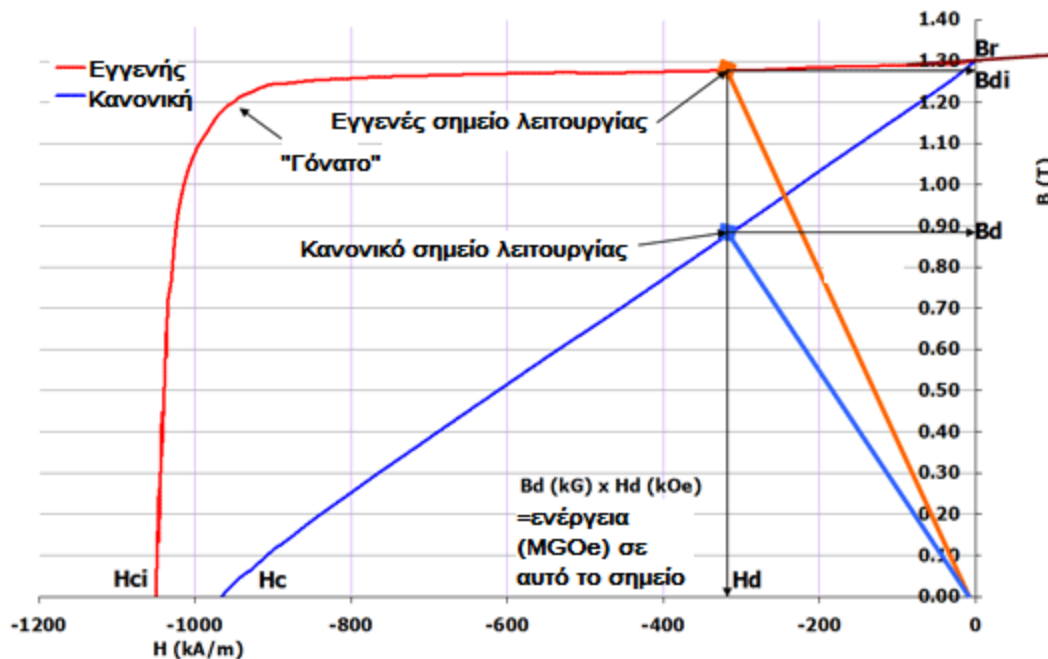
Στην προκαταρκτική σχεδίαση του δρομέα πρέπει να προσδιοριστούν οι διαστάσεις των επιφανειακών μαγνητών και τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν για τους μόνιμους μαγνήτες και το σώμα του δρομέα.

4.3.3.1 Υλικό μόνιμων μαγνητών

Το κύριο μέλημα κατά την επιλογή του υλικού του μόνιμου μαγνήτη είναι κατά την μέγιστη φόρτιση της μηχανής το υλικό να μην φτάσει κάτω από το γόνατο της χαρακτηριστικής απομαγνήτισης του, έτσι ώστε να εξασφαλίζει την μέγιστη μαγνητική ενέργεια.

Αν η λειτουργία οδηγήσει σε χαμηλότερο σημείο της χαρακτηριστικής από το γόνατο, τότε το υλικό απομαγνητίζεται, δηλαδή μετά την απομάκρυνση του εξωτερικού πεδίου ο μαγνήτης θα παράγει εξασθενημένη πυκνότητα μαγνητικής ροής.

Καμπύλη BH του N42 NdFeB (θερμοκρασία δωματίου)



Σχήμα 4.12: Καμπύλη απομαγνήτισης του μαγνήτη NdFeB N42 (42MGOe).

Υπάρχουν δύο είδη μαγνητικών υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

α) Μαγνητικά υλικά υψηλής μαγνήτισης, όπως κράματα νεοδυμίου - σιδήρου - βορίου (NdFeB), που τοποθετούνται επιφανειακά στον δρομέα. Έχουν υψηλή παραμένουσα μαγνήτιση ($B_r \approx 1.2T$) και υψηλή συνέχουσα δύναμη ($H_c \approx 1000 kA/m$) στους $20^\circ C$. Όμως όπως γράφτηκε και στο κεφάλαιο 3 έχουν υψηλούς θερμοκρασιακούς συντελεστές για αυτό πρέπει η θερμοκρασία λειτουργίας τους να διατηρείται κάτω από τους $150^\circ C$.

β) Μαγνητικά υλικά χαμηλής μαγνήτισης, όπως οι φερρίτες, που τοποθετούνται εγκάρσια στον δρομέα, τα οποία έχουν χαμηλότερη παραμένουσα μαγνήτιση ($B_r \approx 0,35T$) και συνέχουσα δύναμη ($H_c \approx 150 kA/m$), όμως δεν είναι τόσο ευαίσθητα στις μεταβολές της θερμοκρασίας.

Εφόσον ο κινητήρας αυτής της εργασίας είναι μεγάλης ισχύος, επιλέχθηκε μαγνητικό υλικό υψηλής μαγνήτισης, και πιο συγκεκριμένα κράμα νεοδυμίου - σιδήρου - βορίου ενέργειας 40 MGOe με παραμένουσα μαγνήτιση $B_r = 1,25 T$ και πεδίο επαναφοράς $H_c = 979 kA/m$.

4.3.3.2 Διαστάσεις μονίμων μαγνητών

Μετά την επιλογή του υλικού σειρά έχει ο προσδιορισμός των διαστάσεων των μονίμων μαγνητών. Στην περίπτωση των επιφανειακών μαγνητών ισχύει ότι:

$$B_{\delta} \approx B_r \frac{L_m}{L_{\delta} + L_m} , \quad (4.34)$$

όπου B_{δ} η μαγνητική επαγωγή του διακένου, B_r η παραμένουσα μαγνήτιση, L_m το πάχος του επιφανειακού μαγνήτη και L_{δ} το πλάτος του διακένου.

Άρα αν επιθυμούμε η μαγνητική επαγωγή του διακένου να είναι το 80% της παραμένουσας μαγνήτισης, προκύπτει ότι το πάχος των μαγνητών θα είναι:

$$L_m = \frac{B_{\delta}(L_{\delta} + L_m)}{B_r} = \frac{0,8 B_r (L_{\delta} + L_m)}{B_r} = 0,8(L_{\delta} + L_m) \Leftrightarrow L_m = 4L_{\delta} = 4 \times 6\text{mm} = 24\text{mm} . \quad (4.35)$$

Έπειτα πρέπει να υπολογιστεί το πλάτος των μαγνητών L_{magnet} . Η μαγνητική ροή ανά πόλο Φ έχει υπολογιστεί παραπάνω και είναι ίση με 0,237 Wb, οπότε το L_{magnet} μπορεί να προσδιοριστεί ως εξής:

$$\Phi = B_g A_{\text{magnet}} = B_g L_{\text{magnet}} L , \quad (4.36)$$

όπου L το ενεργό μήκος της μηχανής.

Επομένως:

$$L_{\text{magnet}} = \frac{\Phi}{B_g L} = \frac{0,237 \text{ Wb}}{1\text{T} \times 2,586 \text{ m}} = 0,0916 \text{ m} . \quad (4.37)$$

Οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι σε ακτίνα $R = D/2 - L_m - \delta/2$, άρα η γωνία θ_{magnet} που καλύπτει κάθε μαγνήτης δίνεται από τον τύπο:

$$\theta_{\text{magnet}} = \frac{L_{\text{magnet}}}{R} \frac{180^\circ}{\pi} = \frac{L_{\text{magnet}}}{D/2 - L_m - \delta/2} \frac{180^\circ}{\pi} = \frac{0,0916\text{m}}{1,25 \text{ m}/2 - 0,024 \text{ m} - 0,006 \text{ m}/2} \frac{180^\circ}{\pi} = 8,776^\circ . \quad (4.38)$$

Πιο χρήσιμο για την συνέχεια θα είναι να εκφραστεί το πλάτος του μαγνήτη ως κλάσμα του πολικού βήματος pp :

$$\text{magnet ang} = \frac{\theta_{\text{magnet}}}{pp} = \frac{\theta_{\text{magnet}}}{360^\circ/p} = \frac{8,776^\circ}{360^\circ/30} = 0,731 . \quad (4.39)$$

4.3.3.3 Υπολογισμός ειδικών φορτίσεων

Η ειδική μαγνητική φόρτιση, δηλαδή η μέση τιμή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο, έχει ήδη ληφθεί ως παράμετρος της σχεδίασης στην παράγραφο 4.3.1 και θεωρήθηκε ίση με:

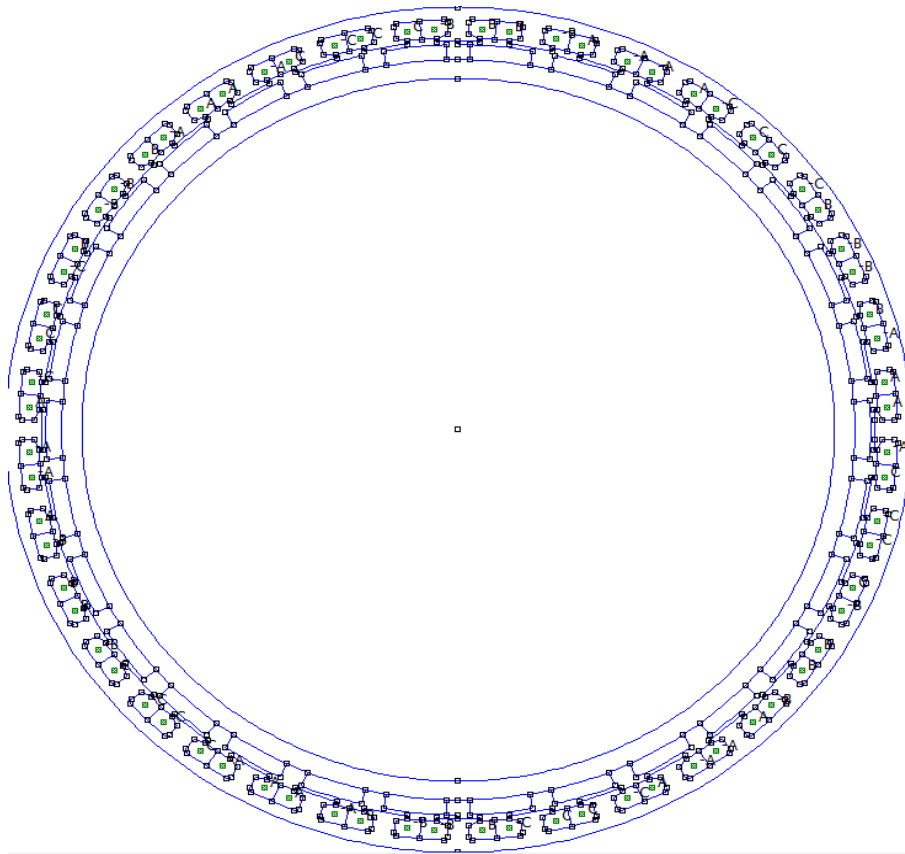
$$\bar{B}=0,7T$$

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση, δηλαδή η ενεργός τιμή των αμπερελιγμάτων ανά μέτρο περιφέρειας διακένου, είναι ίση με:

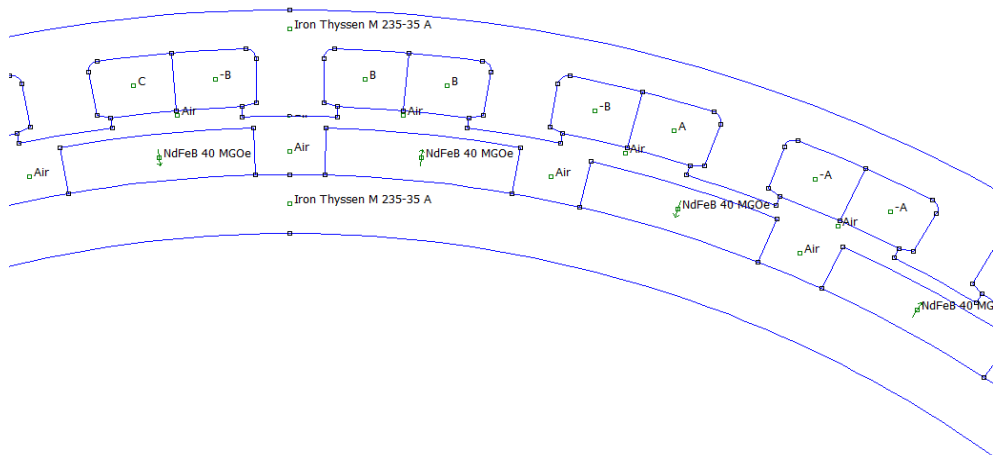
$$ac=3 \times 2 N_s \frac{I}{\pi D} = \frac{3 \times 2 \times 8 \text{ σπείρες} \times 4706,7 A}{\pi \times 1,25 m} = 57530 A/m$$

κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Η τιμή αυτή θεωρείται ικανοποιητική παρ' όλο που είναι λίγο αυξημένη, επειδή η διαρκής επαφή της μηχανής με το θαλασσινό νερό θα προσφέρει επαρκή ψύξη στον στάτη.

Στην εικόνα 4.13 βλέπουμε την διατομή του κινητήρα που προκύπτει από την προκαταρκτική σχεδίαση όπως γίνεται στο λογισμικό FEMM. Στην εικόνα 4.14 βλέπουμε λεπτομέρειες όπως η επιλογή των υλικών και η κατανομή των τυλιγμάτων στα αυλάκια.



Σχήμα 4.13: Διατομή του κινητήρα της προκαταρκτικής σχεδίασης.



Σχήμα 4.14: Μεγέθυνση της προκαταρκτικής σχεδίασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

5.1 Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων

Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων έχει αποδειχθεί ότι είναι ιδιαίτερα ευέλικτη, αξιόπιστη και αποτελεσματική στην προσομοίωση ηλεκτρομαγνητικών και ηλεκτρομηχανικών συσκευών. Ακόμη και στα χέρια μη ειδικών, τα σύγχρονα πακέτα λογισμικού ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων είναι φιλικά στον χρήστη και επιτρέπουν το υπολογισμό της κατανομής του μαγνητικού πεδίου και διάφορων ολοκληρωμάτων χωρίς την ανάγκη για γνώση εφαρμοσμένων μαθηματικών.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να αναλύσει κυκλώματα μόνιμων μαγνητών κάθε σχήματος και υλικού. Δεν χρειάζεται να υπολογιστούν οι αντιδράσεις ή οι συντελεστές σκέδασης. Η καμπύλη απομαγνήτισης του μόνιμου μαγνήτη εισάγεται στο πρόγραμμα, το οποίο μπορεί να υπολογίσει την μεταβολή της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο σύστημα. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων σε σχέση με την αναλυτική προσέγγιση στη προσομοίωση κινητήρων μόνιμου μαγνήτη είναι η εγγενής δυνατότητα ακριβούς υπολογισμού της αντίδρασης τυμπάνου, των αντιστάσεων και της μεταβολής της ηλεκτρομαγνητικής ροπής σε σχέση με την θέση του δρομέα. Φυσικά, για κατανοήσει και να χρησιμοποιήσει αποδοτικά λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, ο χρήστης πρέπει να έχει θεμελιώδεις γνώσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

5.1.1 Οριακές συνθήκες

Πολύ σπάνια υπάρχουν φυσικά όρια στα ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα. Στους περισσότερους τύπους εφαρμογών το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εκτείνεται απείρως στον χώρο. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται όρια για να απλοποιήσουν το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και να υπολογίσουν το διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό. Οι περιστρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές έχουν την ίδια γεωμετρία ανά ένα βήμα πόλου, μερικές φορές ακόμη και ανά μισό. Τα όρια λόγω συμμετρίας μειώνουν πολύ το μέγεθος του μοντέλου.

Οι οριακές συνθήκες μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις τύπους:

5.1.1.1 Οριακές συνθήκες Dirichlet

Οι οριακές συνθήκες Dirichlet απαιτούν το διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό σε ένα συγκεκριμένο σημείο να παίρνει μια συγκεκριμένη τιμή, δηλαδή:

$$\vec{A}=m$$

όπου m είναι η τιμή αυτή. Οι συνθήκες Dirichlet αναγκάζουν τις γραμμές του πεδίου να είναι παράλληλες στο όριο.

Στα δισδιάστατα προβλήματα μια πεδιακή γραμμή είναι μια γραμμή στην οποία $\vec{A}=\text{σταθερό}$. Χρησιμοποιώντας την οριακή συνθήκη $\vec{A}=0$, οι πεδιακές γραμμές περιορίζονται και ακολουθούν το όριο. Η εξωτερική περίμετρος του στάτη, για παράδειγμα, μπορεί να έχει μια τέτοια συνθήκη. Πρόκειται για απλοποίηση αφού οποιαδήποτε ροή σκέδασης που εκτείνεται έξω από τον στάτη παραμελείται. Η υψηλή μαγνητική διαπερατότητα του φερρομαγνητικού υλικού του στάτη διασφαλίζει ότι η περισσότερη ροή παραμένει μέσα στον στάτη, και στους περισσότερους τύπους μηχανών αυτή η οριακή συνθήκη είναι μια λογική απλοποίηση.

5.1.1.2 Οριακές συνθήκες Neumann

Οι οριακές συνθήκες Neumann απαιτούν η παράγωγος του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού να είναι ίση με μηδέν, δηλαδή:

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial n}=0.$$

Αυτός ο τύπος συνθήκης δεν ικανοποιείται ακριβώς από την λύση του προβλήματος πεπερασμένων στοιχείων παρά μόνο για την μέση τιμή της συνθήκης. Οι οριακές συνθήκες Neumann είναι φυσικά όρια στο μοντέλο αφού δεν χρειάζεται να οριστούν ρητά. Οι πεδιακές γραμμές τέμνουν ένα όριο Neumann κάθετα.

Οι συνθήκες Neumann χρησιμοποιούνται κυρίως σε συμμετρικά προβλήματα όπου η ροή είναι κάθετη σε ένα επίπεδο. Αυτό συμβαίνει στην λειτουργία κενού φορτίου στους περισσότερους ηλεκτρικούς κινητήρες.

5.1.1.3 Οριακές συνθήκες διασυνδέσεων

Οι οριακές συνθήκες διασυνδέσεων ορίζουν το περιορισμό μεταξύ δύο σημείων, π.χ. Μεταξύ δύο γεωμετρικώς γειτονικών σημείων ή μεταξύ σημείων με συγκεκριμένη απόσταση. Αυτός ο τύπος συνθήκης έχει μόνο ένα από τα δύο δυναμικά ανεξάρτητα ορισμένο και ικανοποιείται ακριβώς στην λύση του προβλήματος πεπερασμένων στοιχείων. Η σχέση μεταξύ των δύο σημείων είναι:

$$\vec{A}_m = \alpha \vec{A}_n + b$$

όπου οι α, b είναι συντελεστές που συνδέουν τα δύο σημεία.

Η χρήση της συνθήκης αυτής στις ηλεκτρικές μηχανές είναι στην συσχέτιση δύο σημείων που έχουν απόσταση ίση ή πολλαπλάσια του πολικού βήματος. Αυτός ο τύπος συνθήκης συνήθως ονομάζεται *περιοδική συνθήκη*, στην οποία ισχύει $\vec{A}_m = \vec{A}_n$ ή $\vec{A}_m = -\vec{A}_n$, ανάλογα με τον αριθμό πολικών βημάτων τον οποίο απέχουν τα σημεία, π.χ.

$$A(r, \theta_0 + \frac{2\pi}{2p}) = -A(r, \theta_0) \quad (5.1)$$

5.1.2 Λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

Τα σύγχρονα πακέτα λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούν ανεπτυγμένο γραφικό περιβάλλον που κάνει την διαδικασία επίλυσης προβλημάτων όσο το δυνατόν ευκολότερη. Όλα πακέτα έχουν τρία κύρια μέρη, τον προεπεξεργαστή, τον επιλυτή και τον μετεπεξεργαστή. Κάποια δημοφιλή πακέτα λογισμικού που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση ηλεκτρικών μηχανών και ηλεκτρομηχανικών συσκευών είναι τα *MagNet*, *Maxwell*, *Flux*, *Opera* και το *FEMM*, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για αυτή την εργασία. Όλα αυτά τα πακέτα έχουν επιλυτές, δισδιάστατους ή τρισδιάστατους, για ηλεκτροστατικά ή μαγνητοστατικά προβλήματα και προβλήματα υπολογισμού δινορρευμάτων.

5.1.2.1 Προεπεξεργαστής

Ο προεπεξεργαστής είναι το μέρος του λογισμικού στο οποίο ο χρήστης δημιουργεί το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ή επεξεργάζεται ένα ήδη υπάρχον. Τα διαφορετικά κομμάτια ενός μοντέλου είναι:

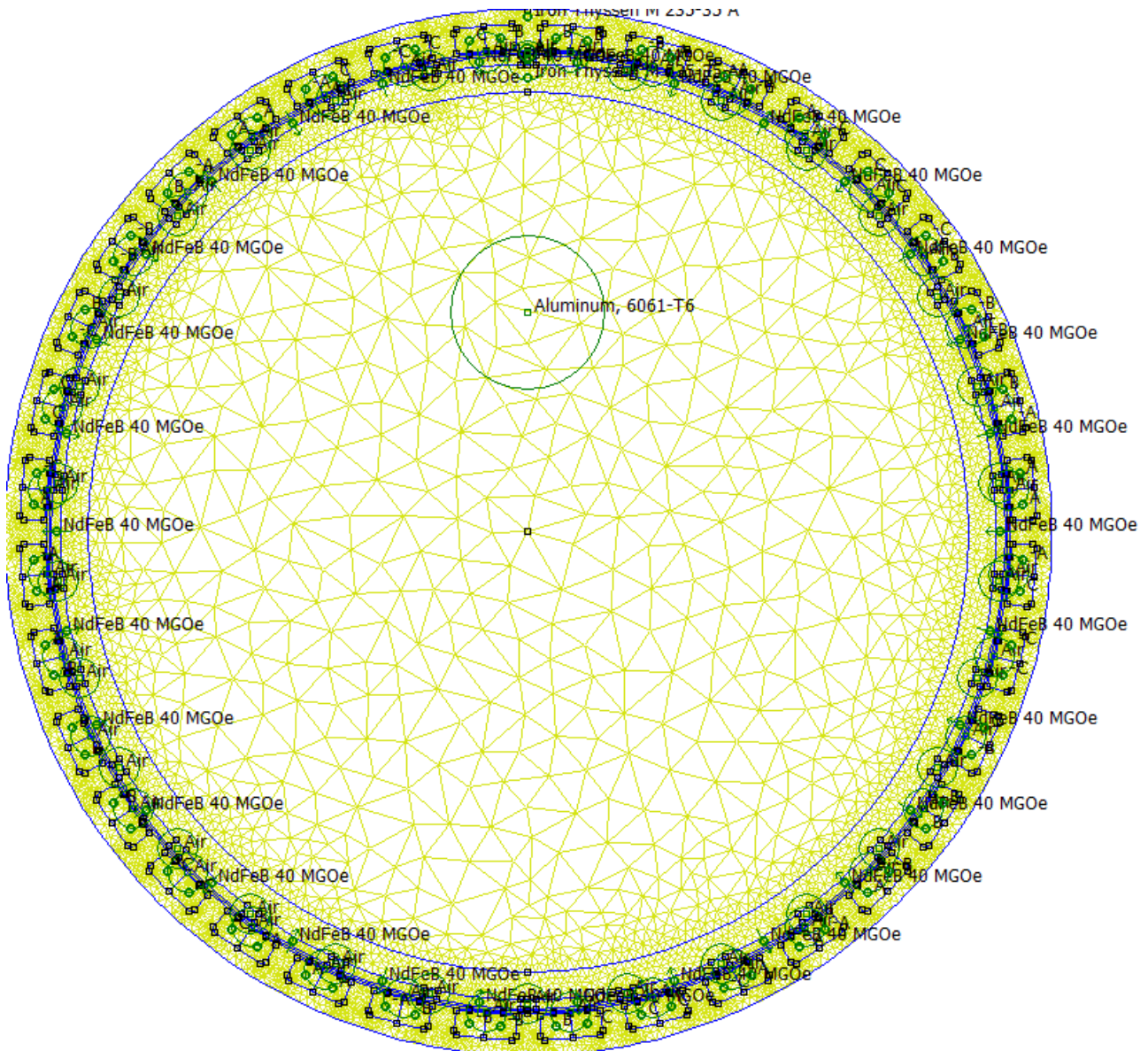
- Η *σχεδίαση* του γεωμετρικού περιγράμματος του μοντέλου με την χρήση γραφικών σχεδιαστικών εργαλείων όπως σε κάθε πακέτο σχεδίασης με την βοήθεια Η/Υ (CAD).
- Τα *υλικά*. Σε όλες οι περιοχές του γεωμετρικού μοντέλου ορίζονται οι μαγνητικές ιδιότητες του υλικού. Τα υλικά μπορούν να έχουν γραμμικές ή μη γραμμικές μαγνητικές χαρακτηριστικές. Για κάθε υλικό μπορεί να οριστεί μια συγκεκριμένη αγωγιμότητα.
- Το *ηλεκτρικό κύκλωμα*. Οι περιοχές που περιλαμβάνουν πηνία συνδέονται σε πηγές τάσης ή ρεύματος. Ο χρήστης ορίζει τον αριθμό των σπειρών και την τιμή του ρεύματος.

- *Οριακές συνθήκες.* Τα όρια του μοντέλου συνήθως χρειάζονται συνθήκες και αυτό γίνεται εύκολα ορίζοντας τις συνθήκες αυτές γραφικά.

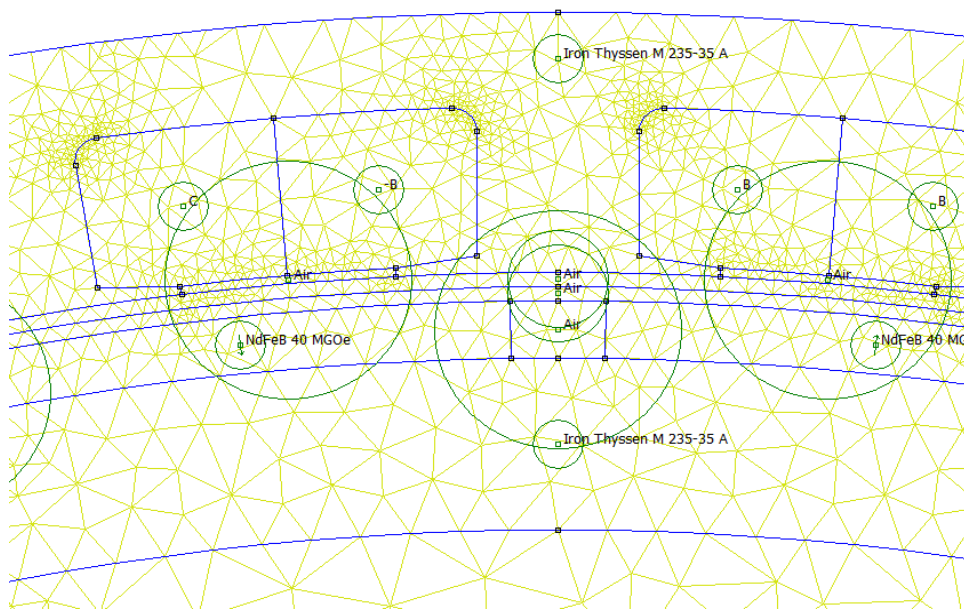
Είναι επίσης δυνατό να εισαχθούν νέες χαρακτηριστικές υλικών. Αυτό γίνεται ορίζοντας έναν αριθμό σημείων στην καμπύλη B-H του υλικού και το πρόγραμμα δημιουργεί μια ομαλή καμπύλη από αυτά τα σημεία.

5.1.2.2 Επιλυτής

Ο επιλυτής είναι το μέρος του λογισμικού που επιλύει αριθμητικά τις εξισώσεις πεδίου. Αρχικά, δημιουργεί ένα πρόχειρο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων και το επιλύει. Από αυτή την λύση προκύπτει μια εκτίμηση του σφάλματος, και το πλέγμα βελτιώνεται και επιλύεται ξανά. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να προκύψει ένα ακριβές αποτέλεσμα. Στις εικόνες 5.1 και 5.2 βλέπουμε το πλέγμα της μηχανής της παρούσας εργασίας, το οποίο αποτελείται από 24127 κόμβους. Παρατηρούμε ότι το πλέγμα μπορεί να γίνει πολύ αραιό στα σημεία που δεν αποτελούν μέρος του μαγνητικού κυκλώματος, ενώ σε σημεία όπως το διάκενο μπορεί να γίνει πιο πυκνό για μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα. Πρέπει να διευκρινιστεί ότι η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί μεγάλη επεξεργαστική ισχύ από μέρος του υπολογιστή, οπότε λαμβάνοντας τέτοια μέτρα περιορίζεται σημαντικά ο χρόνος των υπολογισμών με αμελητέα επίπτωση στην ακρίβεια.



Σχήμα 5.1: Παράδειγμα πλέγματος που δημιουργείται από τον επιλυτή.



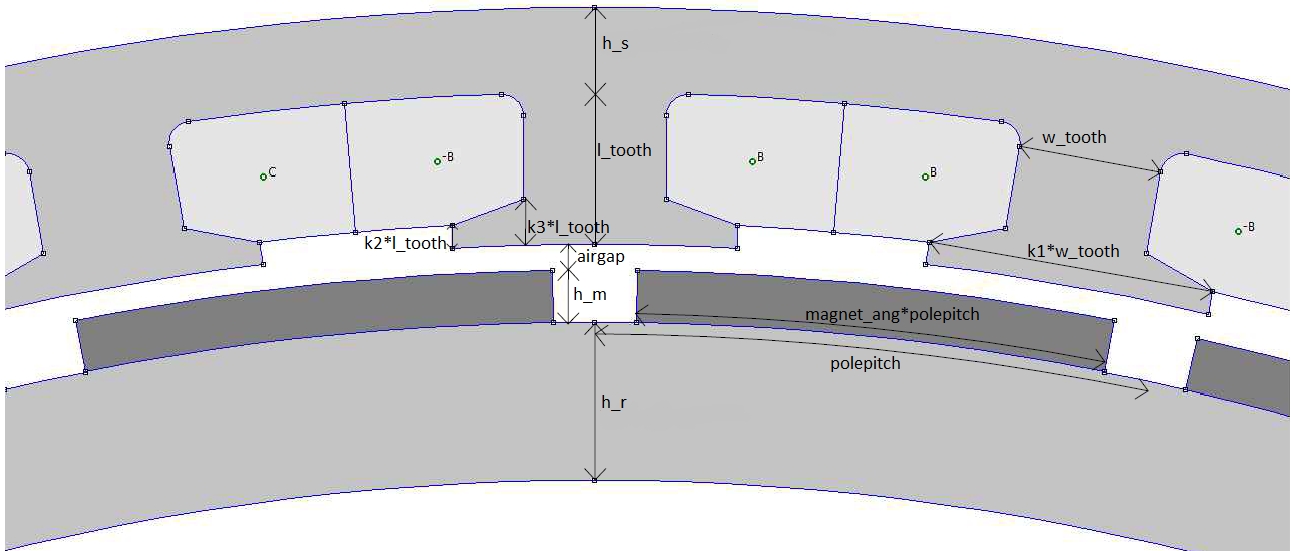
Σχήμα 5.2: Λεπτομέρεια του πλέγματος που δημιουργείται από τον επιλυτή.

5.1.2.3 Μετεπεξεργαστής

Ο μετεπεξεργαστής προβάλλει τις πεδιακές ποσότητες όπως το διανυσματικό μαγνητικό δυναμικό, η πυκνότητα ροής και η ένταση του πεδίου. Επίσης δίνει στον χρήστη πρόσβαση σε μεγάλη ποσότητα πληροφοριών όπως η ενέργεια, η δύναμη και η ροπή.

5.2 Παραμετροποιημένη σχεδίαση

Κύριος σκοπός αυτής της εργασίας είναι η εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας του κινητήρα. Οι μεταβλητές είναι τόσο πολλές (διαστάσεις στάτη, δρομέα, μαγνητών κοκ.) που χωρίς την παραμετροποίησή τους ο υπολογισμός της βέλτιστης λύσης είναι χρονικά ασύμφορος. Αυτό σημαίνει ότι κάποιες διαστάσεις του κινητήρα εξαρτώνται από άλλες σημαντικότερες, που θα αποτελέσουν τις τελικές μεταβλητές.



Σχήμα 5.3: Παράμετροι σχεδίασης.

Πλάτος επιφανειακών μαγνητών

Το πλάτος των επιφανειακών μαγνητών εκφράζεται συναρτήσει του πολικού βήματος (polepitch) μέσω της παραμέτρου magnet_ang:

$$\text{πλάτος μαγνήτη} = \text{magnet_ang} \times \text{polepitch} \quad (5.2)$$

Πλάτος πέλδλου

Το πλάτος του πέλδλου των δοντιών του στάτη εκφράζεται συναρτήσει του πάχους του δοντιού (w_{tooth}) μέσω της παραμέτρου k_1 :

$$\text{Πλάτος πέλδλου} = k_1 \times w_{\text{tooth}} \quad (5.3)$$

Πάχος πέλδλου

Το πάχος του πέλδλου στην άκρη και την μέση του δοντιού εκφράζεται συναρτήσει του μήκους του δοντιού (l_{tooth}) μέσω των παραμέτρων k_2 και k_3 αντίστοιχα:

$$\text{Πάχος πέλδλου στην άκρη} = k_2 \times l_{\text{tooth}} \quad (5.4)$$

$$\text{Πάχος πέλδλου στην μέση} = k_3 \times l_{\text{tooth}} \quad (5.5)$$

Πάχος σώματος στάτη

Το πάχος του σώματος του στάτη (h_s) επιλέγεται να είναι ίσο με το 60% του πάχους των δοντιών (w_{tooth}), έτσι ώστε η μαγνητική επαγωγή στο σώμα να διατηρείται πάνω από τα 1,5T και κάτω από τα 1,9T. Με αυτή την συνθήκη εξασφαλίζουμε ότι αξιοποιείται σωστά ο σίδηρος και δεν γίνεται σπατάλη υλικών, και ταυτόχρονα δεν οδηγείται το μαγνητικό κύκλωμα σε κορεσμό. Επομένως:

$$h_s = 0.6 \times w_{tooth} \quad (5.6)$$

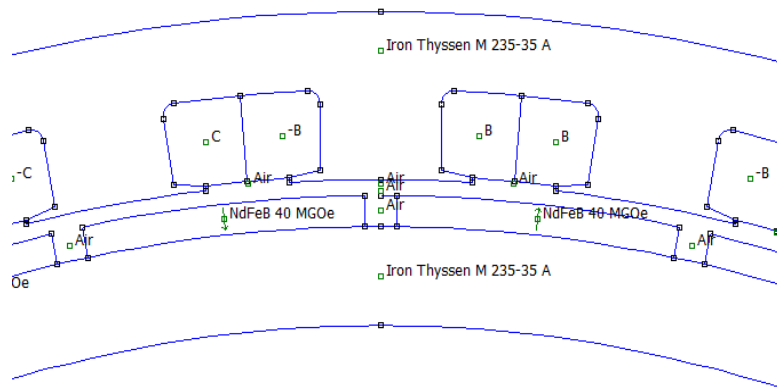
Πάχος σώματος δρομέα

Με την ίδια ακριβώς λογική το πάχος του σώματος του δρομέα (h_r) επιλέγεται να είναι ίσο με το 33% του πλάτους των επιφανειακών μαγνητών ($magnet_ang \times polepitch$), έτσι ώστε η μαγνητική επαγωγή στο σώμα του δρομέα να διατηρείται πάνω από το 1T. Επομένως:

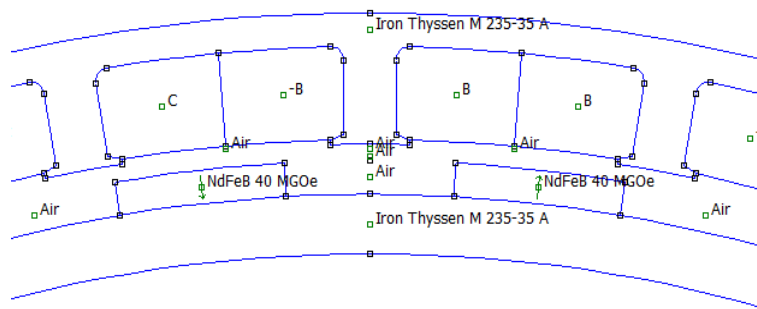
$$h_r = 0.33 magnet\ ang \times polepitch \quad (5.7)$$

Έχοντας ορίσει σταθερή αναλογία μεταξύ πάχους σώματος στάτη/πάχους δοντιών και πάχους σώματος δρομέα/πλάτους επιφανειακών μαγνητών, διατηρούμε σταθερή την φόρτιση του μαγνητικού κυκλώματος του κινητήρα, παρά την μεταβολή των διαστάσεων των δοντιών και των μαγνητών. Σε αντίθετη περίπτωση, διατηρώντας δηλαδή σταθερά πάχη σωμάτων δρομέα και στάτη, υπάρχει περίπτωση είτε να γίνεται σπατάλη υλικού, ή να οδηγείται η μαγνητική λαμαρίνα σε κορεσμό.

Στις δύο παρακάτω εικόνες φαίνονται δύο ακραίες περιπτώσεις που δείχνουν πως επηρεάζεται η γεωμετρία του κινητήρα με βάση το πάχος των δοντιών και το πλάτος των μαγνητών.



Σχήμα 5.4: Λεπτομέρεια του κινητήρα για πλάτος δοντιού 50mm και πλάτος μαγνήτη 90%.



Σχήμα 5.5: Λεπτομέρεια του κινητήρα για πλάτος δοντιού 20mm και πλάτος μαγνήτη 50%.

5.3 Βελτιστοποίηση του κινητήρα

Κατά την βελτιστοποίηση του κινητήρα γίνεται εκτεταμένη ανάλυση ευαισθησίας των χαρακτηριστικών λειτουργίας του κινητήρα ως προς την μεταβολή διάφορων παραμέτρων της γεωμετρίας του. Αυτή η ανάλυση γίνεται για τρεις τιμές του ρεύματος, την ονομαστική, 1/4 της ονομαστικής και διπλάσια της ονομαστικής, έτσι ώστε να μελετήσουμε την συμπεριφορά του κινητήρα και σε συνθήκες υποφόρτισης ή υπερφόρτισης. Η επιλογή των τελικών τιμών των παραμέτρων της γεωμετρίας γίνεται λαμβάνοντας υπ' όψιν κατά κύριο λόγο τις προσομοιώσεις για ονομαστικό ρεύμα, ενώ στις προσομοιώσεις στις προσομοιώσεις με ρεύμα 1/4 του ονομαστικού και διπλάσιο του ονομαστικού ελέγχουμε για φυσιολογικές τιμές ροπής, απωλειών

κ.ο.κ.

Το πρώτο στάδιο της βελτιστοποίησης αφορά δύο παραμέτρους, το πλάτος των επιφανειακών μαγνητών ως ποσοστό του πολικού βήματος ($magnet_ang$) και το πάχος του δοντιού (w_{tooth}). Με προσομοιώσεις στο FEMM υπολογίστηκαν πολλά χαρακτηριστικά του κινητήρα, όπως:

- η μέση και μέγιστη ροπή σε μια περιστροφή του δρομέα κατά ένα πολικό βήμα
- η διακύμανση της ροπής
- η αντι-ΗΕΔ
- η αρμονική παραμόρφωσή της
- οι απώλειες σιδήρου
- οι τιμές του B σε διάφορα σημεία του δοντιού και στον στάτη
- η απόδοση, κ.ο.κ.

Πριν γίνει η πρώτη βελτιστοποίηση έγιναν πρώτα κάποιες δοκιμαστικές προσομοιώσεις ώστε να καθοριστούν κάποια μεγέθη που δεν προσδιορίζονται από την προκαταρκτική σχεδίαση. Οι επιλογές που έγιναν ήταν οι εξής:

- Το πάχος των επιφανειακών μαγνητών μειώθηκε στα 12 mm καθώς οι προσομοιώσεις έδιναν τιμές για την αντι-ΗΕΔ που ήταν εκτός των προδιαγραφών.
- Το σώμα του στάτη επιλέχθηκε να είναι ίσο με 60% του πάχους των δοντιών, ώστε ούτε να γίνεται σπατάλη υλικού, ούτε η μέγιστη τιμή του B να ξεπερνά τα 1,7-1,8T, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.
- Το πάχος του δρομέα επιλέχθηκε να είναι ίσο με το 1/3 του πλάτους των μαγνητών, ώστε ούτε να γίνεται σπατάλη υλικού και να παρατηρούνται πολύ χαμηλές τιμές του B , όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Γενικά σε όλες τις προσομοιώσεις θα δούμε ότι η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του κινητήρα φέρει πολύ μεγαλύτερες βελτιώσεις στην επίδοση παρά στην απόδοση του κινητήρα, οπότε επικεντρωνόμαστε περισσότερο στην αύξηση της ροπής. Δευτερευόντως εξετάζονται τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά όπως η διακύμανση της ροπής, η αρμονική παραμόρφωση και οι απώλειες σιδήρου καθώς και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά για ρεύμα ίσο με το 1/4 του ονομαστικού και διπλάσιο του ονομαστικού.

5.3.1 Υπολογισμός χαρακτηριστικών

Σε αυτή την παράγραφο εξηγείται ο τρόπος υπολογισμού των χαρακτηριστικών του κινητήρα όπως οι απώλειες χαλκού και σιδήρου, η απόδοση, η αντι-ΗΕΔ, κ.ο.κ.

Διακύμανση ροπής

Ο υπολογισμός της διακύμανσης της ροπής είναι απλός. Έχοντας τις τιμές της ροπής του κινητήρα για μια περιστροφή του άξονα κατά ένα πολικό βήμα, υπολογίζουμε την διακύμανση της με τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Διακύμανση ροπής (\%)} = 100 \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\text{mean}}} \quad (5.8)$$

όπου T_{\max} , T_{\min} , T_{mean} η μέγιστη, η ελάχιστη και η μέση ροπή σε μια περιστροφή του άξονα.

Απώλειες σιδήρου

Για τον υπολογισμό των απωλειών σιδήρου στον στάτη και τον δρομέα χρησιμοποιείται η εξής μέθοδος:

- Για κάθε στοιχείο i του πλέγματος που δημιουργεί το λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και ανήκει στον στάτη ή τον δρομέα, λαμβάνεται το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής $|B_i|$. Έστω n το πλήθος αυτών των στοιχείων.
- Προσεγγίζεται η καμπύλη ειδικών απωλειών της μαγνητικής λαμαρίνας με ένα πολυώνυμο. Για την καμπύλη της λαμαρίνας Thyssen M 235-35 A που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία (Εικόνα 4.10), το πολυώνυμο που την προσεγγίζει καλύτερα είναι το

$$P(B) = 0.235366 |B|^8 + 0.299854 |B|^6 + 0.533104 |B|^4 - 0.0577958 \quad (W/kg) \quad (5.9)$$

- Γνωρίζοντας την επιφάνεια του κάθε στοιχείου και το ενεργό μήκος του κινητήρα, υπολογίζεται ο όγκος v_i του κάθε στοιχείου.
- Υπολογίζεται το βάρος w_i του κάθε στοιχείου, γνωρίζοντας ότι η πυκνότητα της λαμαρίνας είναι $7,6 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$:

$$w_i = v_i \times 7,6 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \quad (\text{kg}) \quad (5.10)$$

- Τέλος, υπολογίζονται οι συνολικές απώλειες σιδήρου με βάση τον τύπο:

$$P_{Fe} = \sum_{i=1}^{nn} w_i P(|B_{il}|) \quad (W) \quad (5.11)$$

Απώλειες χαλκού

Για τον υπολογισμό των απωλειών χαλκού ακολουθείται η παρακάτω μέθοδος:

- Υπολογίζεται η μέση ακτίνα των αυλακιών R_{slot} .
- Γνωρίζοντας την διατομή του αυλακιού S_{slot} και τον συντελεστή πληρότητας ff , υπολογίζεται η συνολική διατομή του χαλκού ανά αύλακα S_{Cu} :

$$S_{Cu} = \frac{S_{slot}}{ff} \quad (5.12)$$

- Υπολογίζεται η διατομή ενός αγωγού S_w διαιρώντας την συνολική διατομή χαλκού ανά αύλακα με το ήμισυ των αγωγών ανά αύλακα n_c , επειδή το τύλιγμα είναι διπλής στρώσης:

$$S_w = \frac{S_{Cu}}{\frac{n_c}{2}} \quad (5.13)$$

- Υπολογίζεται το μη ενεργό μήκος των αγωγών **lends** θεωρώντας συντελεστή πλέξης $olf=1,2$. Συμβολίζουμε ως **angle** την γωνία μεταξύ των δύο αντίθετων φάσεων που καλύπτει το μη ενεργό μήκος του αγωγού:

$$l_{ends} = olf \times 2\pi R_{slot} \frac{angle}{360^\circ} \quad (5.14)$$

- Υπολογίζεται το συνολικό μήκος l_w του αγωγού για ένα πηνίο, γνωρίζοντας το ενεργό μήκος L του κινητήρα:

$$l_w = 2l_{ends} + 2L \quad (5.15)$$

- Υπολογίζεται η ειδική αντίσταση του χαλκού θεωρώντας θερμοκρασία λειτουργίας 70°C :

$$\rho_{Cu70} = \rho_{Cu20} (1 + a(70^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})) \quad (5.16)$$

Άρα:

$$\rho_{Cu70} = 1,68 \times 10^{-5} \Omega\text{mm} \times (1 + 0,0039(70^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})) = 2,008 \times 10^{-5} \Omega\text{mm}$$

- Η αντίσταση του πηνίου R_w θα είναι:

$$R_w = \rho_{Cu70} \frac{l_w}{S_w} \quad (\Omega) \quad (5.17)$$

- Τέλος, οι απώλειες χαλκού P_{Cu} θα είναι:

$$P_{Cu} = 3 R_w (J S_w)^2 \quad (W) \quad (5.18)$$

Αντι-ΗΕΔ

Η αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη δίνεται από τον τύπο:

$$EMF = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad , \quad (5.19)$$

όπου Φ η μαγνητική ροή.

Εμπλέκοντας την γωνία περιστροφής του δρομέα θ , ο τύπος μπορεί να εκφραστεί ως:

$$EMF = \omega \frac{\Delta \Phi}{\Delta \theta} = \omega \frac{\Phi_{\theta_{\kappa+1}} - \Phi_{\theta_{\kappa}}}{\theta_{step}} \quad , \quad (5.20)$$

όπου θ_{κ} και $\theta_{\kappa+1}$ διαδοχικές θέσεις του δρομέα που απέχουν μεταξύ τους γωνία θ_{step} .

Πιο συγκεκριμένα, έστω για το πηνίο της φάσης A με N σπείρες, η μαγνητική ροή Φ_A θα είναι:

$$\Phi_A = \frac{1}{S_{slot}} \int_{S_{slot}} A ds \quad , \quad (5.21)$$

όπου A το μαγνητικό δυναμικό, ενώ η ολική ροή είναι:

$$\Phi_{ολ} = \Phi_A - \Phi_{-A} \quad . \quad (5.22)$$

Τελικά η αντι-ΗΕΔ θα είναι:

$$EMF = N \omega \frac{\Phi_{ολ, \kappa+1} - \Phi_{ολ, \kappa}}{\theta_{step}} \quad . \quad (5.23)$$

Υπολογίζοντας την αντι-ΗΕΔ σε κάθε σημείο για μια περιστροφή του δρομέα κατά ένα πολικό βήμα, προκύπτει η κυματομορφή της συναρτήσεως της θέσης του δρομέα.

Αρμονική παραμόρφωση αντι-ΗΕΔ (THD)

Η αρμονική παραμόρφωση της αντι-ΗΕΔ ή αλλιώς THD (Total Harmonic Distortion) υπολογίζεται εφαρμόζοντας διακριτό μετασχηματισμό Fourier (Discrete Fourier Transform, DFT) στα σημεία της κυματομορφής της. Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier για τα σημεία x_0 ως x_{N-1} ορίζεται από τον τύπο:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{\frac{-i2\pi kn}{N}} \quad k=0,1, \dots, N-1 \quad (5.24)$$

Έχοντας τα πλάτη των αρμονικών συνιστωσών της αντι-ΗΕΔ από τον μετασχηματισμό, υπολογίζουμε την αρμονική παραμόρφωση με τον γνωστό τύπο:

$$THD = \frac{\sqrt{V_3^2 + V_5^2 + V_7^2 \dots}}{V_1}, \quad (5.25)$$

όπου V_1 το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας και $V_3, V_5, V_7 \dots$ τα πλάτη των αρμονικών.

Απόδοση

Για τον υπολογισμό της απόδοσης του κινητήρα λαμβάνουμε υπ' όψη μόνο τις απώλειες χαλκού και σιδήρου, καθώς οι υπόλοιπες απώλειες (τριβών, ανεμισμού κλπ.) δεν μπορούν να υπολογιστούν θεωρητικά. Ούτως ή άλλως οι απώλειες χαλκού και σιδήρου αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών οπότε δίνουν μια καλή εκτίμηση της απόδοσης:

$$\eta(\%) = 100 \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{Fe} + P_{Cu}} = 100 T \frac{\omega}{T\omega + P_{Fe} + P_{Cu}} \quad (5.26)$$

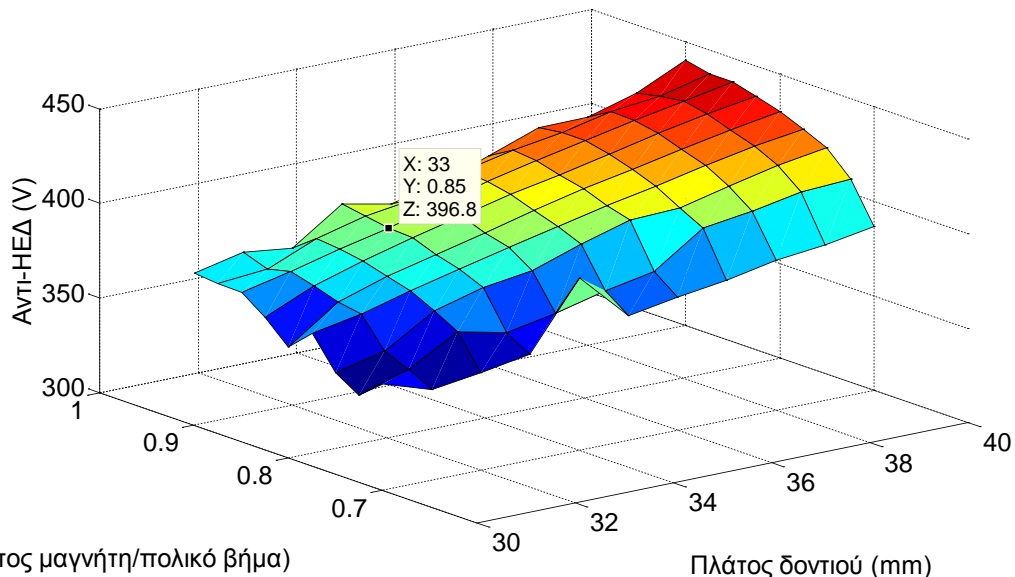
5.3.2 Βελτιστοποίηση πλάτους μαγνήτη - πάχους δοντιού

Σε αυτό το στάδιο γίνεται ανάλυση των γεωμετριών με πλάτη μαγνήτη από 70% έως 90% και με πάχη δοντιού από 30mm έως 40mm. Επιλέγεται πλάτος μαγνήτη ίσο με **85%** του πολικού βήματος και πάχος δοντιού στάτη **33 mm**. Οι λόγοι εξηγούνται αναλυτικά στην συνέχεια.

5.3.2.1 Ονομαστικό ρεύμα

Αντι-HEΔ

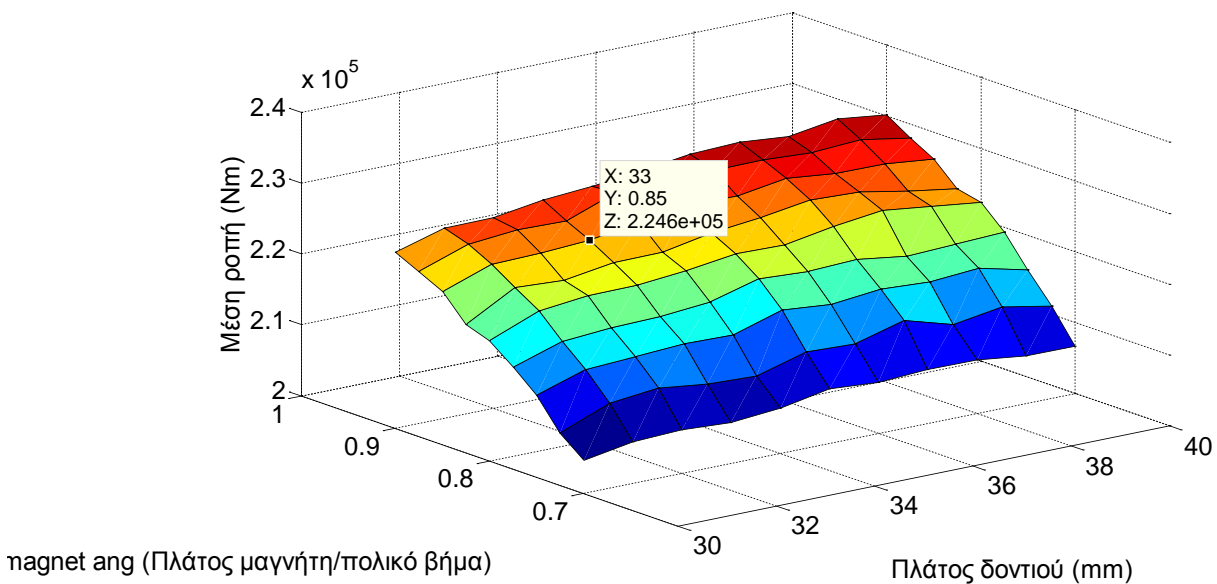
Ένα βασικό κριτήριο επιλογής του βέλτιστου σημείου είναι η τιμή της αντι-HEΔ να είναι μικρότερη των 690V (πολική) ή 400V (φασική, στην εικόνα 5.6). Έτσι εξασφαλίζουμε ότι η τάση στα άκρα των τυλιγμάτων, η οποία είναι περίπου ίση με την αντι-HEΔ, θα βρίσκεται κι αυτή στο επίπεδο των 690V. Ο λόγος για τον οποίο θέτουμε αυτό τον περιορισμό είναι ότι ο κινητήρας τροφοδοτείται από αντιστροφέα (inverter) του οποίου η έξοδος εξαρτάται από τον ζυγό συνεχούς τάσης (DC bus) του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου. Αν η αντι-HEΔ ξεπεράσει το όριο που θέτουμε ο αντιστροφέας δεν θα μπορεί να οδηγήσει τον κινητήρα. Για πλάτος μαγνήτη 85% του πολικού βήματος και πάχος δοντιού 33 mm αυτός ο περιορισμός ικανοποιείται και επιτυγχάνεται αντι-HEΔ πολύ κοντά στο επιθυμητό επίπεδο τάσης.



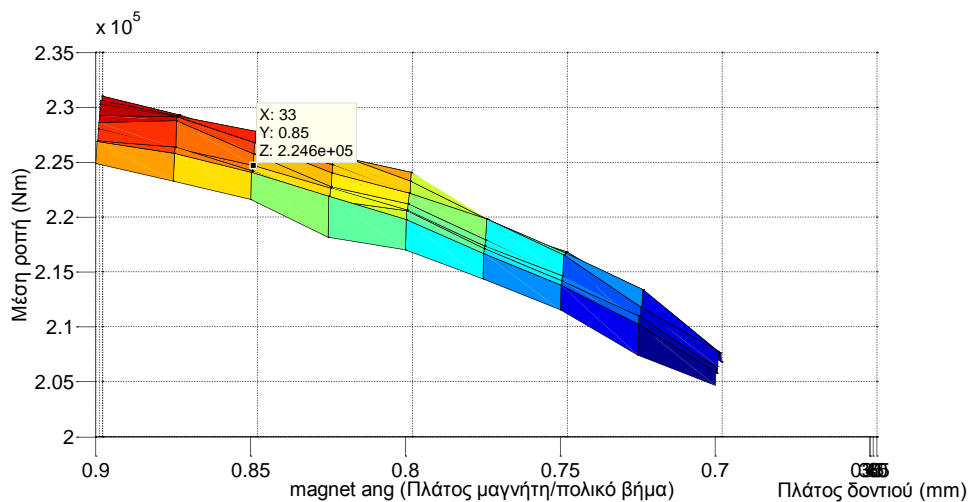
Σχήμα 5.6: Διάγραμμα της φασικής αντι-HEΔ (rms) συναρτήσεως του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

Μέση ροπή

Εδώ το κριτήριο είναι η μέση ροπή να υπερβαίνει την προδιαγραφή (215 kNm) και ταυτόχρονα η αντι-ΗΕΔ στο αντίστοιχο σημείο να είναι κάτω από τα 400V. Στο εύρος τιμών που εξετάζουμε η ροπή κυμαίνεται περίπου από 206 έως 231 kNm, ενώ η προδιαγραφή ικανοποιείται για πλάτη μαγνήτη πάνω από 75%. Το πλάτος του δοντιού δεν έχει τόσο σημαντική επίδραση, με την ροπή να παρουσιάζει μια ανεπαίσθητη αύξηση για μεγαλύτερα πλάτη δοντιού. Αναγκαστικά λοιπόν επιλέγεται μεγάλο πλάτος μαγνήτη με μικρό πάχος δοντιού για να ικανοποιούνται και τα δύο κριτήρια (ροπής και αντι-ΗΕΔ). Στην εικόνα 5.8 βλέπουμε ότι η αύξηση της ροπής ως προς το πλάτος του μαγνήτη κάνει “γόνατο” οπότε και για λόγους μείωσης του όγκου του μαγνήτη επιλέγεται πλάτος 85% αντί για 90% του πολικού βήματος. Έτσι εξοικονομούνται περίπου 6000 cm³ ή 45 κιλά μόνιμου μαγνήτη, κάτι που επιφέρει και μείωση του κόστους του κινητήρα.

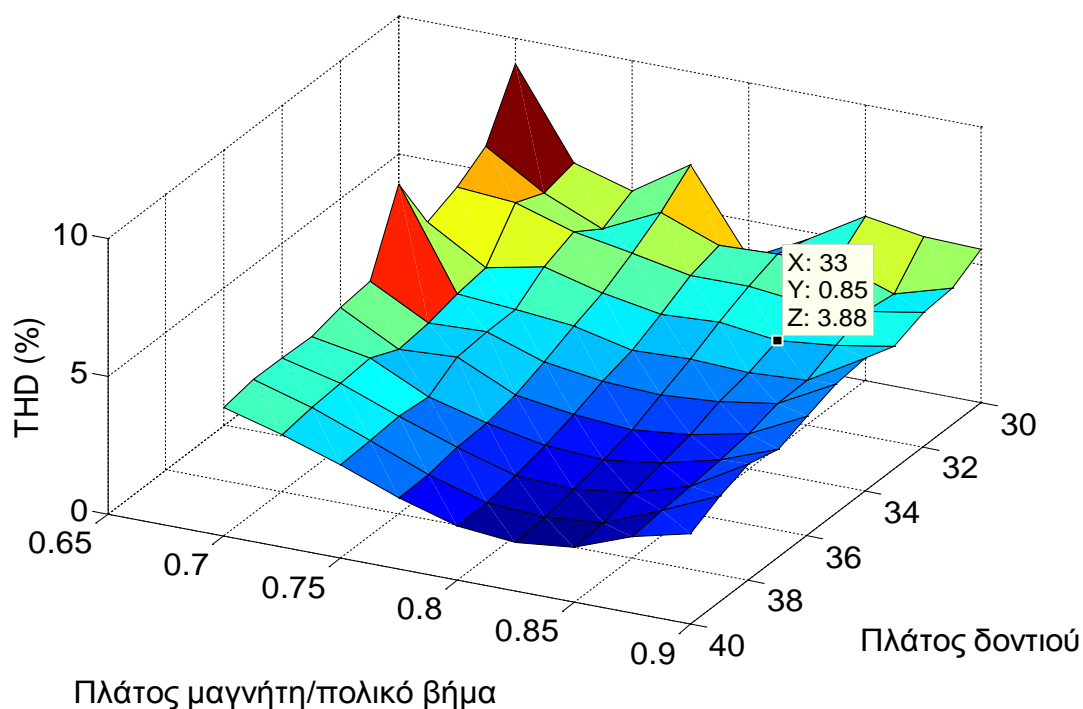


Σχήμα 5.7: Διάγραμμα της ροπής συναρτήσει του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.



Σχήμα 5.8: Λεπτομέρεια του διαγράμματος ροπής συναρτήσει του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

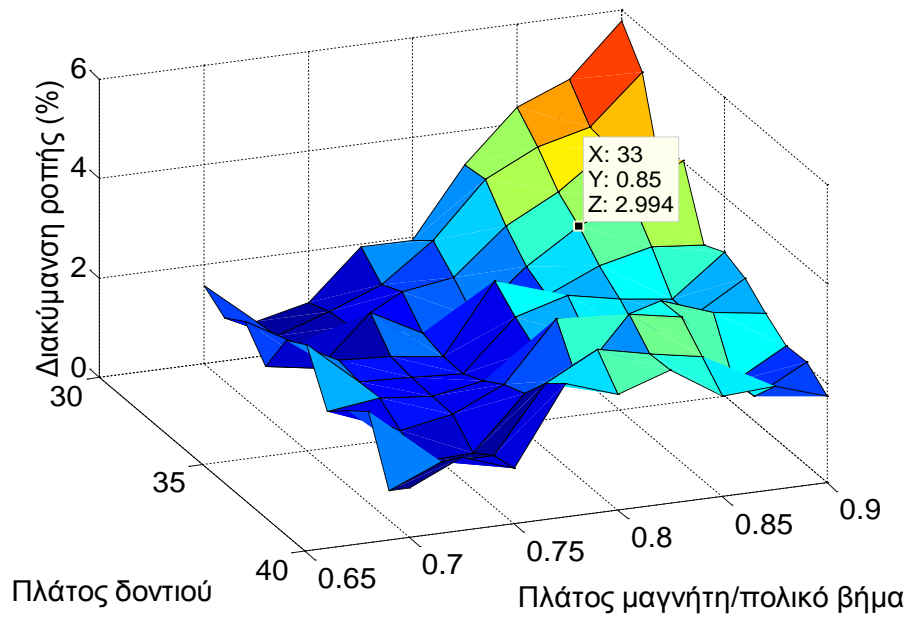
Αρμονική παραμόρφωση αντι-HEΔ



Σχήμα 5.9: Διάγραμμα της αρμονικής παραμόρφωσης της αντι-HEΔ συναρτήσει του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

Όπως παρατηρούμε στο παραπάνω διάγραμμα η αρμονική παραμόρφωση της αντι - ηλεκτρεγερτικής δύναμης κυμαίνεται από 1,8 % έως 9%. Η τιμή του 3,9% για τις επιλεχθείσες τιμές πλάτους μαγνήτη και δοντιού κρίνεται ικανοποιητική.

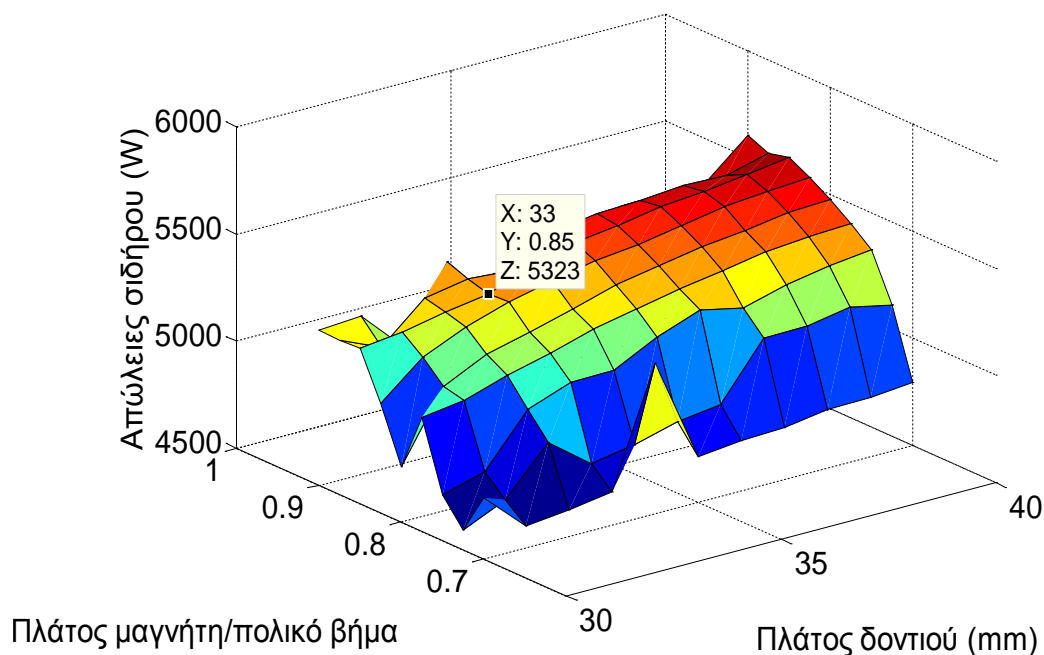
Διακύμανση ροπής



Σχήμα 5.10: Διάγραμμα της διακύμανσης της ροπής συναρτήσει του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

Η διακύμανση της ροπής στον άξονα του κινητήρα κυμαίνεται από 0,6% έως 5,8%, δηλαδή είναι πολύ μικρή για όλο το εύρος τιμών. Οπότε η διακύμανση της τελικής επιλογής που είναι περίπου 3% είναι κι αυτή ικανοποιητική.

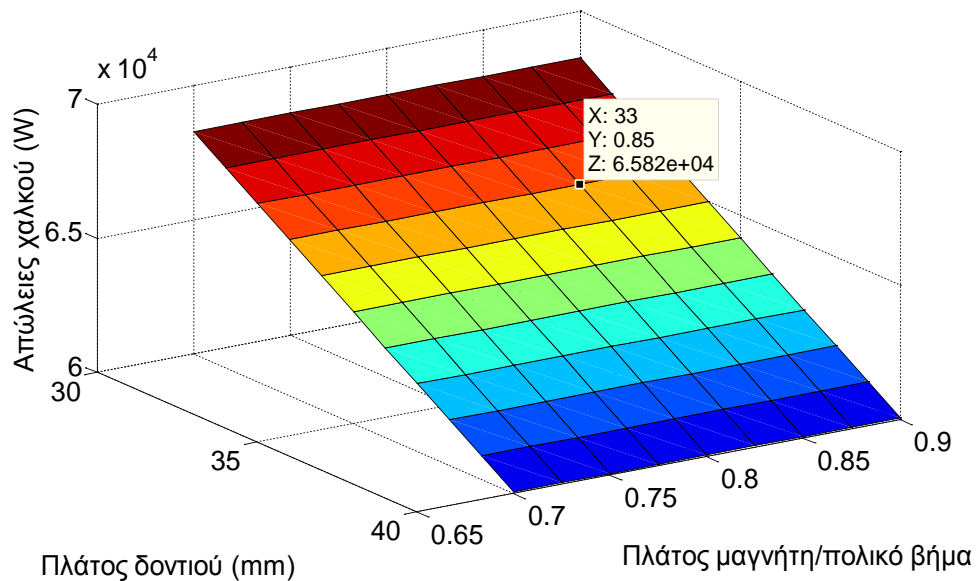
Απώλειες σιδήρου



Σχήμα 5.11: Διάγραμμα των απωλειών σιδήρου συναρτήσει του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

Οι απώλειες σιδήρου του κινητήρα είναι πολύ λίγες δεδομένης της μεγάλης ισχύος του, κάτι που οφείλεται κατά κύριο στην μαγνητική λαμαρίνα που χρησιμοποιήθηκε στην σχεδίαση, και η μεταβολή τους είναι σχετικά μικρή, από τα 4600W έως τα 5600W. Ο κυριότερος παράγοντας που τις επηρεάζει είναι το πλάτος των επιφανειακών μαγνητών. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα σημεία με χαμηλές απώλειες σιδήρου αντιστοιχούν σε σημεία με ροπή μικρότερη της προδιαγραφής (μικρά πλάτη επιφανειακών μαγνητών). Για τον λόγο αυτό οι απώλειες σιδήρου δεν έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην επιλογή των διαστάσεων μαγνήτη και δοντιού.

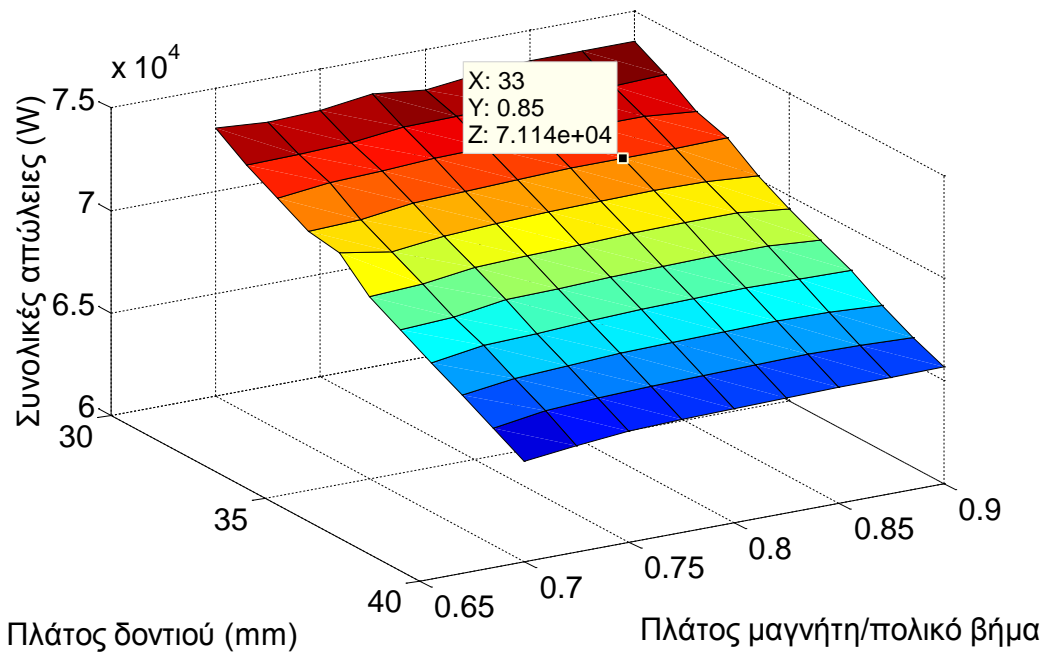
Απώλειες χαλκού



Σχήμα 5.12: Διάγραμμα των απωλειών χαλκού συναρτήσει του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

Οι απώλειες χαλκού εξαρτώνται μόνο από το πλάτος του δοντιού: όσο μεγαλύτερο το πλάτος του δοντιού, τόσο λιγότερος χαλκός χωράει στην αύλακα. Άρα, αφού στην προσομοίωση με το λογισμικό FEMM διατηρούμε σταθερή την πυκνότητα ρεύματος στα 6 A/mm^2 ώστε να μην έχουμε προβλήματα υπερθέρμανσης στο τύλιγμα, μειώνεται το ρεύμα και οι απώλειες χαλκού. Πρέπει να διευκρινιστεί ότι στα σημεία με χαμηλές απώλειες χαλκού η αντι-ΗΕΔ βρίσκεται πάνω από το όριο των 400V.

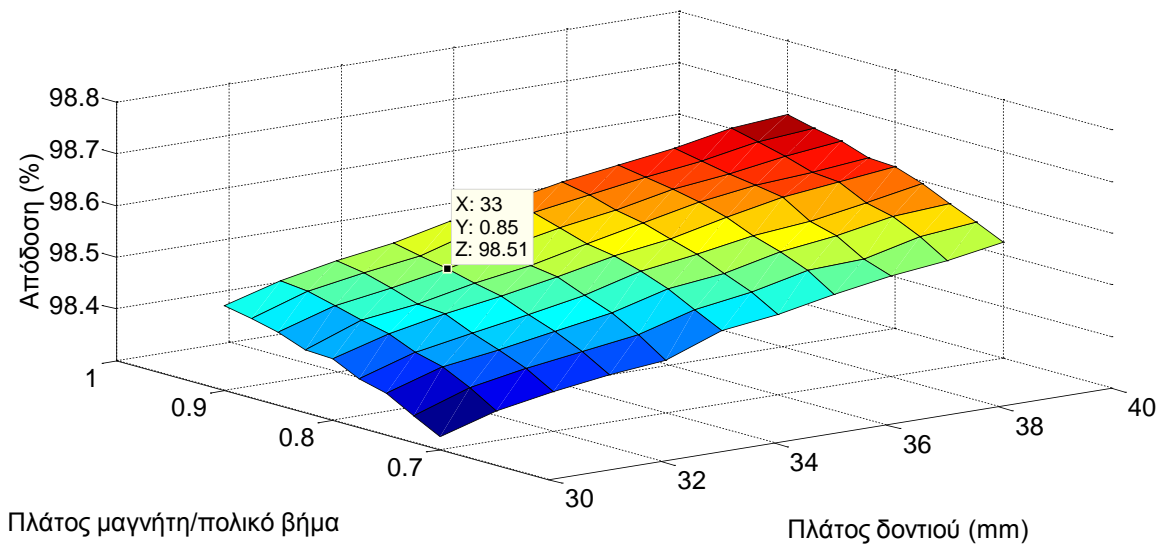
Συνολικές απώλειες (χαλκού και σιδήρου)



Σχήμα 5.13: Διάγραμμα των συνολικών απωλειών συναρτήσει του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

Οι συνολικές απώλειες (άθροισμα απωλειών χαλκού και σιδήρου) στα 71 kW είναι πολύ ικανοποιητικές δεδομένης της ισχύος της μηχανής (4,5 MW). Στο γράφημα φαίνεται ότι θα μπορούσαν να είναι ακόμη χαμηλότερες αλλά υπάρχει ο περιορισμός στην τάση τροφοδοσίας που έχει αναφερθεί προηγουμένως.

Απόδοση



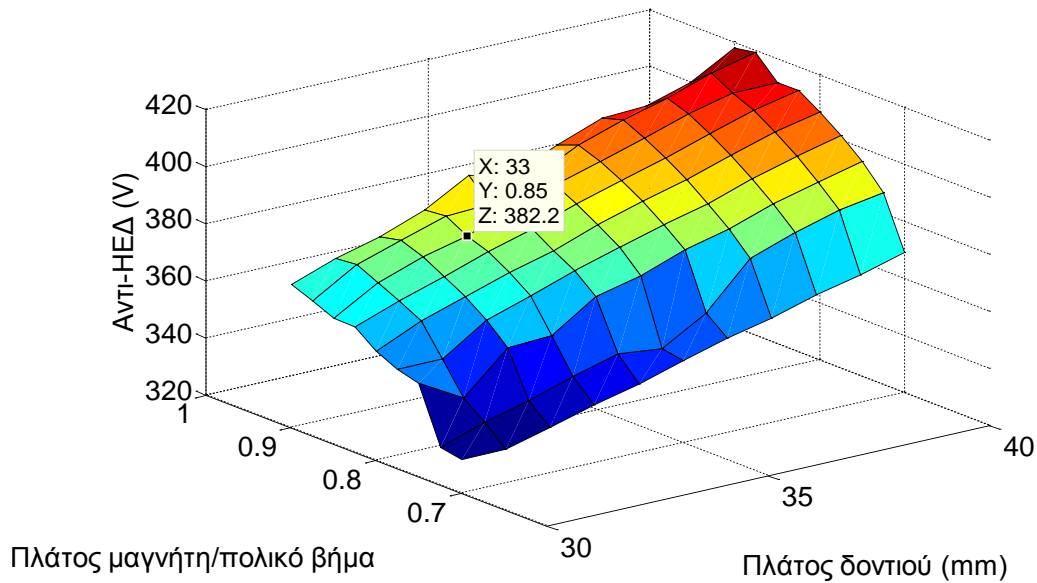
Σχήμα 5.14: Διάγραμμα της απόδοσης συναρτήσει του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

Απ' ότι φαίνεται στην εικόνα 5.14 η απόδοση δεν επηρεάζεται σημαντικά από τις διαστάσεις του μαγνήτη και του δοντιού, καθώς κυμαίνεται μεταξύ 98,32% και 98,65%. Η επιλογή πλάτους μαγνήτη και δοντιού που κάναμε δίνει αυξημένες απώλειες, όμως αντιστοιχεί και σε αυξημένη ροπή, με αποτέλεσμα να μην έχουμε μειωμένη απόδοση του κινητήρα.

5.3.2.2 1/4 ονομαστικού ρεύματος

Σε αυτή την παράγραφο για τις επιλεγμένες τιμές πλάτους μαγνήτη και δοντιού στο ονομαστικό ρεύμα εξετάζουμε τι συμβαίνει όταν το ρεύμα είναι ίσο με 1/4 του ονομαστικού.

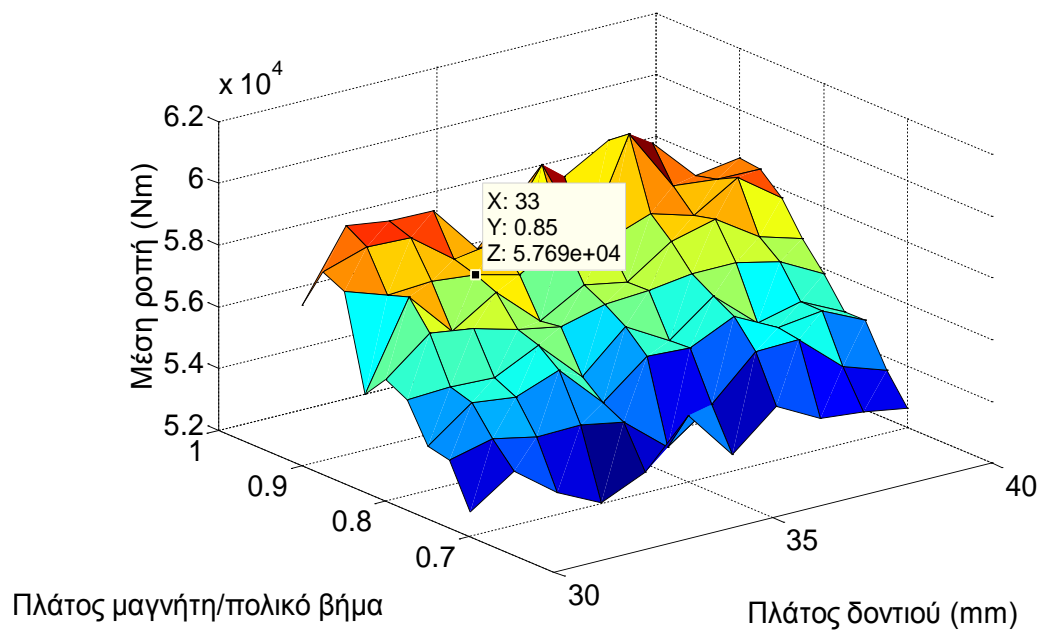
Αντι-ΗΕΔ



Σχήμα 5.15: Διάγραμμα της φασικής αντι-ΗΕΔ συναρτήσεως του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

Το διάγραμμα της αντι-ΗΕΔ για συνθήκες υποφόρτισης δεν διαφέρει σε μορφή με το προηγούμενο, όμως όπως είναι φυσιολογικό παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές.

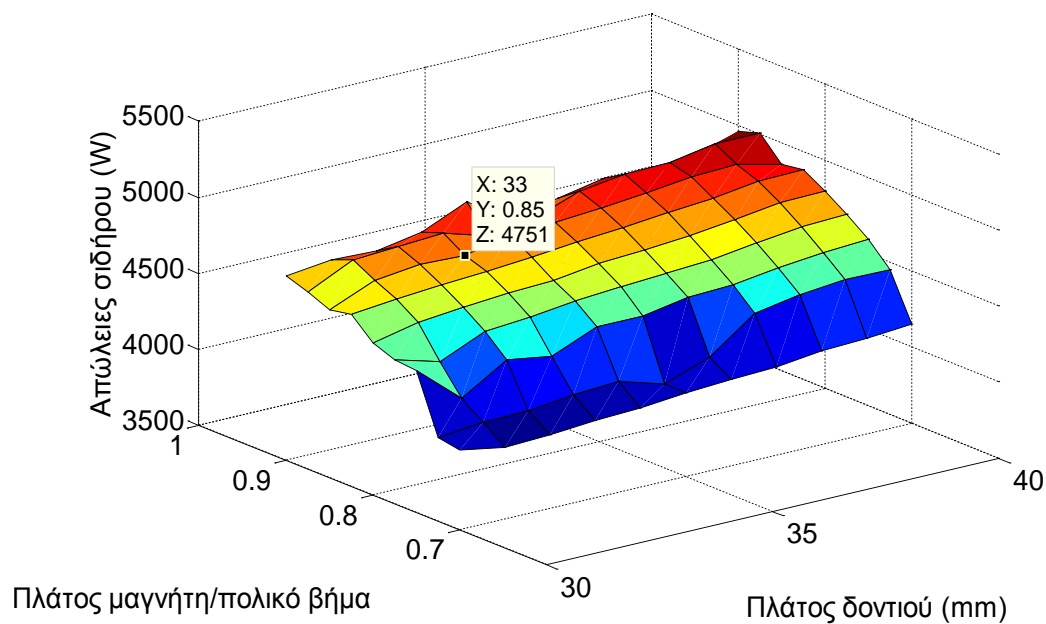
Μέση ροπή



Σχήμα 5.16: Διάγραμμα της μέσης ροπής συναρτήσει του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

Έχοντας ρεύμα ίσο με $1/4$ του ονομαστικού, η ροπή παρουσιάζει ανάλογη μείωση. Και πάλι η ροπή εξαρτάται κυρίως από το πλάτος του μαγνήτη, όμως αυτή η αύξηση δεν είναι τόσο ξεκάθαρη όπως στο ονομαστικό ρεύμα.

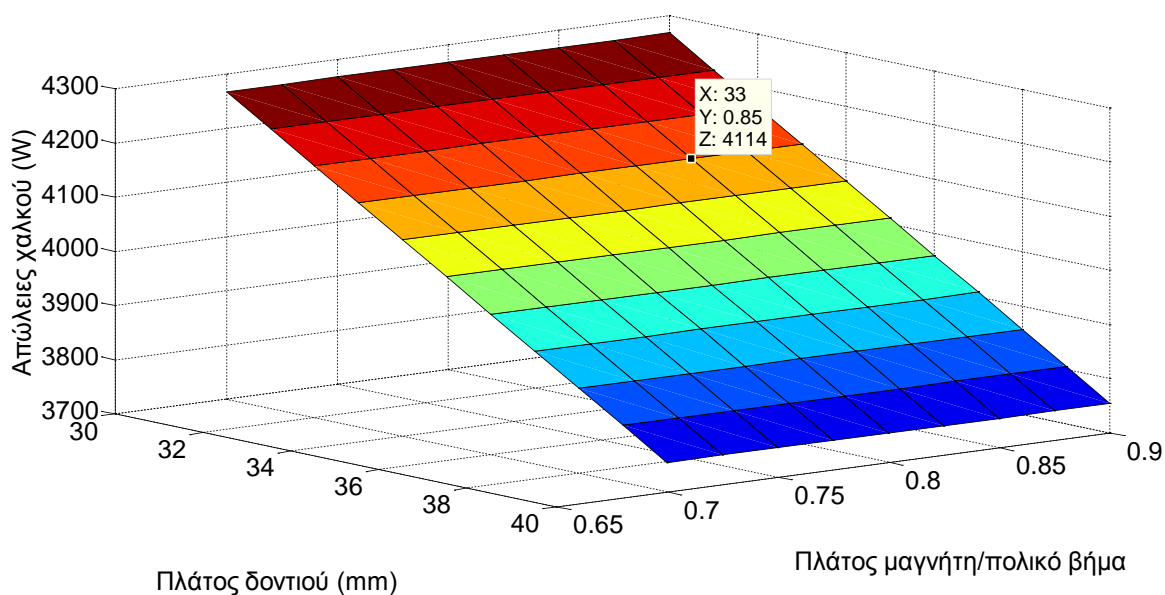
Απώλειες σιδήρου



Σχήμα 5.17: Διάγραμμα των απωλειών σιδήρου συναρτήσει του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

Το διάγραμμα των απωλειών σιδήρου είναι σχεδόν πανομοιότυπο σε μορφή με του ονομαστικού ρεύματος, με μικρότερες τιμές όμως όπως είναι φυσιολογικό λόγω της μικρότερης φόρτισης του μαγνητικού κυκλώματος του κινητήρα.

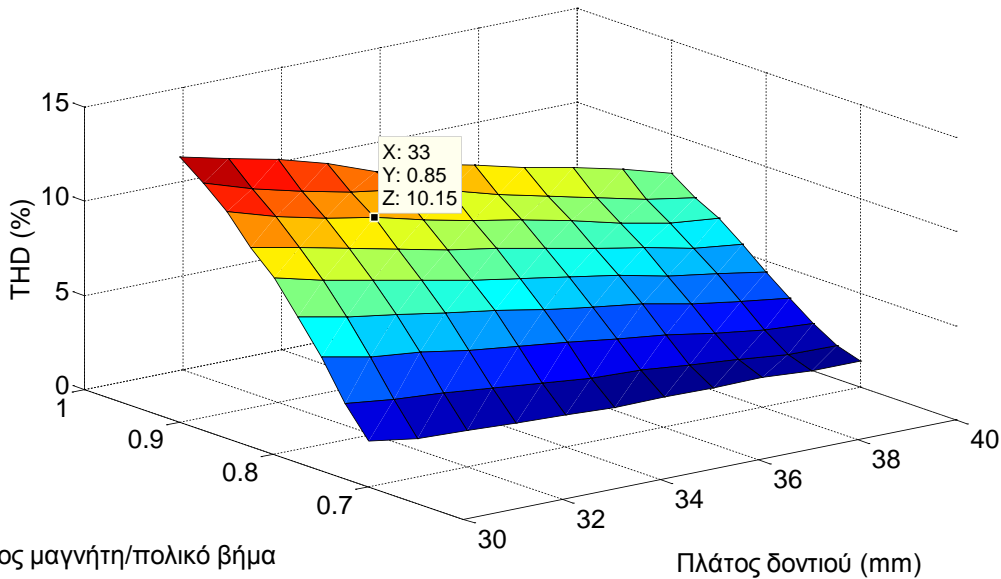
Απώλειες χαλκού



Σχήμα 5.18: Διάγραμμα των απωλειών χαλκού συναρτήσει του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

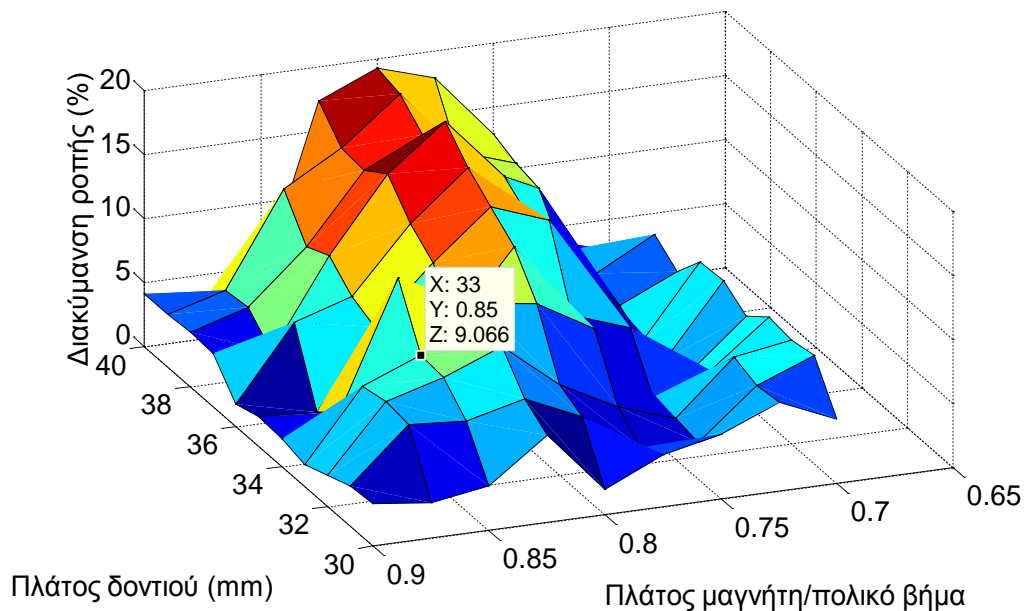
Οι απώλειες χαλκού, όντας ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος, είναι ακριβώς ίσες με το 1/16 των απωλειών χαλκού για ονομαστικό ρεύμα.

Αρμονική παραμόρφωση



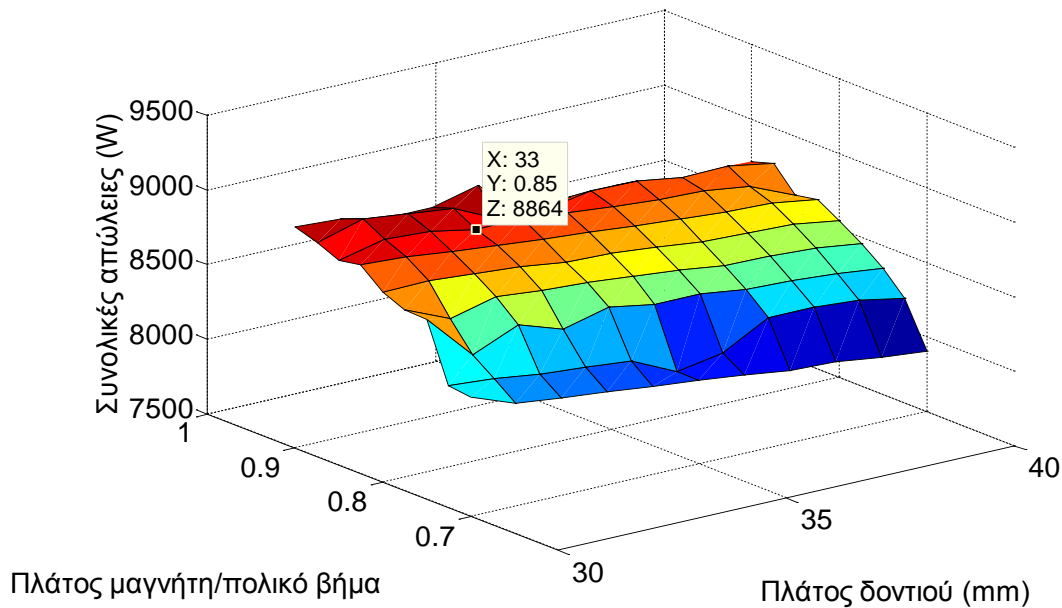
Σχήμα 5.19: Διάγραμμα της αρμονικής παραμόρφωσης της αντι-HEΔ συναρτήσεως του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

Διακύμανση ροπής



Σχήμα 5.20: Διάγραμμα της διακύμανσης της ροπής συναρτήσεως του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

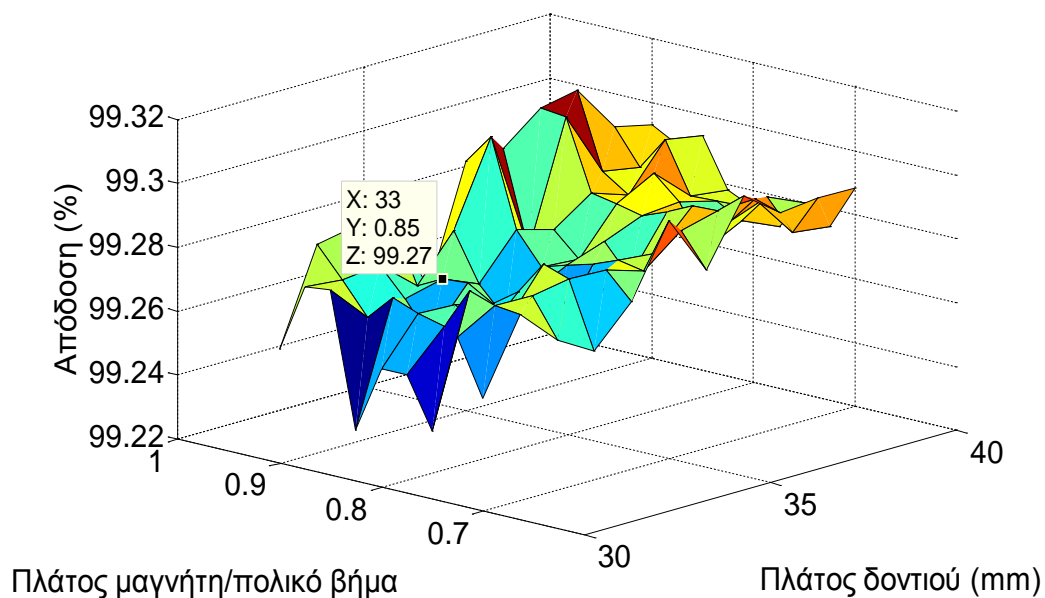
Συνολικές απώλειες



Σχήμα 5.21: Διάγραμμα των συνολικών απωλειών (χαλκού και σιδήρου) συναρτήσει του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

Οι συνολικές απώλειες του κινητήρα είναι σημαντικά μειωμένες κυρίως λόγω των πολύ χαμηλότερων απωλειών χαλκού.

Απόδοση



Σχήμα 5.22: Διάγραμμα της απόδοσης του κινητήρα συναρτήσει του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

Η απόδοση του κινητήρα σε συνθήκες υποφόρτισης είναι ελαφρώς αυξημένη λόγω της μεγάλης μείωσης των απωλειών χαλκού, και επηρεάζεται ελάχιστα από την γεωμετρία.

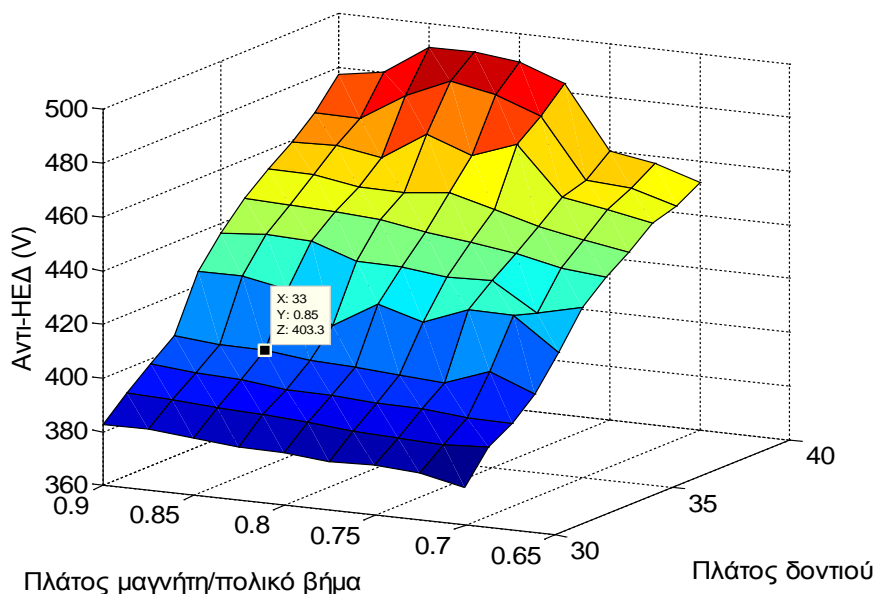
5.3.2.3 Ρεύμα διπλάσιο του ονομαστικού

Σε αυτή την παράγραφο για τις επιλεγμένες τιμές πλάτους μαγνήτη και δοντιού στο ονομαστικό ρεύμα εξετάζουμε τι συμβαίνει όταν το ρεύμα είναι ίσο με το διπλάσιο του ονομαστικού.

Τα συμπεράσματα που βγάζουμε συνοπτικά από τα διαγράμματα είναι τα εξής:

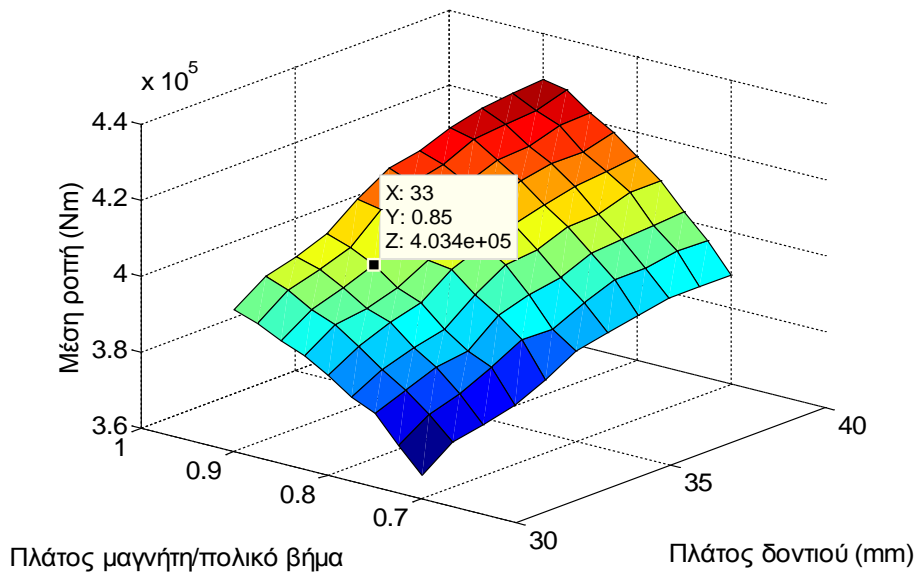
- Η αντι-ΗΕΔ παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά στις μεταβολές της γεωμετρίας, και ξεπερνά ελαφρώς την προδιαγραφή.
- Η μέση ροπή είναι σημαντικά αυξημένη αλλά δεν ακολουθεί τον διπλασιασμό του ρεύματος, γεγονός που δείχνει τον κορεσμό της μαγνητικής λαμαρίνας.
- Οι απώλειες σιδήρου παρουσιάζουν μικρή αύξηση ενώ οι απώλειες χαλκού τετραπλασιάζονται λόγω του διπλασιασμού του ρεύματος.
- Η αρμονική παραμόρφωση της αντι-ΗΕΔ πλησιάζει το 20%, όμως η διακύμανση της ροπής παραμένει χαμηλή στο 3,1%.

Αντι-ΗΕΔ



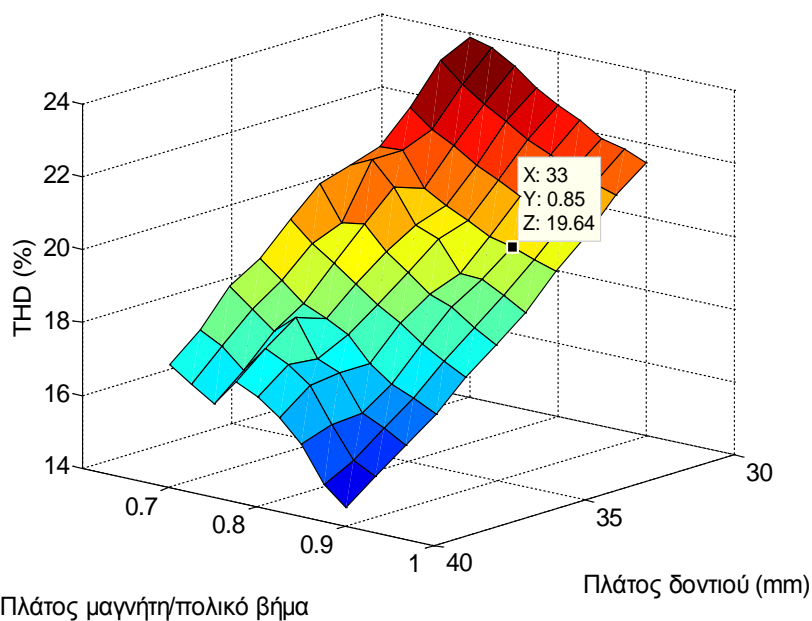
Σχήμα 5.23: Διάγραμμα της φασικής αντι-ΗΕΔ συναρτήσει του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

Μέση ροπή



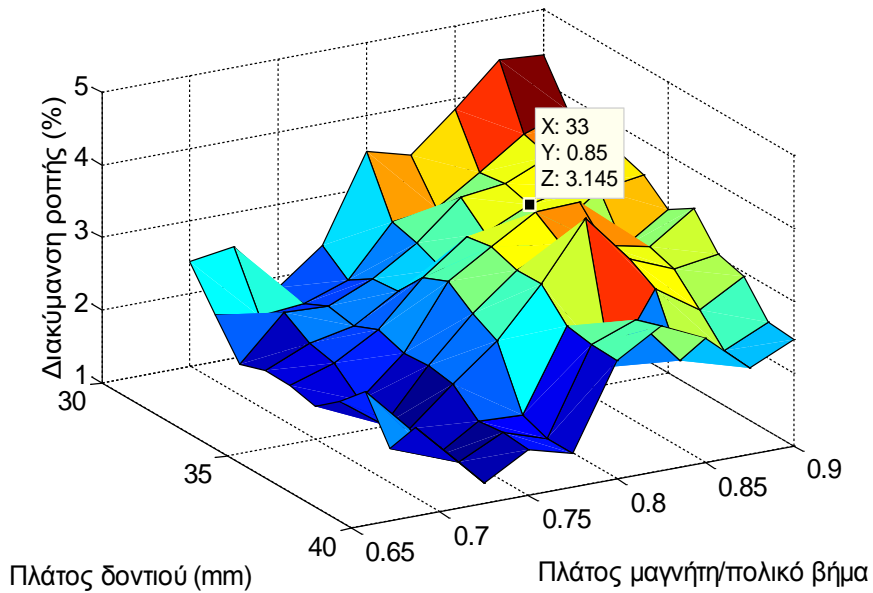
Σχήμα 5.24: Διάγραμμα της μέσης ροπής του κινητήρα συναρτήσει του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

Αρμονική παραμόρφωση αντι-HEΔ



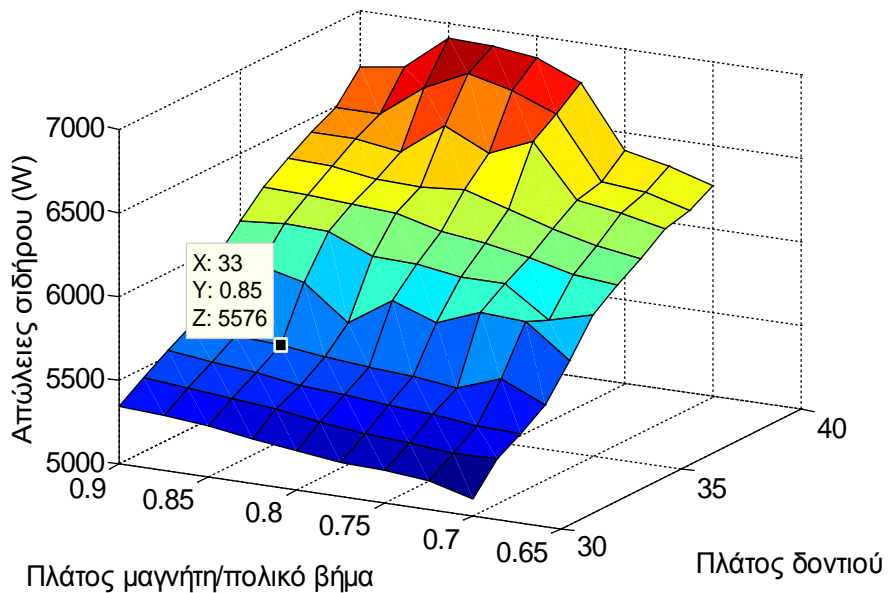
Εικόνα 5.25: Διάγραμμα της αρμονικής παραμόρφωσης της αντι-HEΔ συναρτήσει του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

Διακύμανση ροπής



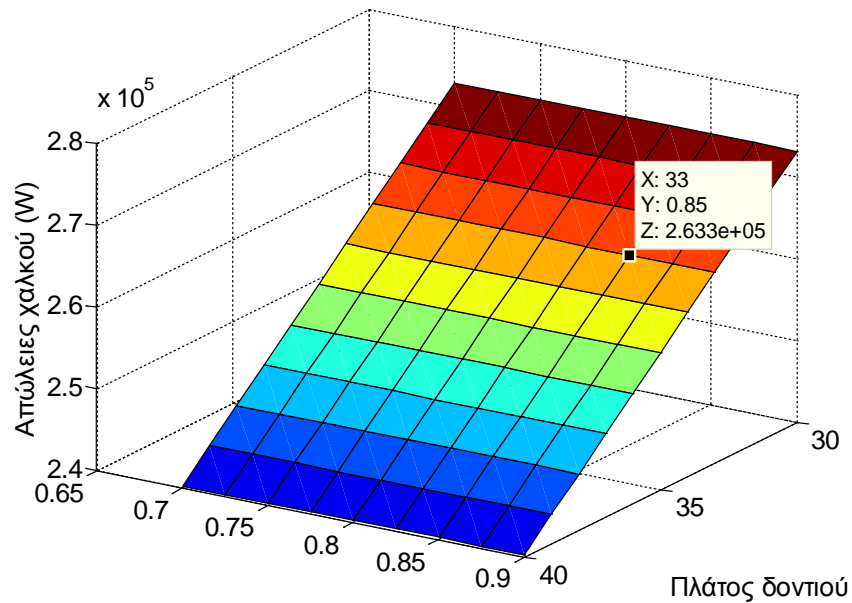
Σχήμα 5.26: Διάγραμμα της διακύμανσης της ροπής συναρτήσει του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

Απώλειες σιδήρου



Σχήμα 5.27: Διάγραμμα των απωλειών σιδήρου συναρτήσει του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

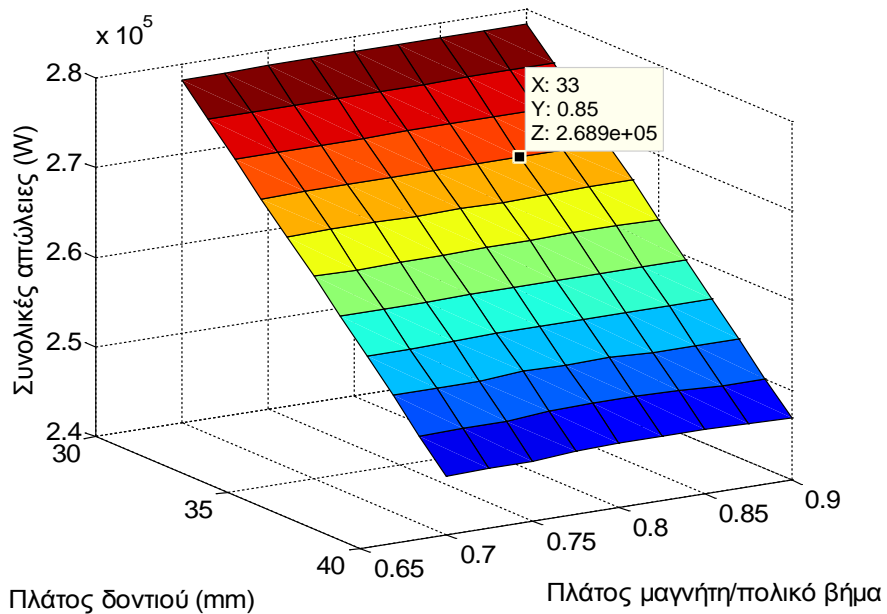
Απώλειες χαλκού



Πλάτος μαγνήτη/πολικό βήμα

Σχήμα 5.28: Διάγραμμα των απωλειών χαλκού συναρτήσει του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

Συνολικές απώλειες



Πλάτος δοντιού (mm)

Πλάτος μαγνήτη/πολικό βήμα

Σχήμα 5.29: Διάγραμμα των συνολικών απωλειών (χαλκού και σιδήρου) συναρτήσει του πλάτους δοντιού και μαγνήτη.

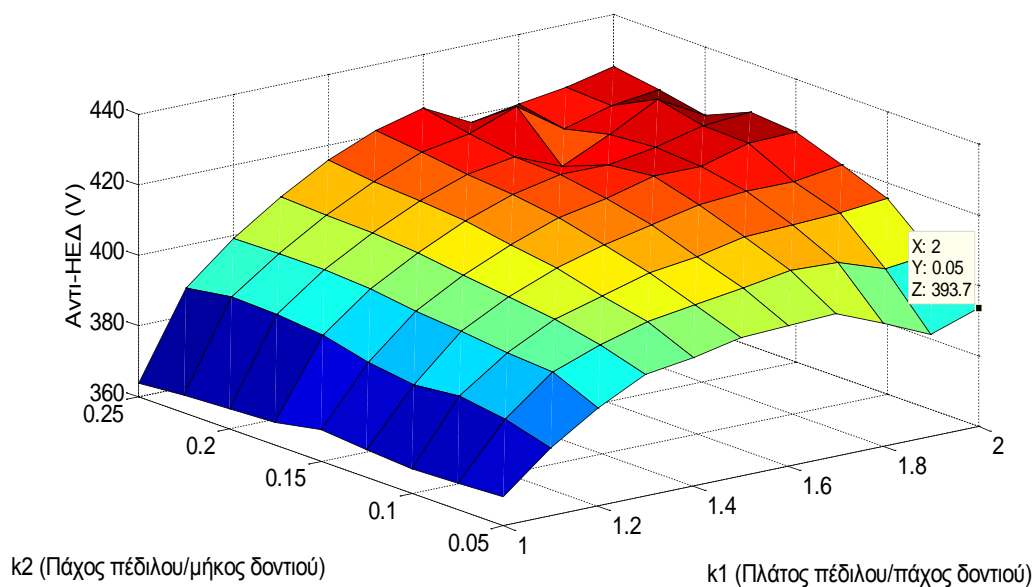
5.3.3 Βελτιστοποίηση πλάτους (k_1) και πάχους (k_2) πέλδλου

Στο δεύτερο στάδιο της βελτιστοποίησης εξετάζουμε πάλι τα ίδια χαρακτηριστικά του κινητήρα για τρεις διαφορετικές τιμές του ρεύματος, αυτήν την φορά όμως μεταβάλλοντας το πλάτος του πέλδλου του δοντιού συναρτήσει του πάχους του δοντιού (k_1) και του πάχους του πέλδλου συναρτήσει του μήκους του δοντιού (k_2 , βλέπε εικόνα 5.3).

Το πεδίο σάρωσης περιλαμβάνει τιμές του k_1 από 1 έως 2 και του k_2 από 0,05 έως 0,25. Εδώ επιλέγεται πλάτος πέλδλου διπλάσιο του πάχους του δοντιού ($k_1=2, 66\text{mm}$) και πάχος πέλδλου 0,05 φορές το μήκος του δοντιού ($k_2=0,05, 1,75\text{mm}$).

5.3.3.1 Ονομαστικό ρεύμα

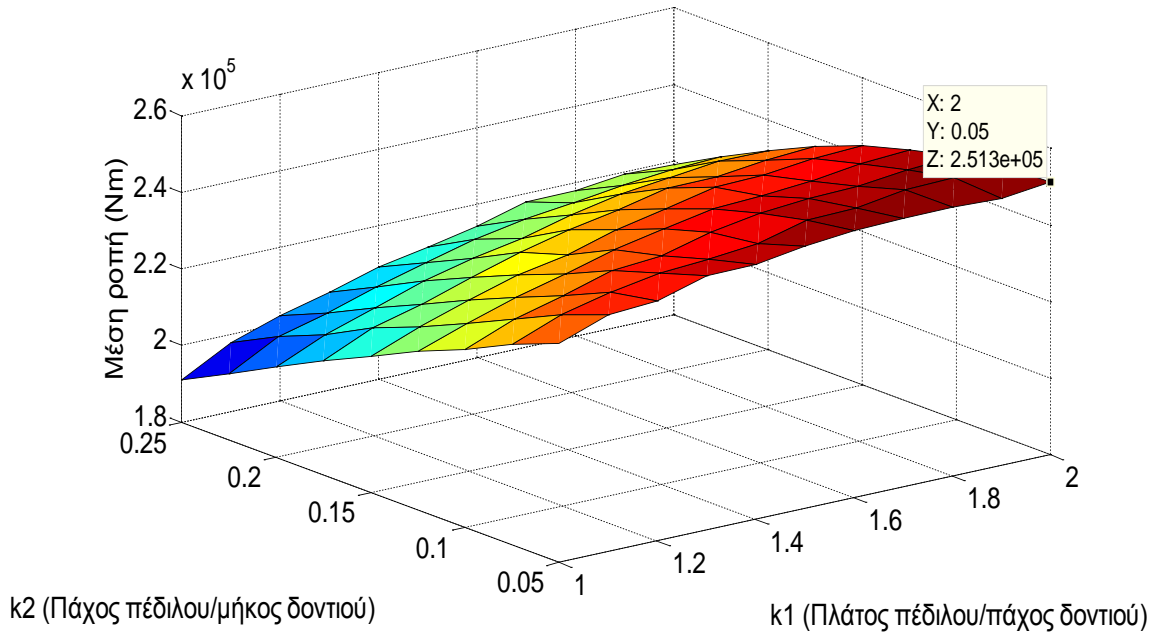
Αντι-HEΔ



Σχήμα 5.30: Διάγραμμα της φασικής αντι-HEΔ συναρτήσει του πλάτους και του πάχους του πέλδλου.

Ομοίως με το πρώτο στάδιο της βελτιστοποίησης επιλέγεται σημείο όπου η φασική αντι-HEΔ είναι λίγο μικρότερη των 400V, έτσι ώστε να είναι δυνατό να οδηγηθεί ο κινητήρας από το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου.

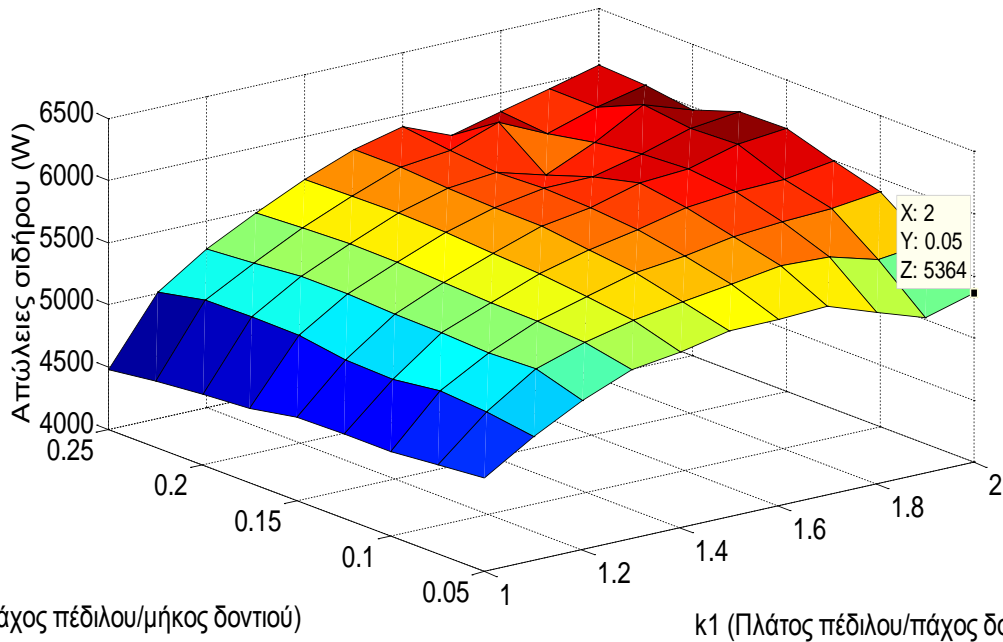
Μέση ροπή



Σχήμα 5.31: Διάγραμμα της μέσης ροπής συναρτήσει του πλάτους και του πάχους του πέδιλου.

Ο άλλος κύριος λόγος για τον οποίο επιλέχθηκαν αυτές οι διαστάσεις του πέδιλου είναι ότι η ροπή για τις επιλεγμένες τιμές μεγιστοποιείται και φυσικά υπερκαλύπτει την προδιαγραφή των 215 kNm, φτάνοντας τα 251 kNm. Παρατηρούμε ότι η ροπή αυξάνεται όσο μεγαλώνει το πλάτος του πέδιλου. Αυτό οφείλεται στην μείωση των σκεδάσεων της μαγνητικής ροής στο διάκενο, αφού το πεπλατυσμένο πέδιλο πλησιάζει το πλάτος του μόνιμου μαγνήτη και επιτυγχάνεται καλύτερη εκμετάλλευση του.

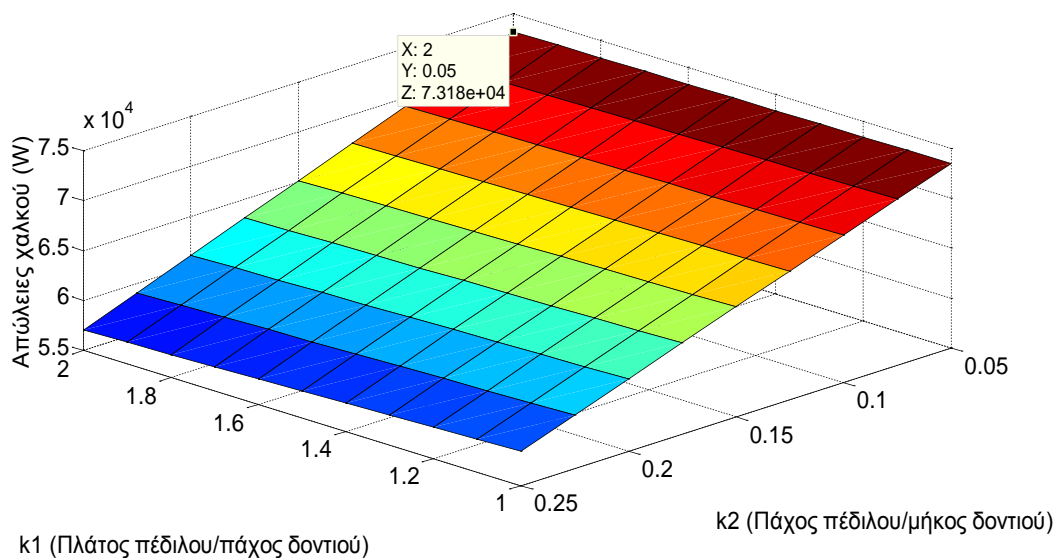
Απώλειες σιδήρου



Σχήμα 5.32: Διάγραμμα των απωλειών σιδήρου συναρτήσει του πλάτους και του πάχους του πέλδλου.

Οι απώλειες σιδήρου κυμαίνονται μεταξύ 4500 και 6100W. Οι τελικές απώλειες των 5364 W είναι πολύ καλές δεδομένης της μεγιστοποίησης της ροπής της μηχανής.

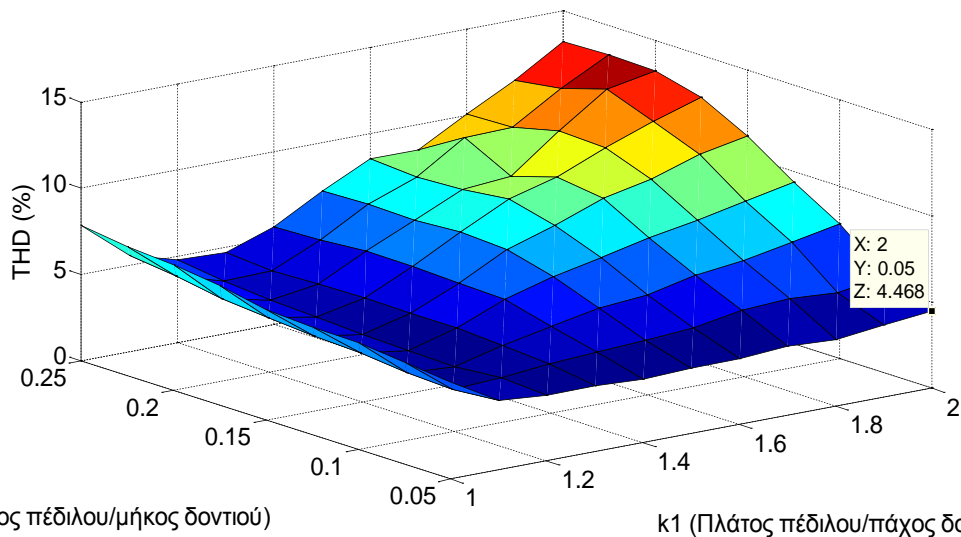
Απώλειες χαλκού



Σχήμα 5.33: Διάγραμμα των απωλειών χαλκού συναρτήσει του πλάτους και του πάχους του πέλδλου.

Οι απώλειες χαλκού για τις επιλεγμένες διαστάσεις πέλδλου μεγιστοποιούνται αφού είναι αντιστρόφως ανάλογες του πάχους του: όσο πιο λεπτό το πέλδλο, τόσο περισσότερος χαλκός χρησιμοποιείται και τόσο περισσότερο ρεύμα διαρρέει το τύλιγμα.

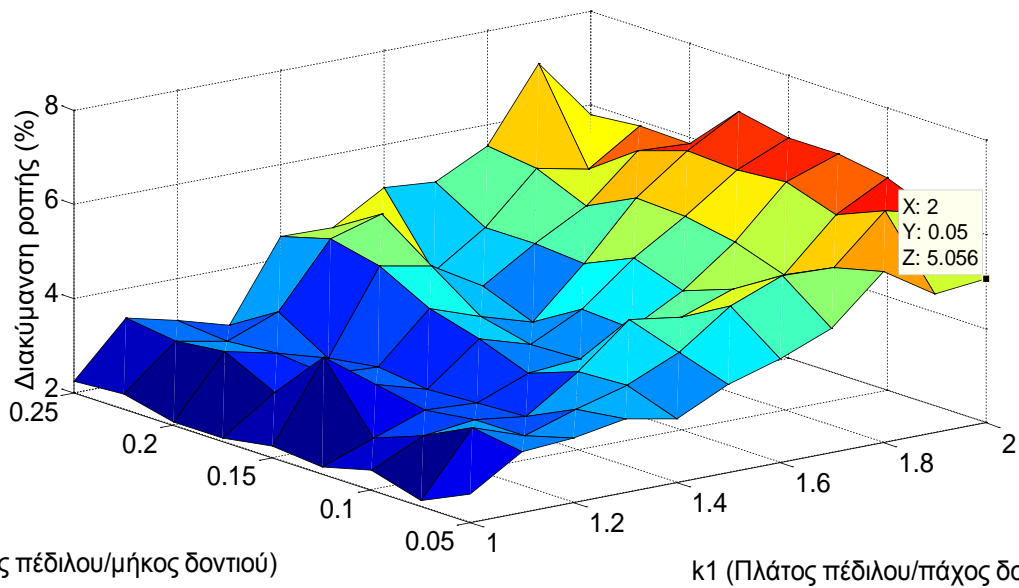
Αρμονική παραμόρφωση



Σχήμα 5.34: Διάγραμμα της αρμονικής παραμόρφωσης της αντι-HEΔ συναρτήσει του πλάτους και του πάχους του πέλδλου.

Η αρμονική παραμόρφωση της αντι-HEΔ είναι 4,47% και βρίσκεται κοντά στην ελάχιστη δυνατή τιμή της, ενώ για κάποια άλλα σημεία πλησιάζει το 14%.

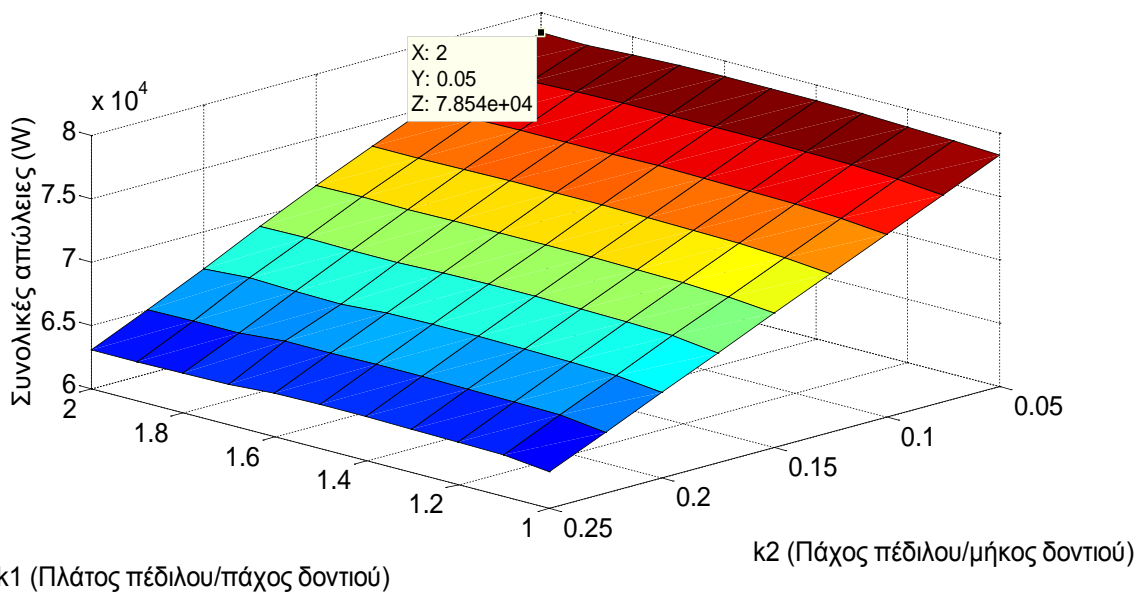
Διακύμανση ροπής



Σχήμα 5.35: Διάγραμμα της διακύμανσης της ροπής συναρτήσει του πλάτους και του πάχους του πέδilu.

Η διακύμανση της ροπής στο 5,06% κρίνεται ικανοποιητική, αν και αυτή ελαχιστοποιείται για ίσια δόντια στάτη ($k_1=1$) σχεδόν στο 2%.

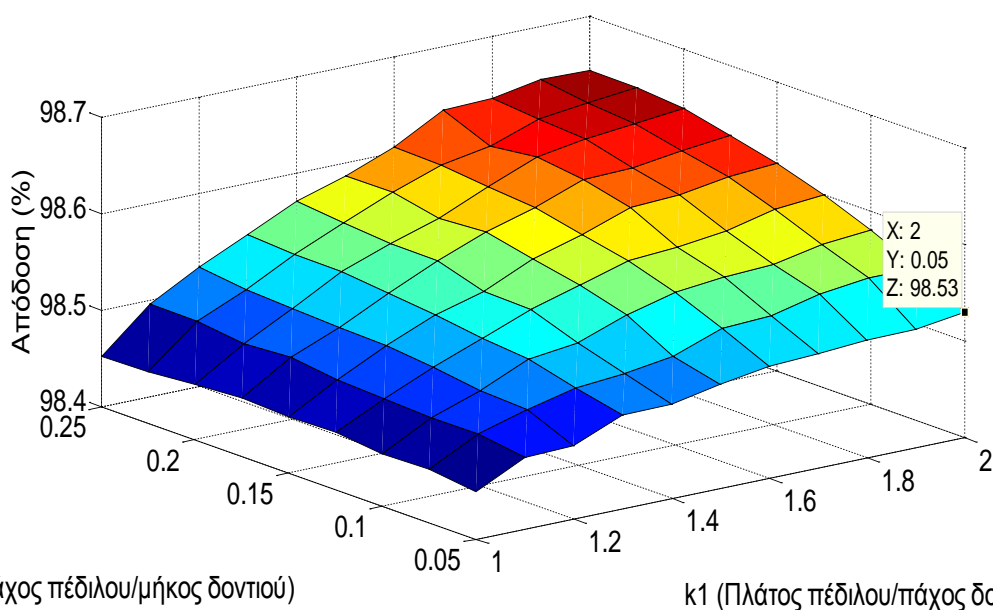
Συνολικές απώλειες



Σχήμα 5.36: Διάγραμμα των συνολικών απωλειών συναρτήσει του πλάτους και του πάχους του πέδilu.

Οι συνολικές απώλειες είναι οι χειρότερες δυνατές λόγω των περιορισμών στην τάση και την ροπή. Όμως όπως θα δούμε παρακάτω λόγω της μεγιστοποιημένης ροπής δεν έχουμε σημαντική επίπτωση στην απόδοση.

Απόδοση



Σχήμα 5.37: Διάγραμμα της απόδοσης του κινητήρα συναρτήσει του πλάτους και του πάχους του πέλδλου.

Απ' ότι φαίνεται στο διάγραμμα η απόδοση δεν επηρεάζεται σημαντικά από τις διαστάσεις του πέλδλου του δοντιού, καθώς κυμαίνεται από 98,45% έως 98,65%. Επομένως η απόδοση της τελικής γεωμετρίας που είναι 98,53% κρίνεται πολύ καλή.

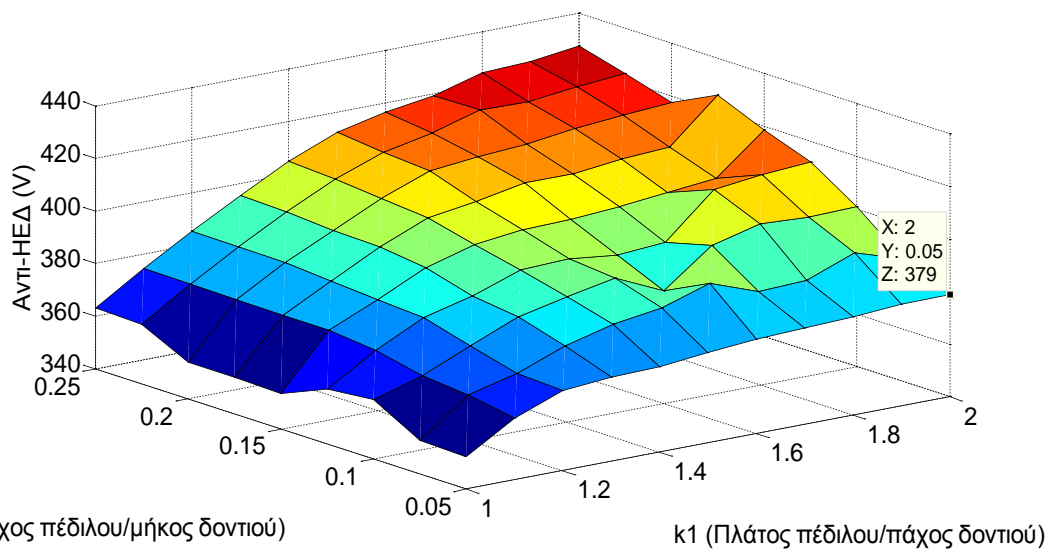
5.3.3.2 Ρεύμα 1/4 του ονομαστικού

Για τις επιλεγμένες τιμές διαστάσεων του πέλδλου των δοντιών στο ονομαστικό ρεύμα, εξετάζουμε τι συμβαίνει όταν το ρεύμα είναι ίσο με 1/4 του ονομαστικού.

Τα συμπεράσματα που εξάγουμε από τα παρακάτω διαγράμματα δεν διαφέρουν σημαντικά από αυτά στο προηγούμενο στάδιο της βελτιστοποίησης για συνθήκες υποφόρτισης:

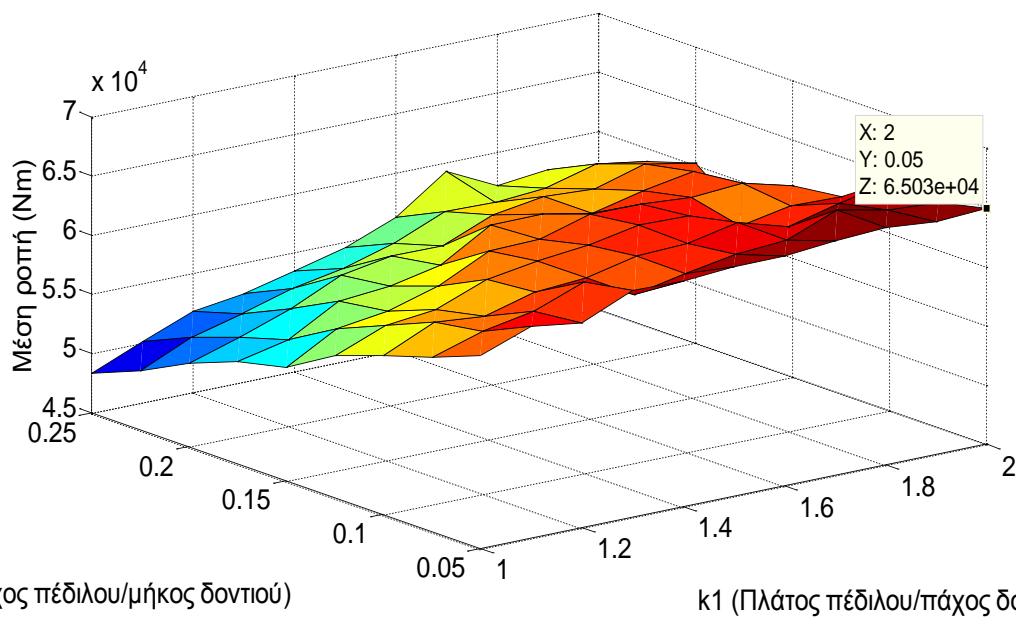
- Η αντι-ΗΕΔ παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά στις μεταβολές της γεωμετρίας, όντας μειωμένη σε σχέση με το ονομαστικό φορτίο.
- Η μέση ροπή ίση σχεδόν με το 1/4 της ονομαστικής, ακολουθώντας την ανάλογη μείωση του ρεύματος.
- Οι απώλειες σιδήρου παρουσιάζουν μικρή μείωση ενώ οι απώλειες χαλκού μειώνονται στο 1/16 των ονομαστικών λόγω του υποτετραπλασιασμού του ρεύματος.
- Η αρμονική παραμόρφωση της αντι-ΗΕΔ πλησιάζει το 7%, και η διακύμανση της ροπής αυξάνεται πλησιάζοντας το 13%.
- Η απόδοση αυξάνεται στο 99,3% λόγω των μικρών απωλειών χαλκού και σιδήρου.

Αντι-ΗΕΔ



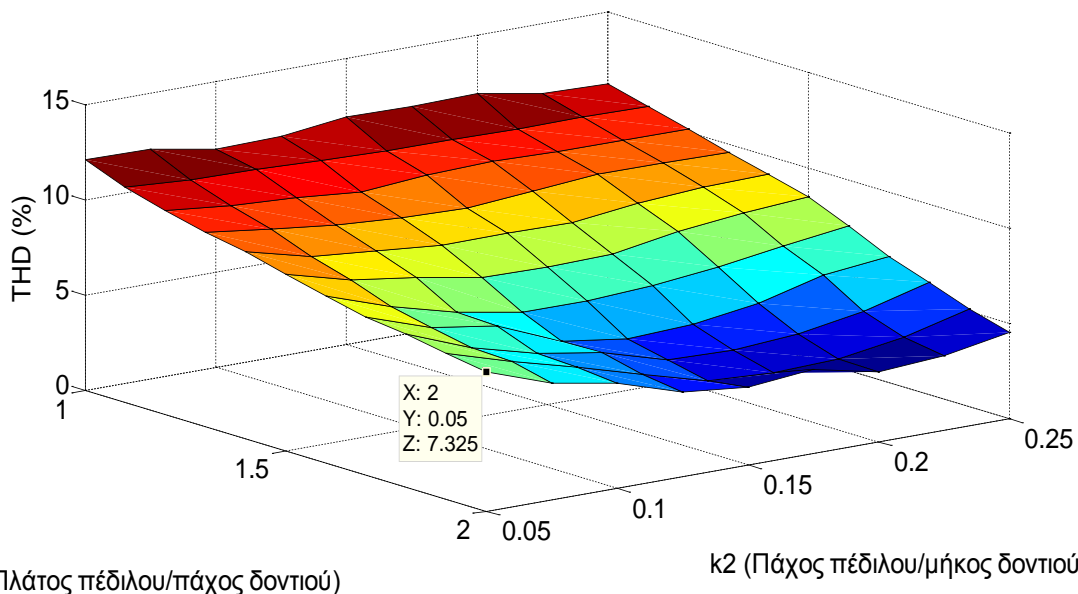
Σχήμα 5.38: Διάγραμμα της φασικής αντι-ΗΕΔ του κινητήρα συναρτήσει του πλάτους και του πάχους του πέλδλου.

Μέση ροπή



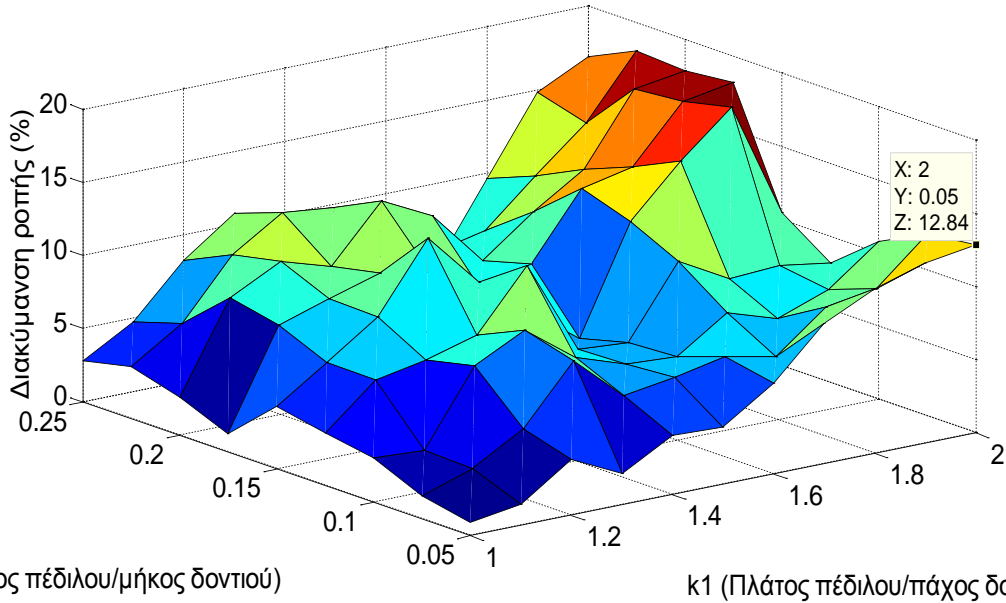
Σχήμα 5.39: Διάγραμμα της μέσης ροπής του κινητήρα συναρτήσει του πλάτους και του πάχους του πέδιλου.

Αρμονική παραμόρφωση



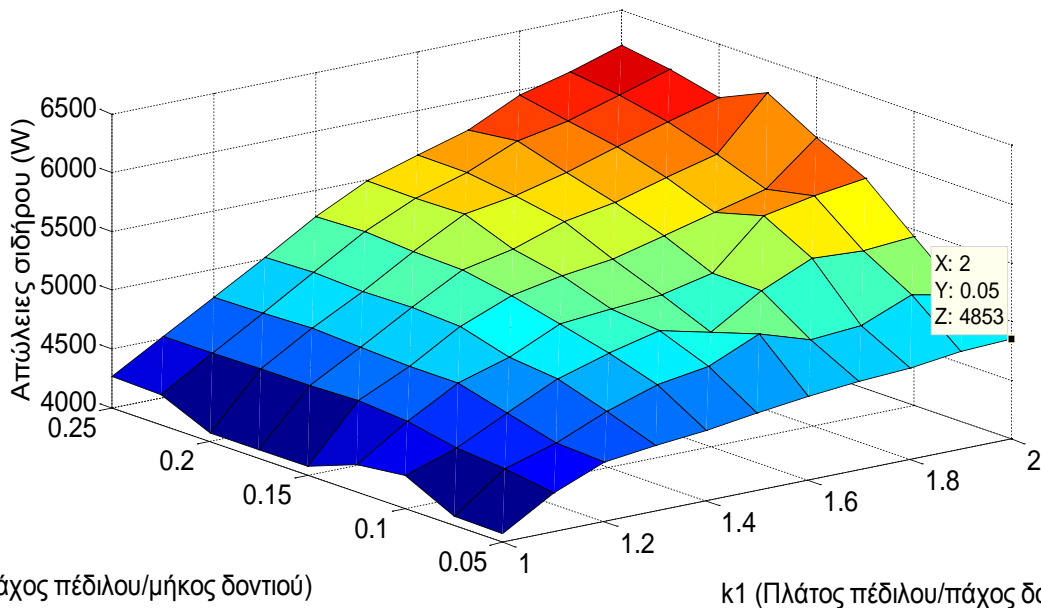
Σχήμα 5.40: Διάγραμμα της αρμονικής παραμόρφωσης της αντι-HEΔ συναρτήσει του πλάτους και του πάχους του πέδιλου.

Διακύμανση ροπής



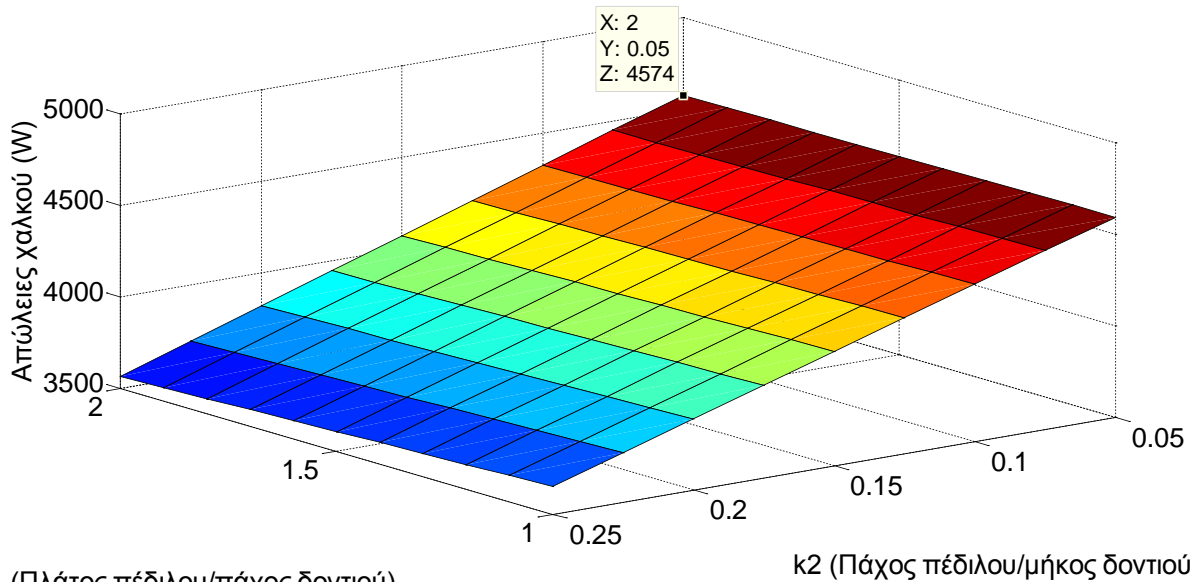
Σχήμα 5.41: Διάγραμμα της διακύμανσης της ροπής συναρτήσει του πλάτους και του πάχους του πέλδλου.

Απώλειες σιδήρου



Σχήμα 5.42: Διάγραμμα των απωλειών σιδήρου συναρτήσει του πλάτους και του πάχους του πέλδλου.

Απώλειες χαλκού

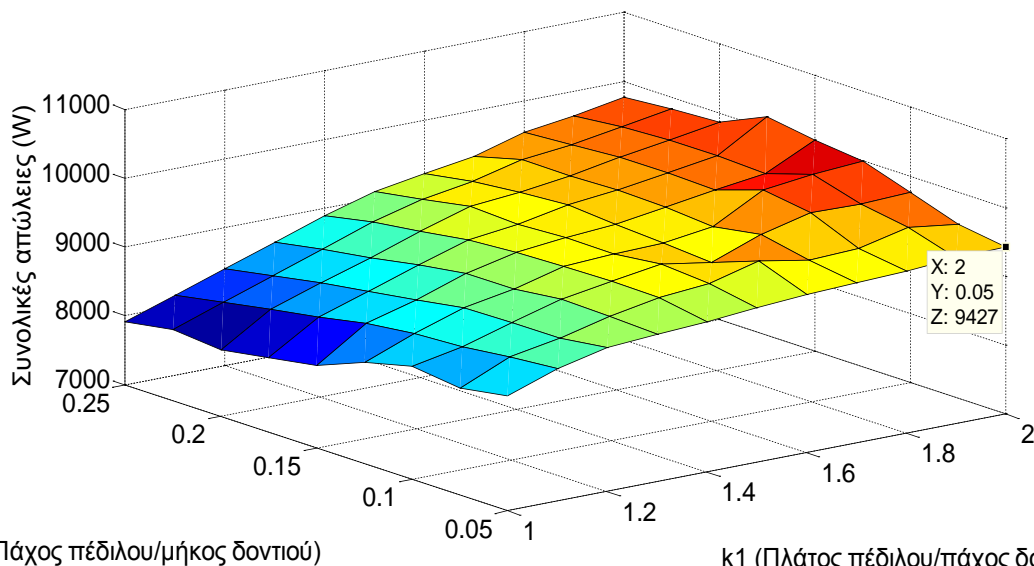


k1 (Πλάτος πέλδλου/πάχος δοντιού)

k2 (Πάχος πέλδλου/μήκος δοντιού)

Σχήμα 5.43: Διάγραμμα των απωλειών χαλκού συναρτήσεϊ του πλάτους και του πάχους του πέλδλου.

Συνολικές απώλειες

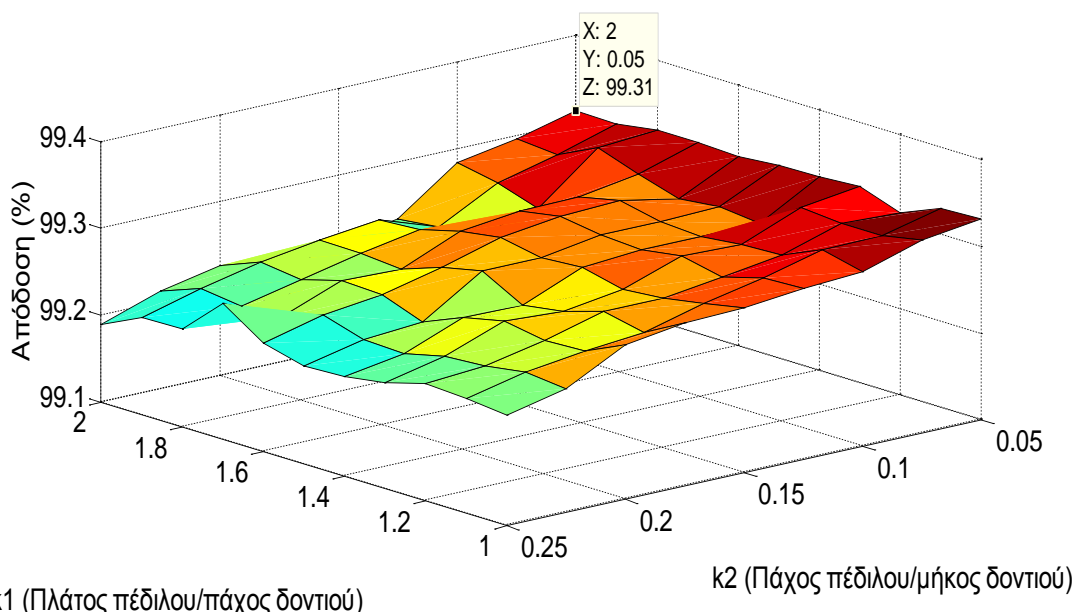


k2 (Πάχος πέλδλου/μήκος δοντιού)

k1 (Πλάτος πέλδλου/πάχος δοντιού)

Σχήμα 5.44: Διάγραμμα των συνολικών απωλειών (χαλκού και σιδήρου) συναρτήσεϊ του πλάτους και του πάχους του πέλδλου.

Απόδοση



Σχήμα 5.45: Διάγραμμα της απόδοσης του κινητήρα συναρτήσει του πλάτους και του πάχους του πέδιλου.

5.3.3.3 Ρεύμα διπλάσιο του ονομαστικού

Για τις επιλεγμένες τιμές διαστάσεων του πέδιλου των δοντιών στο ονομαστικό ρεύμα, εξετάζουμε τι συμβαίνει όταν το ρεύμα είναι ίσο με το διπλάσιο του ονομαστικού.

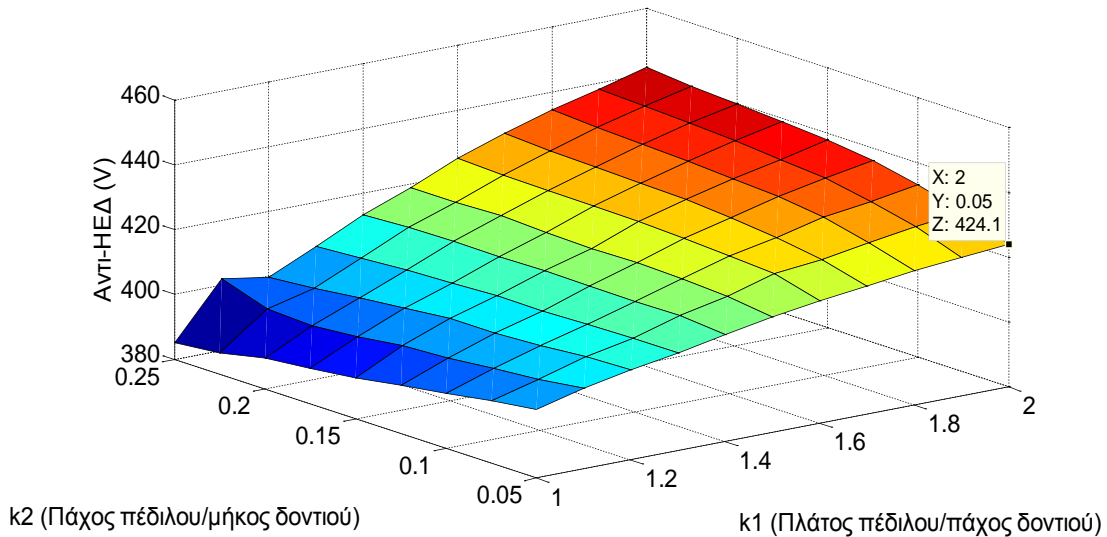
Τα συμπεράσματα που εξάγουμε από τα παρακάτω διαγράμματα δεν διαφέρουν σημαντικά από αυτά στο προηγούμενο στάδιο της βελτιστοποίησης για συνθήκες υπερφόρτισης:

- Η αντι-HEΔ παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά στις μεταβολές της γεωμετρίας, όντας αυξημένη σε σχέση με το ονομαστικό φορτίο και ξεπερνώντας την τιμή της προδιαγραφής.
- Η μέση ροπή είναι και αυτή αυξημένη αλλά δεν ακολουθεί τον διπλασιασμό του ρεύματος, λόγω του κορεσμού του μαγνητικού κυκλώματος.
- Οι απώλειες σιδήρου παρουσιάζουν μικρή αύξηση ενώ οι απώλειες χαλκού είναι τετραπλάσιες των ονομαστικών λόγω του διπλασιασμού του ρεύματος.
- Η αρμονική παραμόρφωση της αντι-HEΔ είναι πολύ αυξημένη και πλησιάζει το 28%, και η διακύμανση της ροπής παραμένει χαμηλή στο

2,7%.

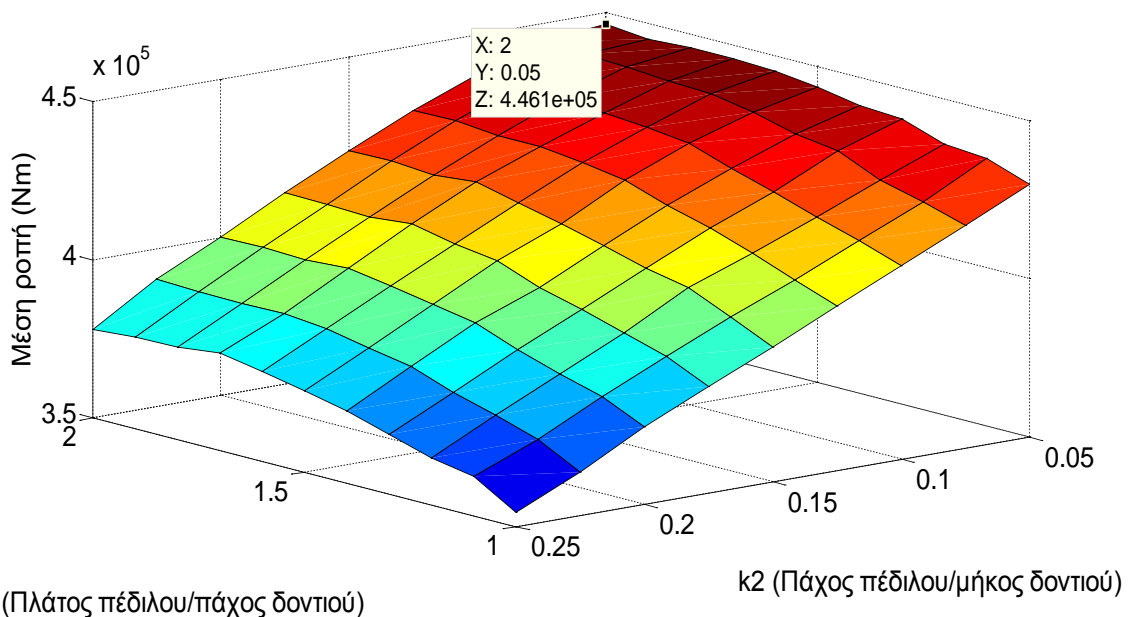
- Η απόδοση πέφτει στο 96,9% λόγω των μεγάλων απωλειών χαλκού.

Αντι-HEΔ



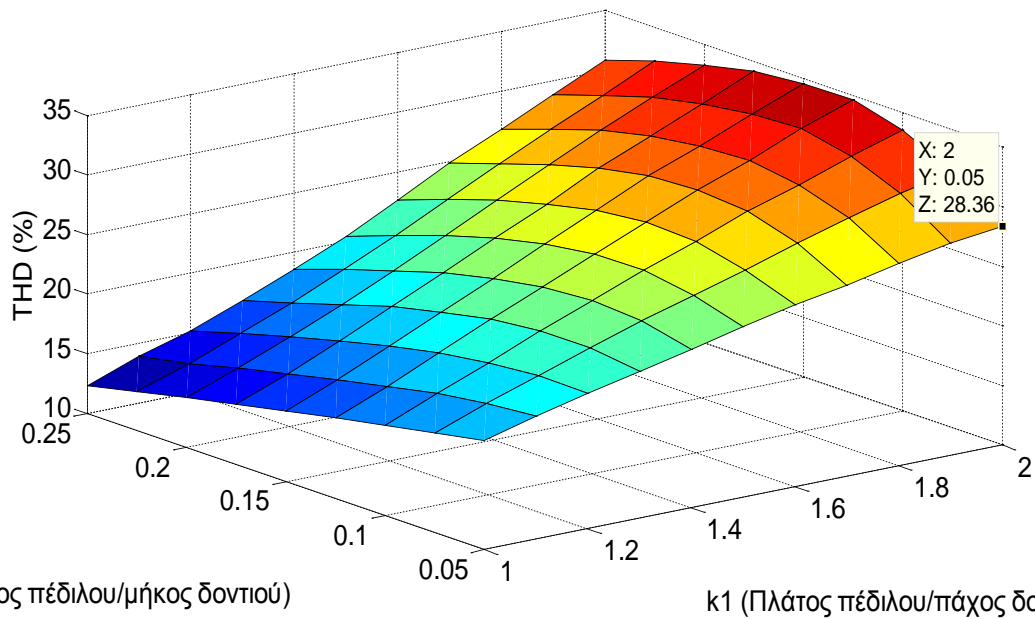
Σχήμα 5.46: Διάγραμμα της φασικής αντι-HEΔ συναρτήσεως του πλάτους και του πάχους του πέλδλου.

Μέση ροπή



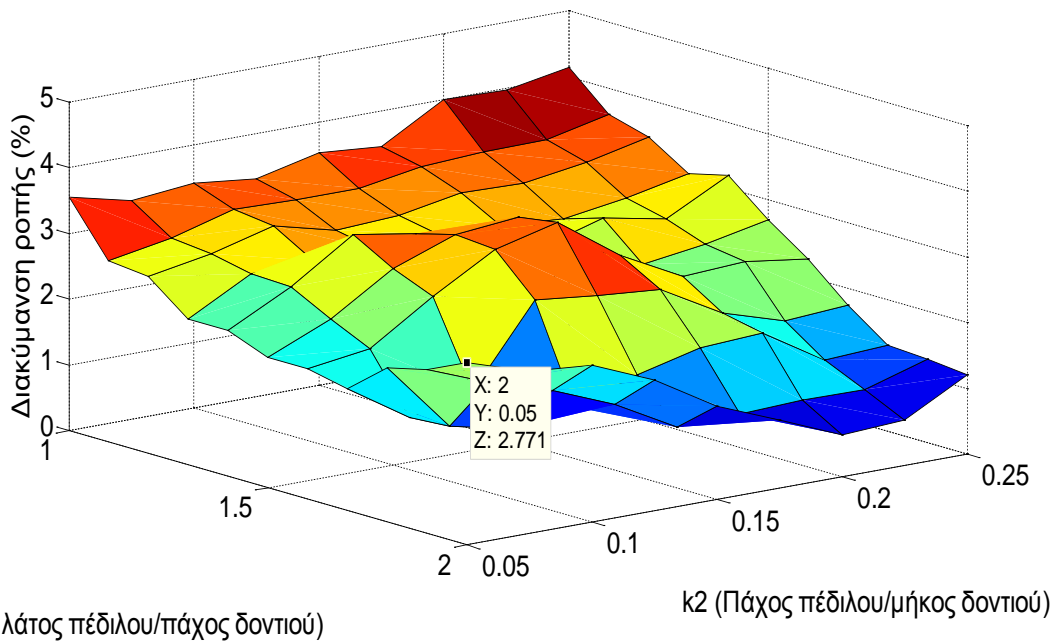
Σχήμα 5.47: Διάγραμμα της μέσης ροπής του κινητήρα συναρτήσεως του πλάτους και του πάχους του πέλδλου.

Αρμονική παραμόρφωση αντι-HEΔ



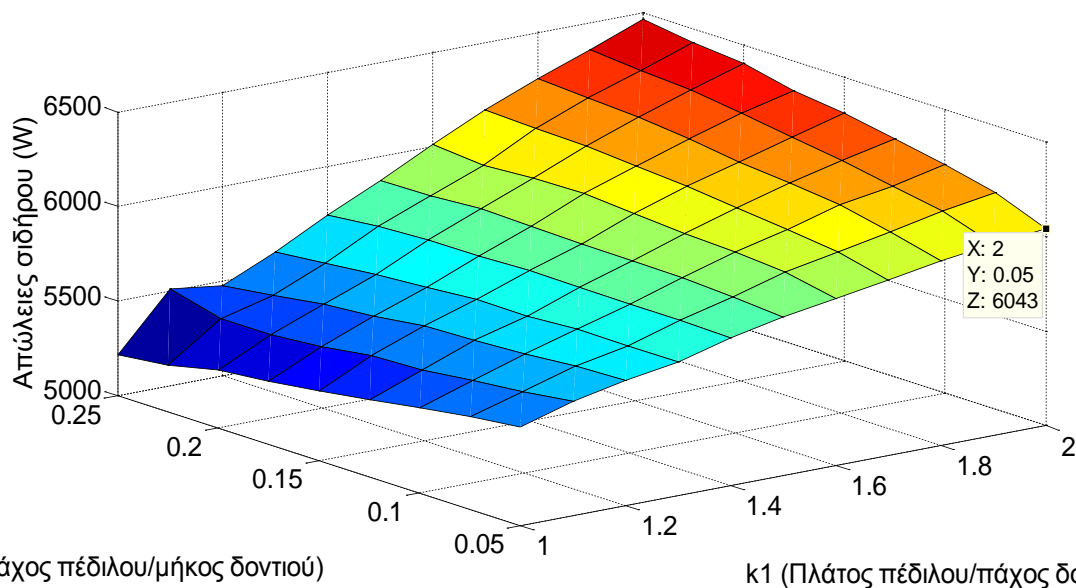
Σχήμα 5.48: Διάγραμμα της αρμονικής παραμόρφωσης της αντι-HEΔ συναρτήσει του πλάτους και του πάχους του πέλδλου.

Διακύμανση ροπής



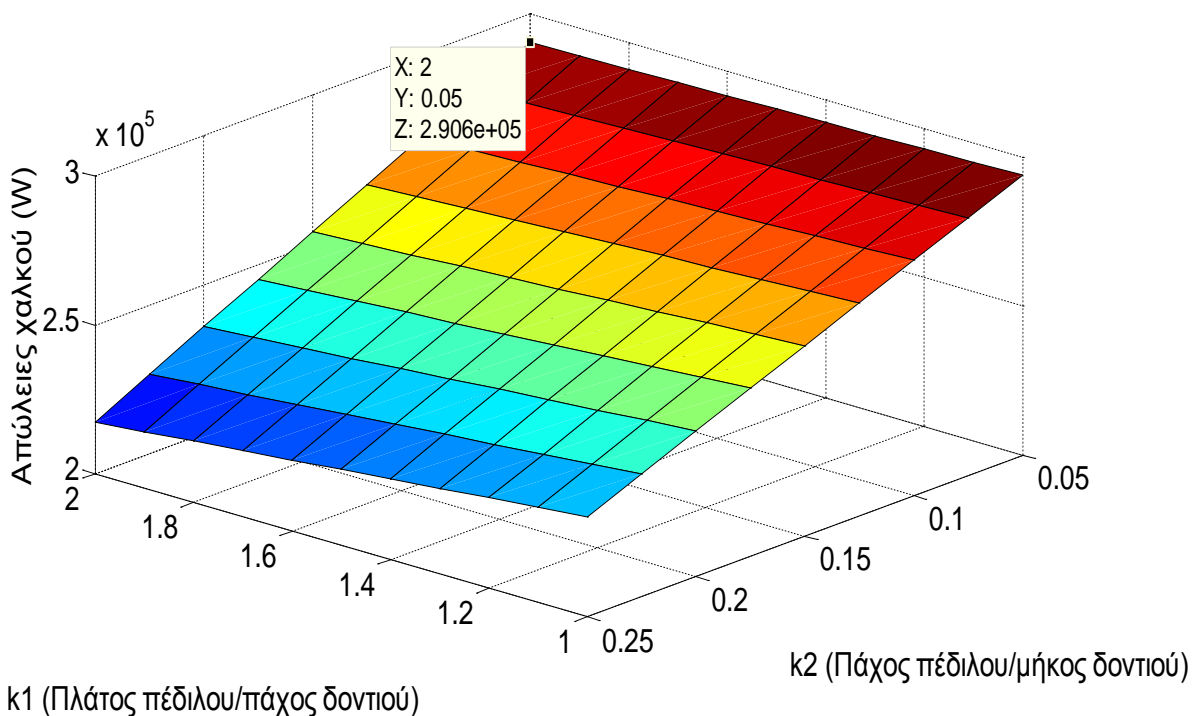
Σχήμα 5.49: Διάγραμμα της διακύμανσης της ροπής συναρτήσει του πλάτους και του πάχους του πέλδλου.

Απώλειες σιδήρου



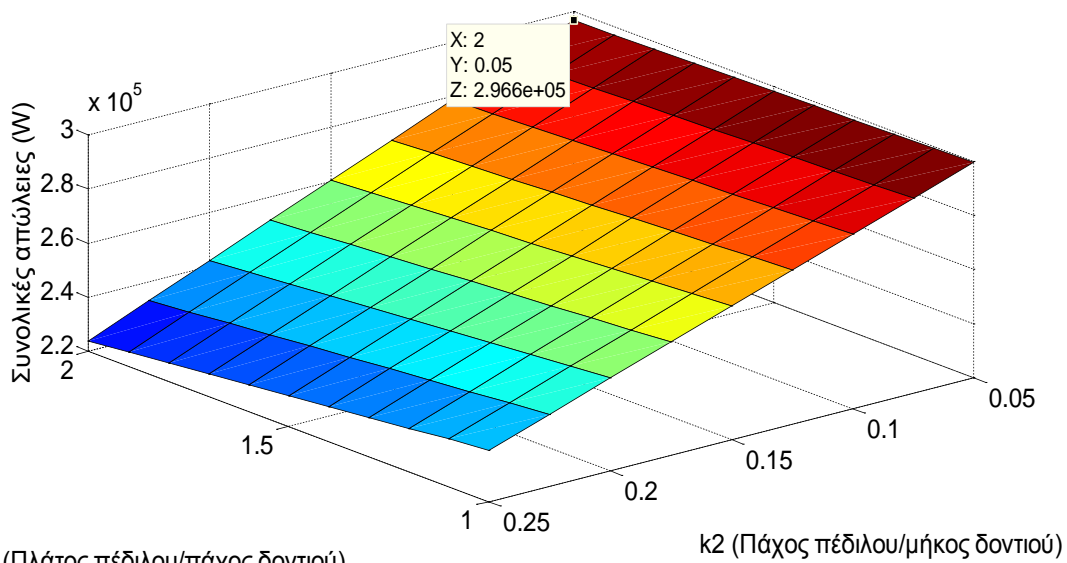
Σχήμα 5.50: Διάγραμμα των απωλειών σιδήρου συναρτήσει του πλάτους και του πάχους του πέδιλου.

Απώλειες χαλκού



Σχήμα 5.51: Διάγραμμα των απωλειών χαλκού συναρτήσει του πλάτους και του πάχους του πέδιλου.

Συνολικές απώλειες

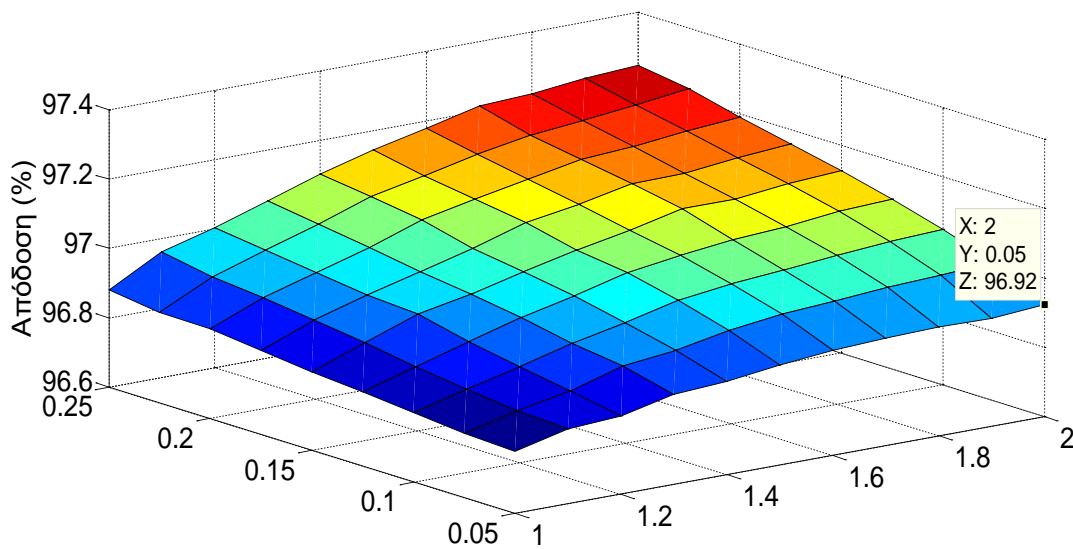


k1 (Πλάτος πέλδλου/πάχος δοντιού)

k2 (Πάχος πέλδλου/μήκος δοντιού)

Σχήμα 5.52: Διάγραμμα των συνολικών απωλειών (χαλκού και σιδήρου) συναρτήσεϊ του πλάτους και του πάχους του πέλδλου.

Απόδοση



k2 (πάχος πέλδλου/μήκος δοντιού)

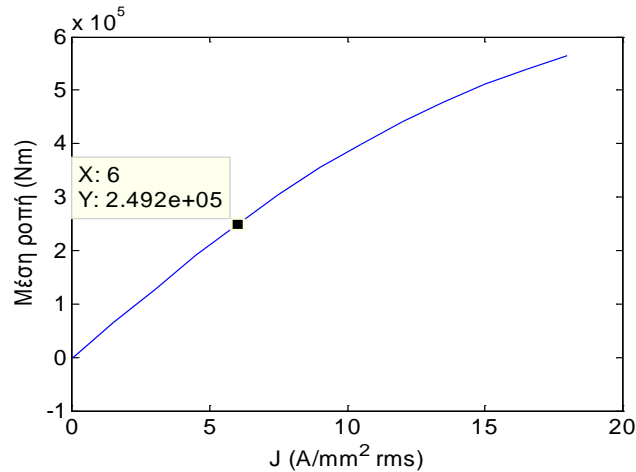
k1 (Πλάτος πέλδλου/πάχος δοντιού)

Σχήμα 5.53: Διάγραμμα της απόδοσης του κινητήρα συναρτήσεϊ του πλάτους και του πάχους του πέλδλου.

5.4 Χαρακτηριστικές τελικής μηχανής

Σε αυτή την παράγραφο εξετάζουμε χαρακτηριστικά της τελικής γεωμετρίας όπως την χαρακτηριστική ρεύματος ροπής, τις κυματομορφές της αντι-ΗΕΔ, της ροπής, κοκ.

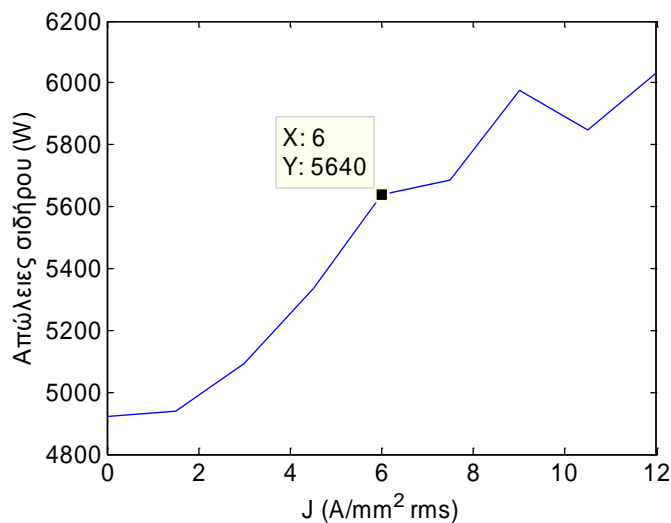
Χαρακτηριστική ρεύματος-ροπής



Σχήμα 5.54: Χαρακτηριστική ρεύματος-ροπής της μηχανής.

Όπως παρατηρούμε στην εικόνα 5.54, ο κινητήρας παρουσιάζει γραμμική αύξηση της ροπής μέχρι περίπου τα 9A/mm², ενώ για μεγαλύτερες τιμές του ρεύματος η ροπή κάνει “γόνατο”, κάτι που αναμένουμε λόγω του κορεσμού του μαγνητικού κυκλώματος του κινητήρα.

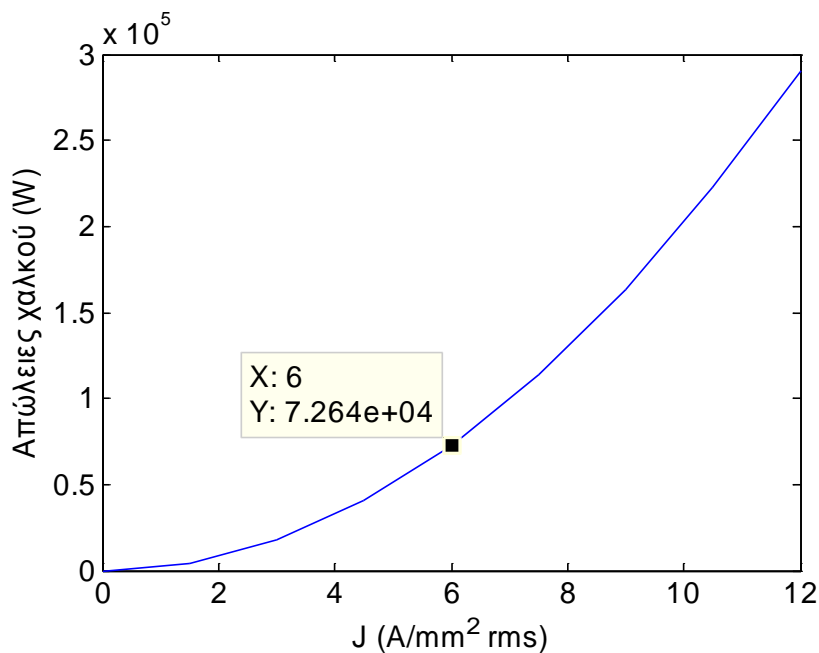
Χαρακτηριστική ρεύματος - απωλειών σιδήρου



Σχήμα 5.55: Χαρακτηριστική ρεύματος-απωλειών σιδήρου της μηχανής.

Όπως είναι αναμενόμενο, οι απώλειες σιδήρου αυξάνονται όσο αυξάνεται και η φόρτιση της μηχανής. Ωστόσο η αύξηση είναι σχετικά μικρή, καθώς π.χ. Στην ονομαστική πυκνότητα ρεύματος (6 A/mm²) είναι περίπου 5600W, ενώ στην υπερφόρτιση των 12 A/mm² μόλις που ξεπερνά τα 6000W.

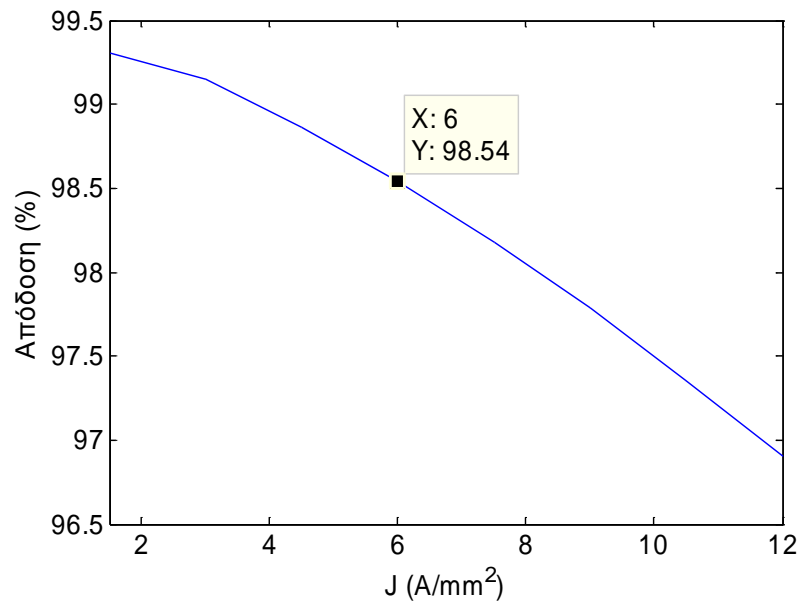
Χαρακτηριστική ρεύματος - απωλειών χαλκού



Σχήμα 5.56: Χαρακτηριστική ρεύματος-απωλειών χαλκού της μηχανής.

Το αποτέλεσμα της παραπάνω εικόνας είναι απολύτως προβλέψιμο αφού η ακριβής μορφή αυτής της χαρακτηριστικής μπορεί να υπολογιστεί και θεωρητικά. Οι απώλειες χαλκού αυξάνονται τετραγωνικά σύμφωνα με τον γνωστό τύπο που προκύπτει από τον νόμο του Ohm: $P_{Cu} = 3 I^2 R$, από τον οποίο προκύπτει και ο τύπος $P_{Cu} = 3 R_w (J S_w)^2$ που αποδείχθηκε στην παράγραφο 5.3.1.

Χαρακτηριστική ρεύματος - απόδοσης

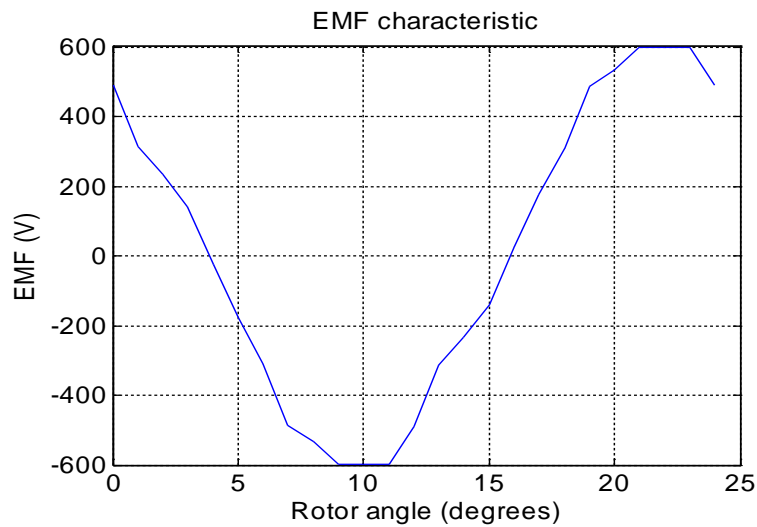


Σχήμα 5.57: Χαρακτηριστική ρεύματος-απόδοσης της μηχανής.

Δεδομένου ότι οι απώλειες αυξάνονται όσο αυξάνεται και το ρεύμα, είναι λογικό η απόδοση του κινητήρα να μειώνεται. Από το 98,54% στην ονομαστική φόρτιση η απόδοση πέφτει στο 96,9% στο διπλάσιο φορτίο, ενώ σε συνθήκες υποφόρτισης ανεβαίνει στο 99,31%.

5.4.1 Κυματομορφές ονομαστικού ρεύματος

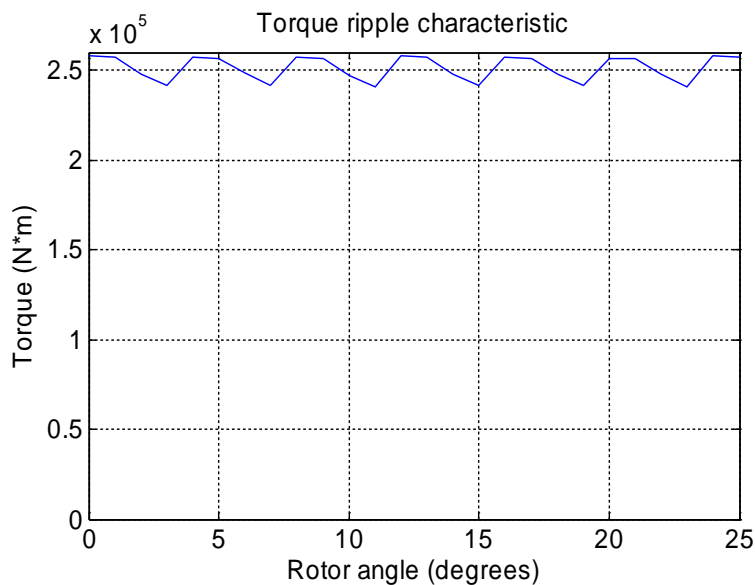
Αντι-HEΔ



Σχήμα 5.58: Κυματομορφή της φασικής αντι-HEΔ.

Η κυματομορφή της αντι-HEΔ είναι σχεδόν ημιτονοειδής δεδομένου του χαμηλού THD που είναι 4,47%.

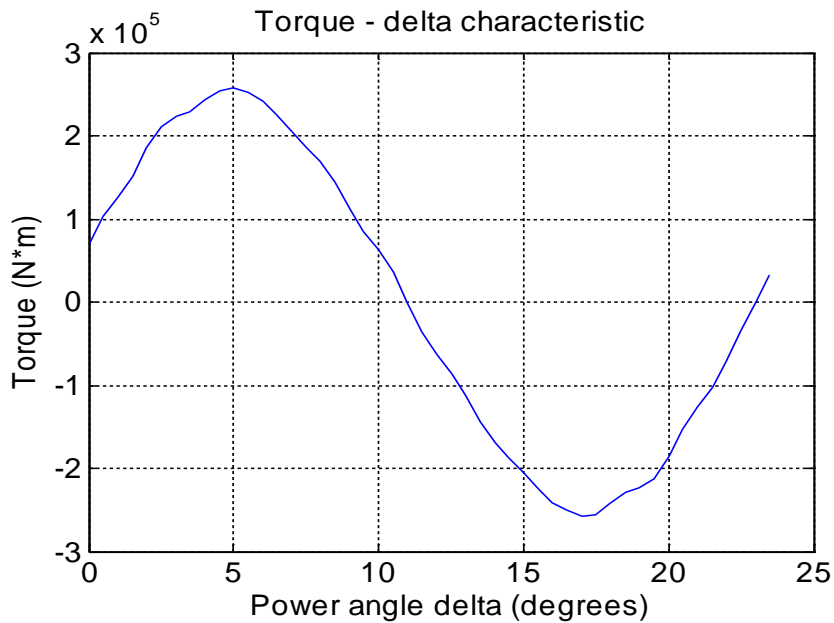
Διακύμανση ροπής



Σχήμα 5.59: Κυματομορφή της ροπής για μια περιστροφή του δρομέα κατά ένα πολικό βήμα.

Η ροπή σε μια περιστροφή του δρομέα κατά ένα πολικό βήμα πλησιάζει αρκετά το ιδανικό που θα ήταν μια ευθεία, χάρη στο χαμηλή διακύμανση που είναι ίση με 5,06%.

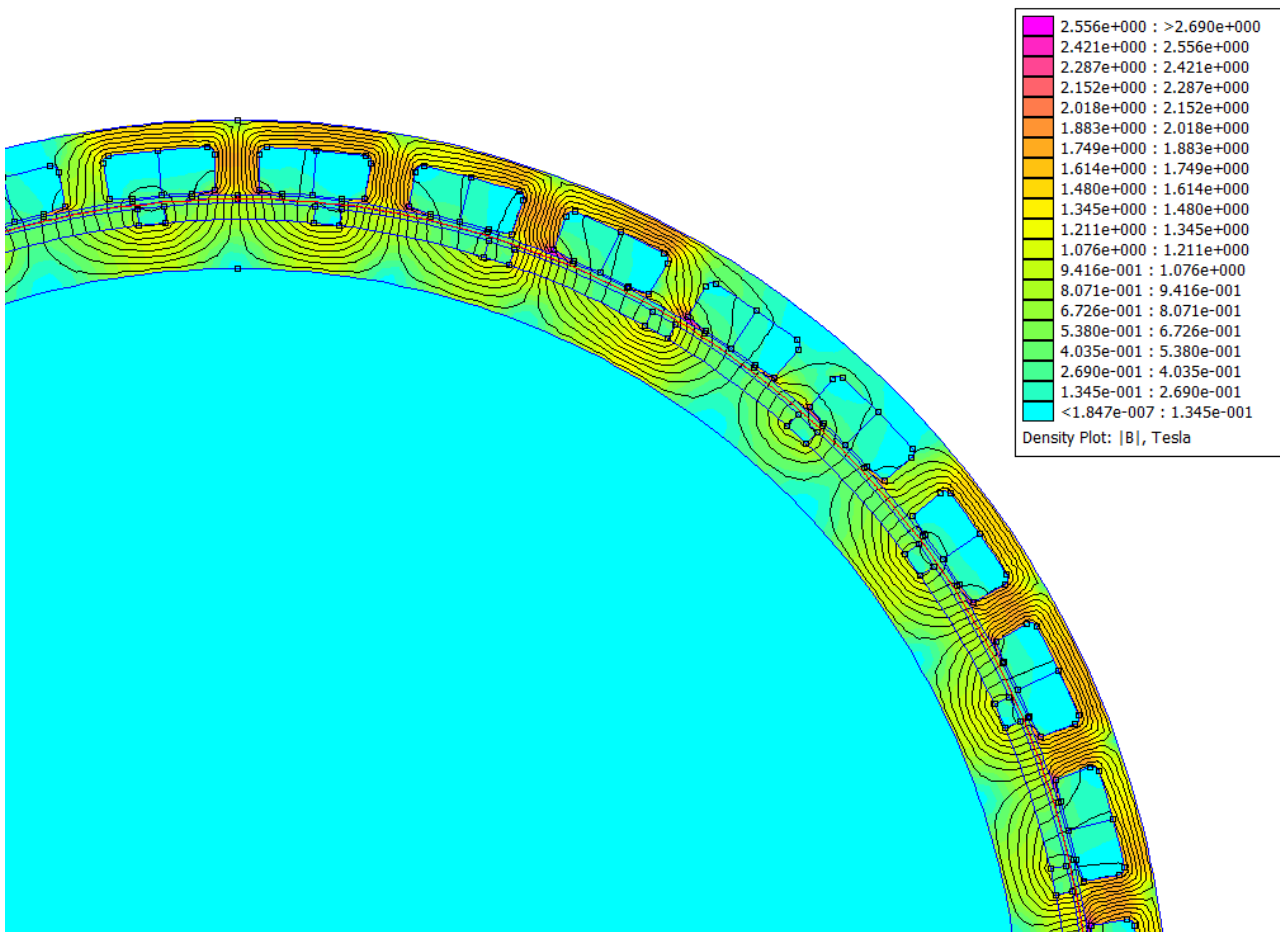
Χαρακτηριστική ροπής- γωνίας δ



Εικόνα 5.60: Χαρακτηριστική ροπής – γωνίας ροπής δ . Διευκρινίζεται ότι η γωνία εκφράζεται σε μηχανικές μοίρες.

Όπως αναμενόταν, η χαρακτηριστική ροπής και γωνίας ροπής δ είναι ημιτονοειδής, με το πλάτος του (258 kNm) να υπερκαλύπτει την προδιαγραφή ροπής. Υπενθυμίζεται ότι για στην παρούσα εργασία θεωρήσαμε λειτουργία του κινητήρα σε γωνία ροπής $\delta=85^\circ$, κι έτσι προκύπτει η μέση ροπή των 251 kNm που υπολογίστηκε στο στάδιο της βελτιστοποίησης.

Κατανομή πυκνότητας μαγνητικού πεδίου

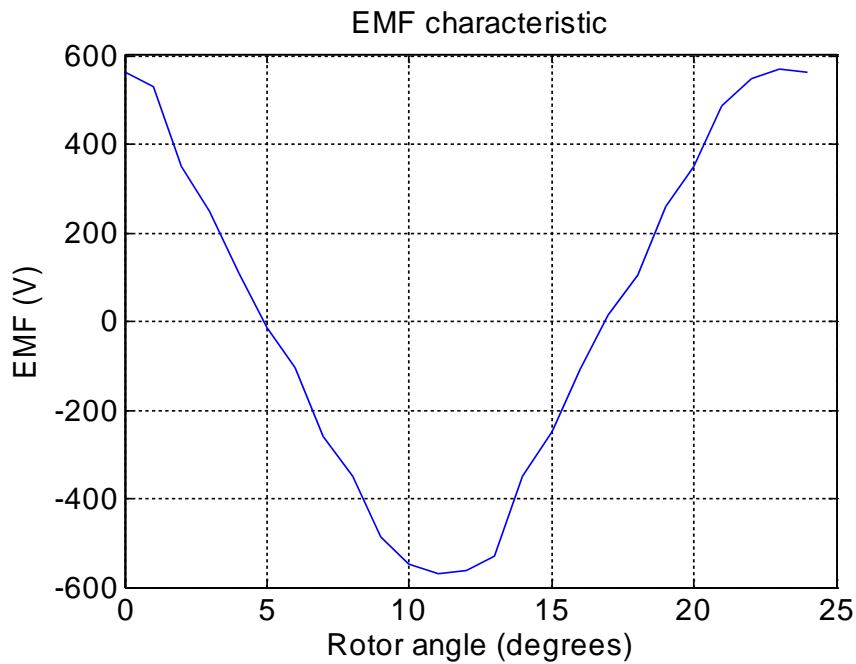


Σχήμα 5.61: Στιγμιότυπο του μαγνητικού πεδίου της μηχανής.

Μελετώντας ένα στιγμιότυπο του μαγνητικού πεδίου του κινητήρα, παρατηρούμε ότι τιμές της μαγνητικής επαγωγής είναι στα επιθυμητά όρια που ετέθησαν κατά την παραμετροποιημένη σχεδίαση, έτσι ώστε να μην οδηγείται η μαγνητική λαμαρίνα σε κορεσμό. Πιο συγκεκριμένα, στο σώμα του στάτη η μέγιστη τιμή του B φτάνει τα 1,74T, στο μέσο των δοντιών τα 1,84T, ενώ στις γωνίες των δοντιών αναπόφευκτα ξεπερνά τα 2T. Στο σώμα του δρομέα η μαγνητική επαγωγή κυμαίνεται μεταξύ 0,6T και 1,2T.

5.4.2 Κυματομορφές υποφόρτισης

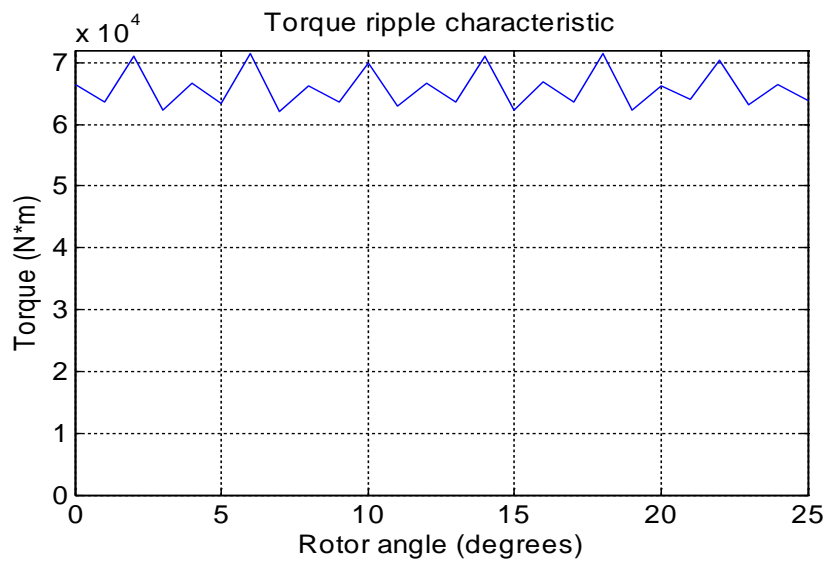
ΑντιΗΕΔ



Σχήμα 5.62: Κυματομορφή της φασικής αντι-ΗΕΔ.

Η αντι-ΗΕΔ του κινητήρα είναι αρκούντως ημιτονοειδής χάρη στο χαμηλό THD που είναι 7,3%.

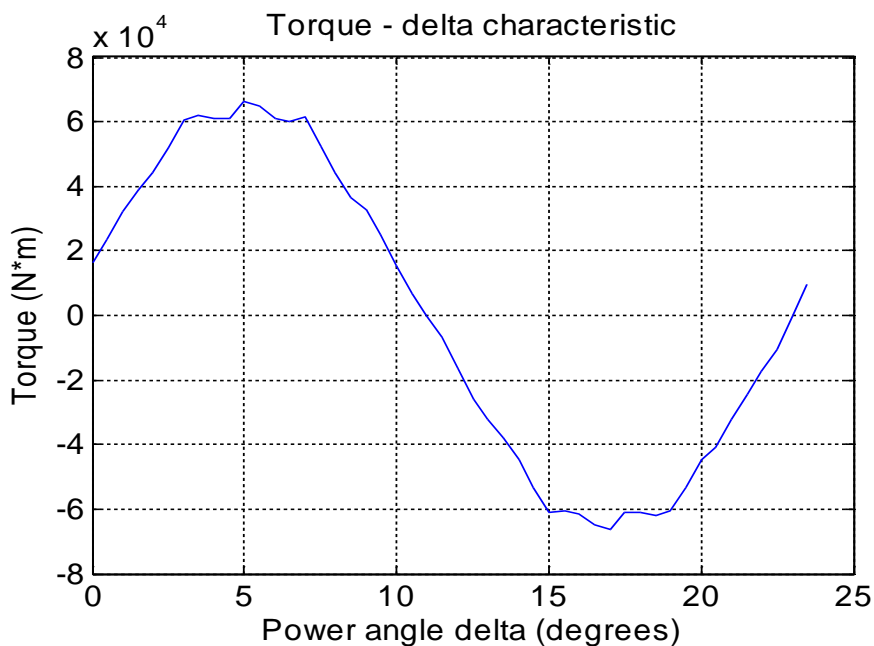
Διακύμανση ροπής



Εικόνα 5.63: Κυματομορφή της ροπής για μια περιστροφή του δρομέα κατά ένα πολικό βήμα.

Η ροπή του κινητήρα για ρεύμα ίσο με 1/4 του ονομαστικού παρουσιάζει μια σημαντική διακύμανση της τάξης του 12,84%. Η μέση τιμή της (65,03 kNm) είναι περίπου ίση με το 1/4 της ονομαστικής ροπής (251,3 kNm).

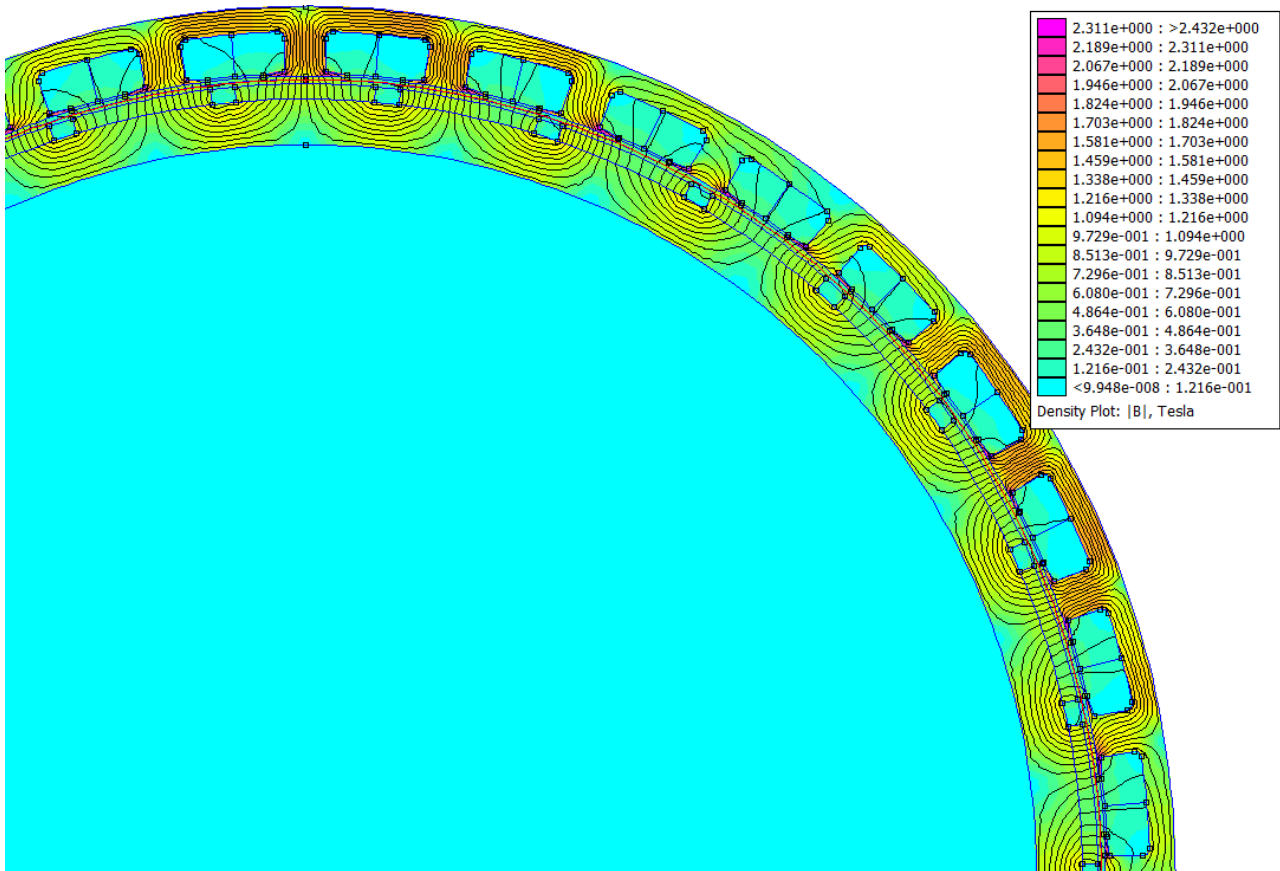
Χαρακτηριστική ροπής - γωνίας δ



Σχήμα 5.64: Χαρακτηριστική ροπής - γωνίας ροπής δ . Διευκρινίζεται ότι η γωνία εκφράζεται σε μηχανικές μοίρες.

Όπως αναμενόταν η χαρακτηριστική ροπής - γωνίας δ παραμένει ημιτονοειδής, αυτήν την φορά όμως με το 1/4 του πλάτους της προηγούμενης, αφού η ροπή είναι ανάλογη του ρεύματος.

Κατανομή πυκνότητας μαγνητικού πεδίου

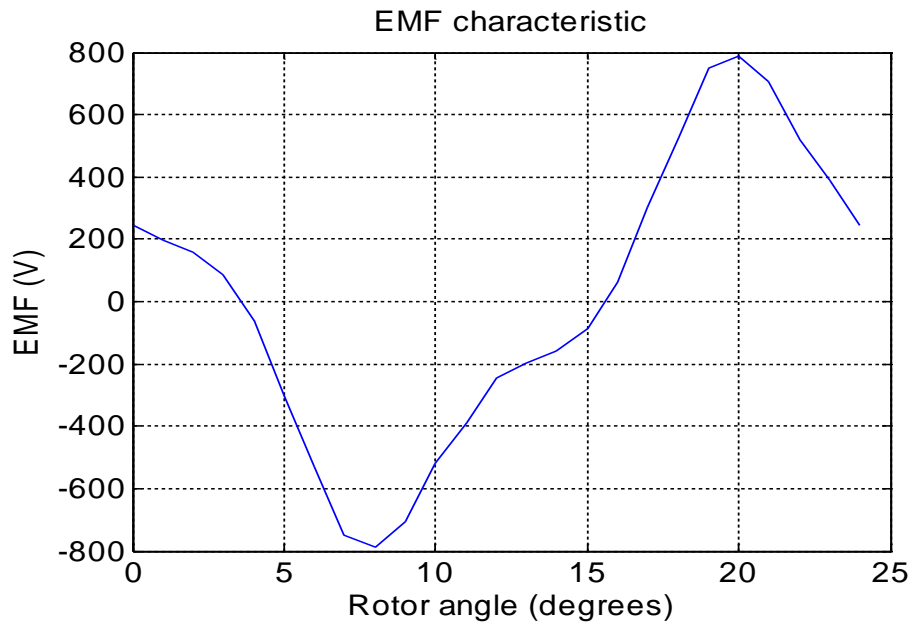


Σχήμα 5.65: Στιγμιότυπο του μαγνητικού πεδίου της μηχανής.

Συγκρίνοντας το παραπάνω στιγμιότυπο του πεδίου με αυτό για το ονομαστικό ρεύμα, βρίσκουμε όπως είναι λογικό μικρότερες τιμές του B . Πιο συγκεκριμένα, στο μέσο των δοντιών η μέγιστη μαγνητική επαγωγή είναι 1,63T, στις γωνίες 1,7T, στο σώμα του στάτη 1,55T, ενώ στο σώμα του δρομέα δεν παρατηρείται κάποια σημαντική μεταβολή αφού δεν ξεπερνά πουθενά τα 1,2T .

5.4.3 Κυματομορφές υπερφόρτισης

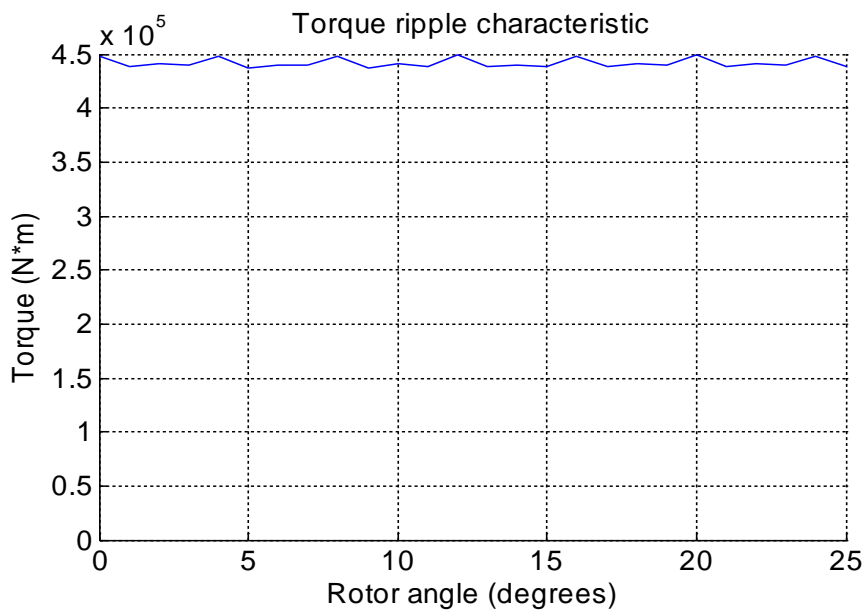
Αντι-ΗΕΔ



Σχήμα 5.66: Κυματομορφή της φασικής αντι-ΗΕΔ.

Στην εικόνα 5.66 παρατηρούμε ότι η αρμονική παραμόρφωση της αντι-ΗΕΔ για ρεύμα φάσης 9414 A είναι εμφανής, αφού ξεπερνά το 28%.

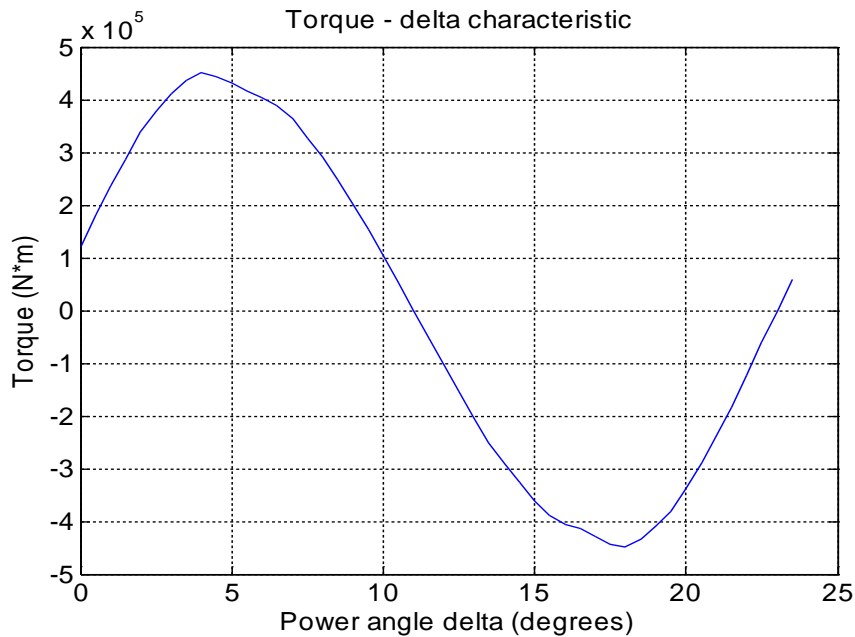
Διακύμανση ροπής



Σχήμα 5.67: Κυματομορφή της ροπής για μια περιστροφή του δρομέα κατά ένα πολικό βήμα.

Η μέση ροπή στα 446,1 kNm για ρεύμα διπλάσιο του ονομαστικού είναι δεν είναι διπλάσια, πράγμα που φανερώνει τον κορεσμό του μαγνητικού κυκλώματος. Ωστόσο η διακύμανση είναι πολύ χαμηλή στο 2,77%.

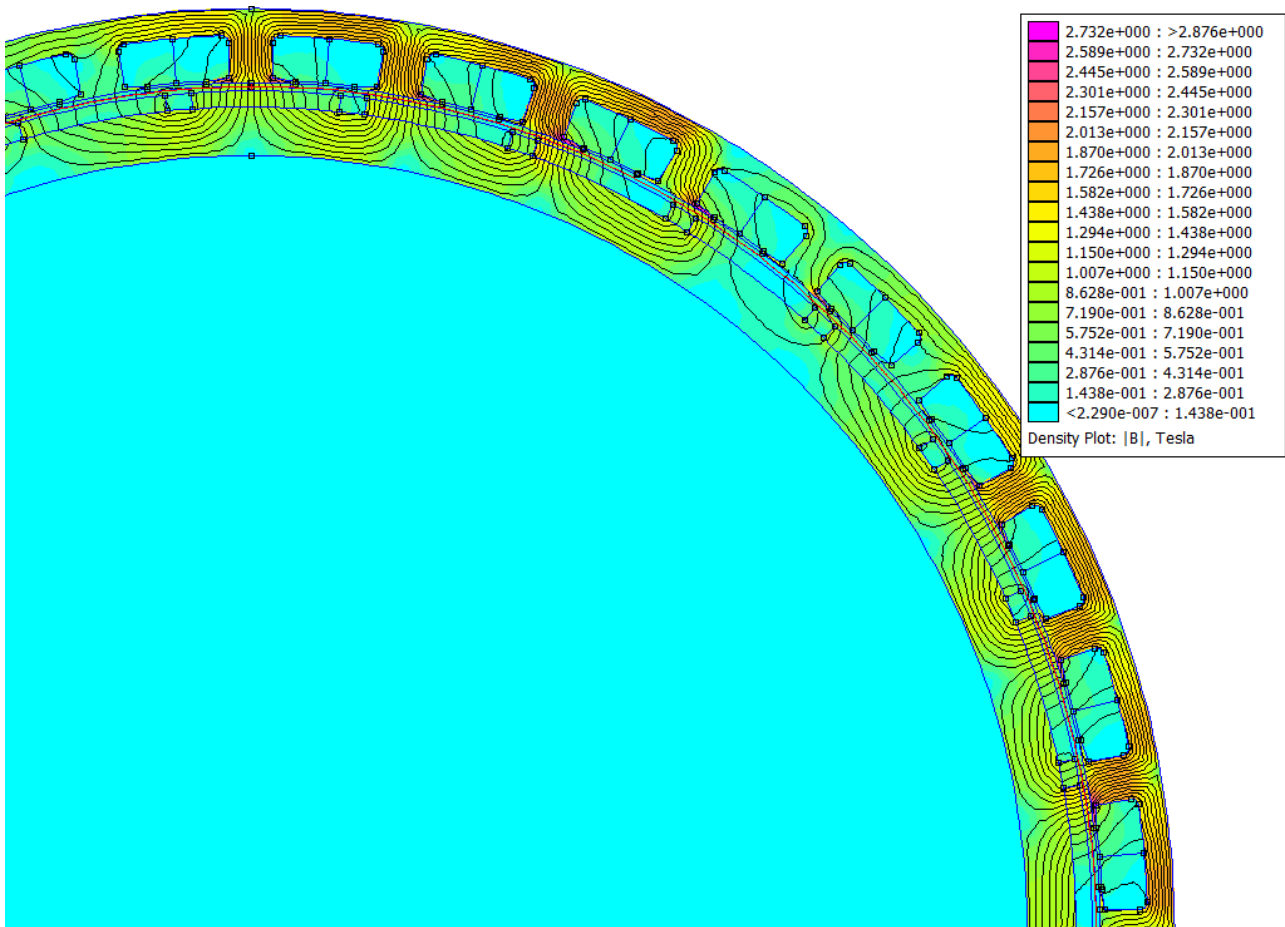
Χαρακτηριστική ροπής - γωνίας δ



Σχήμα 5.68: Χαρακτηριστική ροπής - γωνίας ροπής δ . Διευκρινίζεται ότι η γωνία εκφράζεται σε μηχανικές μοίρες.

Όπως και οι δύο προηγούμενες, η χαρακτηριστική ροπής - γωνίας δ έχει σχεδόν τέλεια ημιτονοειδή μορφή με το σωστό πλάτος, λίγο πάνω από τα 450 kNm.

Κατανομή πυκνότητας μαγνητικού πεδίου



Σχήμα 5.69: Στιγμιότυπο του μαγνητικού πεδίου της μηχανής.

Συγκρίνοντας το παραπάνω στιγμιότυπο του πεδίου με αυτό για το ονομαστικό ρεύμα, βρίσκουμε όπως είναι λογικό μεγαλύτερες τιμές του B , που οδηγούν το μαγνητικό κύκλωμα σε κορεσμό. Πιο συγκεκριμένα, στο μέσο των δοντιών η μέγιστη μαγνητική επαγωγή είναι $1,92T$, στις γωνίες $2,2T$, στο σώμα του στάτη $1,83T$, ενώ στο σώμα του δρομέα δεν παρατηρείται κάποια σημαντική μεταβολή αφού δεν ξεπερνά πουθενά τα $1,2T$.

5.4.4 Πίνακες διαστάσεων και χαρακτηριστικών λειτουργίας κινητήρα

Πίνακας διαστάσεων

Ενεργό μήκος κινητήρα	2586 mm
Εξωτερική διάμετρος στάτη	1365,6 mm
Εσωτερική διάμετρος σώματος στάτη	1325,9 mm
Εσωτερική ακτίνα δρομέα	573,8 mm
Εξωτερική ακτίνα δρομέα	610 mm
Πάχος επιφανειακών μαγνητών	12 mm
Πλάτος επιφανειακών μαγνητών	91,6 mm
Πάχος δοντιών στάτη	33 mm
Μήκος δοντιών στάτη	35 mm
Πλάτος πέδιλου	66 mm
Πάχος πέδιλου στην άκρη	1,75 mm
Πάχος πέδιλου στην μέση	3,5 mm
Πλάτος διακένου	6 mm
Υλικό δρομέα και στάτη	Thyssen M 235-35 A
Τύπος μόνιμου μαγνήτη	NdFeB 40 MGOe
Σπείρες τυλίγματος ανά φάση	8

Χαρακτηριστικά κινητήρα στο ονομαστικό ρεύμα

Ροπή	251,3 kNm
Ρεύμα φάσης	4707 A
Διακύμανση ροπής	5,06%
THD της αντι-HEΔ	4,47%
Απώλειες χαλκού	73176 W
Απώλειες σιδήρου	5364 W
Απόδοση	98,53%

Χαρακτηριστικά κινητήρα στο ¼ του ονομαστικού ρεύματος

Ροπή	65,03 kNm
Ρεύμα φάσης	1177 A
Διακύμανση ροπής	12,84 kNm
THD της αντι-HEΔ	7,33%
Απώλειες χαλκού	4571 W
Απώλειες σιδήρου	4853 W
Απόδοση	99,31%

Χαρακτηριστικά κινητήρα στο διπλάσιο του ονομαστικού ρεύματος

Ροπή	446 kNm
Ρεύμα φάσης	9414 A
Διακύμανση ροπής	2,77%
THD της αντι-HEΔ	28,36%
Απώλειες χαλκού	290,6 kW
Απώλειες σιδήρου	6043 kW
Απόδοση	96,92%

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της εκπόνησης της παρούσας εργασίας σχεδιάστηκε κινητήρας μόνιμων μαγνητών υψηλής ισχύος με σκοπό να ικανοποιεί τις προδιαγραφές που ετέθησαν για εφαρμογή σε ηλεκτροπρόωση πλοίου.

Συγκεκριμένα, πρόκειται για σύγχρονο κινητήρα επιφανειακών μόνιμων μαγνητών, ονομαστικής ισχύος 4,5 MW, με απόδοση άνω του 96% για μεγάλο εύρος ισχύος εξόδου, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί σε σύστημα αζιμουθιακού προωστήριου μηχανισμού. Η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας επικεντρώθηκε στις διαστάσεις των επιφανειακών μαγνητών και των δοντιών του στάτη, ενώ οι υπόλοιπες διαστάσεις μεταβάλλονταν αναλόγως με την χρήση παραμετροποιημένης σχεδίασης.

Συγκεντρωτικά, τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την σχεδίαση του εν λόγω κινητήρα έχουν ως εξής:

- Για την εφαρμογή κρίνεται σκόπιμη η χρήση συγκεντρωμένου τυλίγματος διπλής στρώσης, έναντι του αντίστοιχου μονής στρώσης, καθώς παρουσιάζει μικρότερες τιμές πυκνότητας μαγνητικής ροής και επομένως μικρότερες απώλειες σιδήρου. Επιπλέον παράγει σημαντικά χαμηλότερη αρμονική παραμόρφωση στην αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη.
- Όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος των επιφανειακών μαγνητών τόσο μεγαλύτερη είναι η παραγόμενη ροπή του κινητήρα. Η αύξηση της ροπής δεν είναι γραμμική και εμφανίζει “γόνατο” για πλάτη μαγνήτη πάνω από 80-85% του πολικού βήματος. Επομένως πρέπει κάποιος να κρίνει πόσο η αύξηση της επίδοσης του κινητήρα δικαιολογεί το μεγαλύτερο κόστος.
- Η αύξηση του εύρους του πέλδλου των δοντιών του στάτη προσφέρει αύξηση της ροπής. Όσο το πλάτος του πέλδλου πλησιάζει αυτό του επιφανειακού μαγνήτη μειώνεται η ροή σκέδασης και γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση του μόνιμου μαγνήτη.
- Η μεταβολή της γεωμετρίας του κινητήρα δεν επιφέρει σημαντική μεταβολή στην απόδοση του, κυρίως λόγω της μεγάλης ισχύος εξόδου.

Επομένως σκόπιμη είναι η κατά το δυνατόν αύξηση της επίδοσης του, η οποία συμβαδίζει με αυξημένες απώλειες χαλκού και σιδήρου.

- Ο κινητήρας είχε την αναμενόμενη συμπεριφορά σε συνθήκες υποφόρτισης, ενώ έδειξε να ανταποκρίνεται ικανοποιητικά σε συνθήκες υπερφόρτισης, με μικρή μείωση στην απόδοση αλλά με μεγάλη αύξηση της αρμονικής παραμόρφωσης της τάσης.

6.2 Συνεισφορά στην προαγωγή της επιστήμης

Στην παρούσα εργασία προτείνεται και παρουσιάζεται ένας ολοκληρωμένος τρόπος για την σχεδίαση, την βελτιστοποίηση και την ανάλυση ενός σύγχρονου κινητήρα επιφανειακών μονίμων μαγνητών. Κατά την σχεδίαση του κινητήρα αναπτύχθηκαν οι ακόλουθες τεχνικές:

- Η παραμετροποιημένη σχεδίαση του κινητήρα με την βοήθεια του λογισμικού FEMM και της βιβλιοθήκης εντολών OctaveFEMM για το λογισμικό Matlab. Χάρη στην παραμετροποιημένη σχεδίαση μπορούμε να μειώσουμε τις μεταβλητές που χρειάζεται να ορίσουμε στο πρόγραμμα, θέτοντας τις κατάλληλες εξαρτήσεις μεταξύ τους. Με τον τρόπο αυτό επίσης επιτυγχάνουμε να διατηρούμε σταθερές τις φορτίσεις του κινητήρα, π.χ ορίζοντας εξάρτηση του πάχους του σώματος του δρομέα από το πάχος των δοντιών.
- Η ανάλυση ευαισθησίας με σκοπό την βελτιστοποίηση της γεωμετρίας των μαγνητών και των δοντιών του στάτη. Κατά την διαδικασία αυτή επιχειρείται η μεγιστοποίηση της ροπής, η διατήρηση της αντι-HEΔ σε επίπεδα επιτρεπτά για το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας του πλοίου και ο έλεγχος άλλων χαρακτηριστικών όπως η διακύμανση της ροπής και η αρμονική παραμόρφωση της τάσης σε ανεκτά επίπεδα.
- Η ανάλυση της συμπεριφοράς του κινητήρα σε συνθήκες υποφόρτισης και υπερφόρτισης, ώστε να προσδιοριστεί η συμπεριφορά του σε διαφορετικά σενάρια λειτουργίας.

6.3 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Η εργασία αυτή ανέδειξε ορισμένα σημεία που χρήζουν περαιτέρω συμπληρωματικής διερεύνησης. Προτείνεται μελλοντική εργασία στα παρακάτω θέματα:

- Πειραματική επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών του κινητήρα που υπολογίστηκαν.
- Επέκταση της μεθοδολογίας βελτιστοποίησης εστιάζοντας σε μεθόδους αναζήτησης ολικού βέλτιστου.

Βιβλιογραφία

1. Σχεδιασμός και μελέτη ηλεκτρογεννήτριας συνδεδεμένης στο αξονικό σύστημα πλοίου, διπλωματική εργασία, Άρης-Διονύσιος Πιτταράς
2. *Design, Optimization and Comparison of Permanent Magnet Motors for a Low-Speed Direct-Driven Mixer*, Florence Libert, Royal Institute of Technology, Department of Electrical Engineering, Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm 2004
3. *Permanent-Magnet Synchronous Machines with Non-Overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications*, Florence Meier, Royal Institute of Technology, School of Electrical Engineering, Electrical Machines and Power Electronics, Stockholm 2008
4. Σχεδίαση και βελτιστοποίηση κινητήρα μονίμων μαγνητών για εφαρμογή ηλεκτροκίνησης, διπλωματική εργασία, Αναστάσιος Γ. Βήχος
5. *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*, Jacek F. Gieras, Mitchell Wing
6. *Maritime Electrical Installations And Diesel Electric Propulsion*, Alf Kåre Ådnanes, ABB AS Marine
7. *Design of Rotating Electrical Machines*, Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen, Valeria Hrabovcova
8. Υποδειγματική προκαταρκτική σχεδίαση γεννήτριας μονίμων μαγνητών ισχύος 25kW, Α. Κλαδάς
9. *Performances Comparison of Induction Motors and Surface Mounted PM motor for POD Marine Propulsion*, R. Lateb, N. Takorabet, F. Meïbody-Tabar, A. Mirzaïan, J. Enon, A. Sarribouette
10. *Finite Element Method Magnetics Version 4.2 User's Manual*, David Meeker
11. *Finite Element Method Magnetics: OctaveFEMM Version 1.2 User's Manual*, David Meeker
12. Σχεδιασμός και Κατασκευή Κινητήρων Μονίμων Μαγνητών για Ηλεκτρικά Οχήματα, Διδακτορική Διατριβή, Κωνσταντίνος Ι. Λάσκαρης

13. Σχεδιασμός και βελτιστοποίηση κινητήρα μονίμων μαγνητών για εφαρμογή ηλεκτροκίνησης, διπλωματική εργασία, Ευφροσύνη Θεοδώρου
14. Ι.Α. Τεγόπουλος, *Ηλεκτρικές Μηχανές Μέρος Β'*, Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 1991
15. Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, 2001, Ε.Μ.Π.
16. *Electric Machinery*, A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr., Stephen Umans
17. Stephen J. Chapman, *Ηλεκτρικές Μηχανές*, 3^η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.
18. Nicola Bianchi, *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements*, CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2005.
19. Hamdi, E. S. *Design of small electrical machines*, Chichester: 1998(1994), John Wiley & Sons.
20. Χατζηλάου Ι.Κ, Γύπαρης Ι.Κ. (2001): "Ηλεκτροπρόωση Πολεμικών Πλοίων", Μονογραφία ΣΝΔ, Πειραιάς.
21. Χατζηλάου Ι.Κ, Γαλάνης Γ., Περτζινίδης Ν.(2006): "Συστήματα ηλεκτροπρόωσης υποβρυχίων του Π.Ν. ", Διήμερο ΤΕΕ: «ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΑ ΜΕΣΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ-ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ», 12-13 Ιανουαρίου 2006.
22. Hodge G. G, Mattick D. J. (1997), "The Electric Warship II", *Trans IMarE*, Vol. 109, Part 2, pp. 127-144.
23. Hodge G. G, Mattick D. J. (1998), "The Electric Warship III", *Trans IMarE*, Vol. 110, Part 2, pp.119-134.
24. Holström P. (1993), "Selection of Propeller for Diesel Electric Machinery," in PROPULSION '93: *Marine Main Propulsion and Auxiliary Power Conference and Trade Show*, New Orleans, November 7-9.
25. John Carlton, *Marine propellers and propulsion*, Second Edition 2007
26. Gaggero Stefano, Savio Luca, Brizzolara Stefano, Viviani Michele, Ferrando Marco, Conti Francesco, "Comparison of experimental measurements and numerical calculations for a propeller in axial cylinder",

First International Symposium on Marine Propulsors smp'09, Trondheim, Norway, June 2009.

27. ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ ΠΛΟΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΖΗΤΗΜΑΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΤΟ ΠΛΗΡΩΣ ΕΞΗΛΕΚΤΡΙΣΜΕΝΟ ΠΛΟΙΟ, Δρ. Κ. Χατζηλάου, Καθ/τήςΣΝΔ, Ι. Μ. Προυσαλίδης, Επ. Καθ/τήςΕΜΠ, ΔρΓ. Αντωνόπουλος, ΔΕΣΜΗΕΑΕ, Πλωτάρχης (Μ) Ι. Κ. Γύπαρης ΠΝ, MSc MESE, Π. Βαλλιανάτος, HM - ROTEC Engineering Ltd.
28. “Ηλεκτροπρόωση Πολεμικών Πλοίων”, Χατζηλάου Ι.Κ, Γύπαρης Ι.Κ. Μονογραφία ΣΝΔ, Πειραιάς.
29. “Συστήματα ηλεκτροπρόωσης υποβρυχίων του Πολεμικού Ναυτικού”, Διήμερο ΤΕΕ, Χατζηλάου Ι.Κ, Γαλάνης Γ. , Περτζινίδης Ν.
30. J. Lamden, «Hybrid Propulsion,» *The Reference Point*, pp. 6-11, 2012.
31. B. A. Bassham, *AN EVALUATION OF ELECTRIC MOTORS FOR SHIP PROPULSION*, NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL Monterey, California, 2003.
32. Ν. Σ. Μανιάς, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ, Αθήνα: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΕΩΝ, 2007.
33. *NdFeB / Neodymium Data Sheet*, UK™, e-Magnets.
34. R. Krishnan, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*, CRC Press, 2010.
35. A. M. EL-Refaie, *Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges*, (IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2010.
36. R. Bargallo, *FINITE ELEMENTS FOR ELECTRICAL ENGINEERING* ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT EUTIB-UPC, 2006.