



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΙΣΧΥΟΣ

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΗΣ ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ

Επιβλέπων: Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΙΣΧΥΟΣ

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΗΣ ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ

Επιβλέπων: Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 23^η Οκτωβρίου 2025

.....
Α. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σ. Παπαθανασίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Α. Αντωνόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2025

.....
Ιωάννης Παπαγεωργίου

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

Copyright ©Ιωάννης Παπαγεωργίου, 2025

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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επιχειρήθηκε ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών μεγεθών μίας σύγχρονης γραμμικής μηχανής μόνιμων μαγνητών (Linear Permanent Magnet Synchronous Motor – LPMSM) και ο υπολογισμός των απωλειών με την αξιοποίηση ορισμένων «παραδοσιακών» μεθοδολογιών. Κατόπιν πραγματοποιήθηκε μελέτη με τρία μοντέλα ώστε να εξακριβωθεί η θερμική της συμπεριφορά σε ονομαστικές συνθήκες φόρτισης.

Αρχικά αναλύεται η αρχή λειτουργίας μίας σύγχρονης γραμμικής μηχανής μόνιμων μαγνητών και παρουσιάζονται οι συνηθέστερες τοπολογίες της. Στη συνέχεια αναφέρονται τα βασικότερα μεγέθη της προκαταρκτικής σχεδίασης μίας μηχανής, τα υλικά κατασκευής της, ενώ τονίζεται η σημασία των φυσικών ιδιοτήτων τους για την ηλεκτρομαγνητική και τη θερμική συμπεριφορά της. Μετά την ερμηνεία ορισμένων σημαντικών φαινομένων που συνήθως αποτελούν πρόκληση κατά την σχεδιομελέτη μίας μηχανής, επισημαίνονται οι βασικότερες μεθοδολογίες υπολογισμού απωλειών. Κατόπιν θεμελιώνεται το ισοδύναμο κύκλωμα της το οποίο με τη βοήθεια του μετασχηματισμού Park αναλύεται στο d-q πλαίσιο.

Στη συνέχεια αναλύεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και συγκεκριμένα το ελεύθερο λογισμικό FEMM μέσω της διεπαφής του οποίου με το Matlab προκύπτουν οι κυματομορφές της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής, της Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης και της οριζόντιας δύναμης (thrust) που παράγεται από την αλληλεπίδραση των πεδίων της μηχανής, σε ορισμένες κρίσιμες λειτουργικές καταστάσεις. Κατόπιν επιλέγοντας κατάλληλη μεθοδολογία υπολογίζονται οι απώλειές της και προσδιορίζεται ο βαθμός απόδοσής της. Για την επαλήθευση των ανωτέρω διεξήχθησαν πειραματικές μετρήσεις όπου προσδιορίστηκε η ΗΕΔ, οι απώλειες χαλκού και η δύναμη ευθυγράμμισής της.

Μετά το πέρας της μελέτης των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών της μηχανής, αναφέρονται τα βασικά θερμικά φαινόμενα που συναντώνται σε μία LPMSM και οι μηχανισμοί διάδοσης της θερμότητας στο εσωτερικό της. Αφού τονιστεί η σημασία του περιορισμού της υπερθέρμανσης, ώστε να μην προκύψουν προβλήματα στις μονώσεις των πηνίων ή στην μαγνήτιση των μόνιμων μαγνητών, παρατίθενται τα βασικότερα συστήματα ψύξης μίας μηχανής.

Ακολουθεί η θερμική ανάλυση της LPMSM με τη μέθοδο των συγκεντρωμένων παραμέτρων, η οποία αν και αποτελεί μία απλή μέθοδο παρέχει σημαντικά δεδομένα τόσο για τη τελική κατάσταση της όσο και για τη μεταβατική. Για την επαλήθευση αυτών των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε μία ακόμα προσομοίωση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και το λογισμικό FEMM. Συγκεκριμένα μελετήθηκε μία κάθετη τομή ως προς τον άξονα της μηχανής και επαναπροσδιορίστηκε η τελική θερμοκρασία των τμημάτων της. Βασική αδυναμία της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η έλλειψη πληροφοριών για τη μεταβατική κατάσταση της μηχανής.

Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων αξιολογήθηκαν ως προς την ορθότητα τους και συγκρίθηκαν μεταξύ τους ώστε να προκύψουν συμπεράσματα για τη θερμική συμπεριφορά της μηχανής και την αναγκαιότητα ή μη εγκατάστασης ενός καλύτερου συστήματος ψύξης.

Κατά την ολοκλήρωση της εργασίας συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την ανάλυση της υπό μελέτη μηχανής.

Λέξεις Κλειδιά: Γραμμική Μηχανή Μόνιμων Μαγνητών, Μαγνήτες Σαμαρίου – Κοβαλτίου, Ηλεκτρεγερτική Δύναμη, Απώλειες Χαλκού, Απώλειες Πυρήνα, Μαγνητικά Υλικά, Αγωγή Υλικά, Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων, Βαθμός Απόδοσης, Θερμικά Φαινόμενα, Μετάδοση Θερμότητας, Ισοδύναμο Κύκλωμα Συγκεντρωμένων Παραμέτρων, Θερμική Ανάλυση

ABSTRACT

In the context of this thesis, an attempt was made to determine the parameters of a Linear Permanent Magnet Synchronous Motor (LPMSM) and to calculate its losses using certain “traditional” methodologies. Subsequently, a study employing three models was conducted to assess its thermal behavior under nominal load conditions.

Initially, the operating principle of a linear permanent magnet synchronous motor is analyzed, and its most common topologies are presented. The principal parameters of an electrical machine’s preliminary design are then outlined, together with the construction materials, while emphasizing the significance of their physical properties for the machine’s electromagnetic and thermal performance. Following the explanation of several critical phenomena that typically pose challenges during the design process, the primary loss calculation methodologies are highlighted. Thereafter, the equivalent circuit of the machine is established, which, with the use of Park transformation, is analyzed in the d–q reference frame.

The finite element method (FEM) is subsequently examined, with particular focus on the open-source software FEMM. Using Lua Scripts via MATLAB the waveforms of the magnetic flux, the electromotive force (EMF), and the thrust force generated by the interaction of the machine’s fields are obtained under specific critical operating conditions. Using an appropriate methodology, the losses of the machine are then computed, and its efficiency is determined. To validate the aforementioned results, experimental measurements were conducted to determine the EMF, copper losses, and the machine’s cogging force.

Following the study of the electromagnetic characteristics of the machine, the principal thermal phenomena encountered in an LPMSM and the mechanisms of heat transfer within it are discussed. The importance of limiting overheating—so as to avoid insulation degradation in the windings or demagnetization of the permanent magnets—is emphasized, and the main cooling systems employed in such machines are presented.

The thermal analysis of the LPMSM was carried out using the lumped-parameter method, which, although simple, provides significant information regarding both its steady-state and transient conditions. To verify these results, an additional simulation was performed using the finite element method with the FEMM software. Specifically, a cross-section perpendicular to the machine axis was examined and the final (steady-state) temperatures of its components were re-evaluated. A principal limitation of the lumped-parameter approach is the lack of information about the machine’s transient behavior.

The results of these simulations were assessed for correctness and compared with one another in order to draw conclusions about the machine’s thermal behaviour and the necessity (or not) of implementing an improved cooling system.

Upon completion of the work, the simulation results and the principal conclusions derived from the analysis of the machine under study are compiled.

Keywords: Linear Permanent Magnet Synchronous Motor, Samarium–Cobalt Magnets, Electromotive Force, Copper Losses, Core Losses, Magnetic Materials, Conductive Materials, Finite Element Method, Efficiency, Thermal Phenomena, Heat Transfer, Lumped-Parameter Equivalent Circuit, Thermal Analysis.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας ολοκληρώνεται και ο κύκλος σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Ένας κύκλος που άρχισε αρκετά ιδιαίτερα (με μία πανδημία) αλλά έκλεισε εξαιρετικά όμορφα. Θα ήθελα, λοιπόν, να ευχαριστήσω από τα βάθη της καρδιάς μου όλους όσους συντέλεσαν στην πραγμάτωση της παρούσας εργασίας και όσους στάθηκαν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια.

Πρώτα πρώτα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα αυτής της διπλωματικής εργασίας, Καθηγητή κ. Αντώνιο Κλαδά τόσο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας μου μία άκρως ενδιαφέρουσα εργασία, όσο και για την άριστη και ακούραστη καθοδήγηση του κατά τη διάρκεια εκπόνησής της. Του οφείλω ακόμα ένα ευχαριστώ για τις γνώσεις που μου μετέδωσε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου ενώ ο ενθουσιασμός και η μεταδοτικότητα του αποτέλεσαν σημαντικό παράγοντα ώστε να επιλέξω να ασχοληθώ με τον κλάδο των ηλεκτρικών μηχανών.

Ευχαριστώ τους διδακτορικούς φοιτητές Αντώνιο Σιδέρη και Γιάννη Αλονιστιώτη οι οποίοι με τις εύστοχες συμβουλές και τις παροτρύνσεις τους βοήθησαν σημαντικά στην οργάνωση και στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω σε όλους και όλες συμφοιτητές και συμφοιτήτριες, φίλους και φίλες με στήριξαν, αποτελώντας παρέα και αποκούμπι μου όλα αυτά τα χρόνια. Δε θα αναφερθώ σε καθέναν ξεχωριστά διότι η έκταση της θα διπλασιαστεί. Θα μου λείψουν όμως οι πρωινές μας επισκέψεις στη κεντρική βιβλιοθήκη του Ε.Μ.Π. και τα «καφεδιαβάσματα» μας.

Τέλος μακράν το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένεια μου για όλα όσα έχουν κάνει για εμένα τα τελευταία 24 χρόνια, για την υποστήριξη της, την υπομονή της και κυρίως για την αγάπη της.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	7
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	9
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1/ ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	14
1.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2/ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ	16
2.1 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ	16
2.2 ΤΡΕΝΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΥΨΩΣΗΣ (MAGLEV)	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3/ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	19
3.1 ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ	19
3.2 ΔΟΜΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ (LSM)	19
3.3 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ	20
3.4 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ	21
3.5 ΤΟΠΟΛΟΓΙΕΣ ΜΑΓΝΗΤΩΝ	23
3.6 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΠΛΗΡΟΤΗΤΑΣ – ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΟΣ	25
3.7 ΑΓΩΓΟΙ – ΜΟΝΩΣΕΙΣ	29
3.8 ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	30
3.9 ΥΛΙΚΑ ΑΞΟΝΑ ΚΑΙ ΚΕΛΥΦΟΥΣ	34
3.10 ΕΠΙΔΕΡΜΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΚΑΙ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΓΕΙΤΝΙΑΣΗΣ (SKIN AND PROXIMITY EFFECT)	35
3.11 LONGITUDINAL END EFFECT ΚΑΙ COGGING FORCE	37
3.12 ΔΙΝΟΡΡΕΥΜΑΤΑ	38
3.13 ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΠΩΛΕΙΩΝ	38
3.13.1 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΠΥΡΗΝΑ	39
3.13.2 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΧΑΛΚΟΥ	41
3.13.3 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ	42
3.13.4 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΛΟΓΩ ΕΓΓΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΕΠΙΔΕΡΜΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ	43
3.14 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ	43
3.15 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ PARK	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4/ ΠΡΟΣΜΟΙΩΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ FEMM	48
4.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ – FEMM	48
4.2 ΜΑΓΝΗΤΟΣΤΑΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	48

4.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ	49
4.4 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ	51
4.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΕΘΩΝ	54
4.5.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ	55
4.5.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗΣ	57
4.5.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΕΔ ΚΕΝΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ	58
4.5.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΩΝ ΟΡΘΟΥ ΚΑΙ ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ	61
4.5.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΓΙΑ $J = J_n$ ΚΑΙ $\delta = 0^\circ$	62
4.5.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΕΔ ΓΙΑ $J = J_n$ ΚΑΙ $\delta = 0^\circ$	63
4.5.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΓΙΑ $J = J_n$ ΚΑΙ $\delta = 90^\circ$	65
4.5.8 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΓΙΑ $J = J_n$ ΚΑΙ $\delta = 90^\circ$	65
4.5.9 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΕΔ ΓΙΑ $J = J_n$ ΚΑΙ $\delta = 90^\circ$	65
4.5.10 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ ΓΙΑ $J = J_n$ ΚΑΙ $\delta = 110^\circ$	66
4.5.11 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΓΙΑ $J = J_n$ ΚΑΙ $\delta = 110^\circ$	67
4.5.12 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΕΔ ΓΙΑ $J = J_n$ ΚΑΙ $\delta = 110^\circ$	67
4.5.13 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ	68
4.5.14 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	70
4.6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	70
4.6.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΗΣ ΗΕΔ	72
4.6.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΧΑΛΚΟΥ	73
4.6.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΔΥΝΑΜΗΣ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗΣ	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5/ ΘΕΡΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ	77
5.1 ΤΡΟΠΟΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	77
5.1.1 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΜΕ ΑΓΩΓΗ	77
5.1.2 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΜΕ ΣΥΝΑΓΩΓΗ	79
5.1.3 ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΜΕ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ	82
5.2 ΘΕΡΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΜΗΧΑΝΗΣ	83
5.3 ΨΥΞΗ ΜΗΧΑΝΩΝ	83
5.4 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΜΗΧΑΝΩΝ	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6/ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	86
6.1 ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΣΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ	86
6.2 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	86
6.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΙΜΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	89
6.3.1 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΑΓΩΓΗΣ	89
6.3.2 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ	92
6.3.3 ΘΕΡΜΟΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΕΣ	92
6.3.4 ΠΗΓΕΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ	93
6.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	93
6.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7/ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	96
7.1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	96
7.2 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΑΓΩΓΗΣ	96
7.3 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΣΥΝΑΓΩΓΗΣ	97
7.4 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΘΕΡΜΙΚΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ	97
7.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΘΕΤΗΣ ΤΟΜΗΣ	97
7.5.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΗΓΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	98
7.5.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ	99
7.5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	100
7.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	105

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8/ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	107
8.1 ΚΥΡΙΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	107
8.2 ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗ	108
8.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	109
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	110

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4/ ΠΡΟΣΜΟΙΩΣΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΣΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ FEMM	48
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.1	56
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.2	56
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.3	58
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.4	59
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.5	59
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.6	60
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.7	60
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.8	60
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.9	61
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.10	62
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.11	63
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.12	63
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.13	64
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.14	64
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.15	65
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.16	65
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.17	66
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.18	66
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.19	67
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.20	67
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.21	68
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.22	68
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.23	70
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.24	72
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.25	72
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.26	73
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.27	73
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.28	75
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.29	75
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.30	75
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4.31	76
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6/ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ	 86
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.1	93
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.2	94
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.3	94

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7/ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	96
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7.1	102
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7.2	103
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7.3	104

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών μίας γραμμικής μηχανής μόνιμων μαγνητών (Linear Permanent Magnet Synchronous Motor – LPMSM) καθώς και ο υπολογισμός των απωλειών και του βαθμού απόδοσης της.

Έναν ακόμα στόχο αποτελεί η κατανόηση της θερμικής συμπεριφοράς της συγκεκριμένης μηχανής τόσο κατά την μεταβατική της κατάσταση όσο και στη τελική της. Για την εκπλήρωσή του επιστρατεύονται τρία μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία αναδεικνύουν τις προκλήσεις και την πολυπλοκότητα της μελέτης των θερμικών φαινομένων μιας ηλεκτρικής μηχανής.

1.2 Δομή της Εργασίας

Το παρόν κεφάλαιο είναι εισαγωγικό με σκοπό να κατατοπίσει τον αναγνώστη ως προς τη δομή και το περιεχόμενο της εργασίας.

Το δεύτερο κεφάλαιο περιλαμβάνει μια ανασκόπηση των βασικών εφαρμογών μιας γραμμικής μηχανής, με ειδική αναφορά στα τρένα μαγνητικής αιώρησης (MAGLEVs).

Στο τρίτο κεφάλαιο παρέχεται το θεωρητικό υπόβαθρο που είναι αναγκαίο για την κατανόηση των εννοιών και των μεθοδολογιών που θα εφαρμοστούν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Πιο συγκεκριμένα αφού γίνει μία σύντομη ιστορική αναδρομή στις πατέντες και στις εφευρέσεις που αποτέλεσαν τον προάγγελο των τωρινών γραμμικών ηλεκτρικών μηχανών, αναλύεται η δομή και η αρχή λειτουργίας τους καθώς και οι διαφορετικές τους τοπολογίες. Στη συνέχεια δίνονται οι ορισμοί κάποιων σημαντικών μεγεθών για τη σχεδίαση και τη μελέτη μιας μηχανής και καταγράφεται ο κομβικός ρόλος που έχουν τα υλικά από τα οποία αποτελούνται τα διάφορα μέρη της στις ηλεκτρομαγνητικές της ιδιότητες. Αφού παρουσιαστούν εκτενώς ορισμένα ανεπιθύμητα φαινόμενα, αναλύονται οι απώλειες της και προσδιορίζονται τα μοντέλα υπολογισμού τους. Τέλος επισημαίνεται η σημασία του ισοδύναμου κυκλώματος της μηχανής και του μετασχηματισμού Park ως βασικά εργαλεία για την προσομοίωση και την διερεύνηση της ηλεκτρομαγνητικής της συμπεριφοράς.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η λειτουργία του λογισμικού FEMM και οι διαδικασίες υπολογισμού και προσδιορισμού των βασικών χαρακτηριστικών της μηχανής. Στη συνέχεια με βάση τα προτεινόμενα μοντέλα απωλειών του κεφαλαίου 3, εξάγονται οι απώλειες της μηχανής και υπολογίζεται ο βαθμός απόδοσής της. Για την επαλήθευση των παραπάνω χαρακτηριστικών πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο ορισμένα πειράματα από όπου εξήχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα για την ΗΕΔ, τις απώλειες χαλκού και την δύναμη ευθυγράμμισης της μηχανής.

Το πέμπτο κεφάλαιο αποτελεί μία εισαγωγή στα θερμικά φαινόμενα και μηχανισμούς που συναντώνται σε μία ηλεκτρική μηχανή. Κατόπιν εξηγείται η σημασία των απωλειών θερμότητας για την ορθή λειτουργία της και αναλύονται τα συστήματα ψύξης που της επιτρέπουν να παραμένει εντός των επιτρεπτών ορίων δίχως να καταστρέφονται οι μονώσεις των τυλιγμάτων ή να απομαγνητίζονται οι μόνιμοι μαγνήτες της.

Στο έκτο κεφάλαιο αναλύεται η μέθοδος των συγκεντρωμένων παραμέτρων, η οποία αποτελεί μία από τις δύο προσεγγιστικές μεθοδολογίες που θα εφαρμόσουμε για την μελέτη της θερμικής συμπεριφοράς της μηχανής.

Στο έβδομο κεφάλαιο πραγματοποιείται η θερμική ανάλυση της κάθετης τομής της μηχανής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Κατόπιν συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα όλων των μεθόδων ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για τη θερμική λειτουργία της μηχανής.

Τέλος στο όγδοο κεφάλαιο παρατίθενται τα γενικά συμπεράσματα από ολόκληρη την εργασία και αφού αναφερθεί η συνεισφορά της στην πρόοδο της επιστήμης προτείνονται νέα σχετικά θέματα πρόσφορα για περαιτέρω διερεύνηση.

Κεφάλαιο 2

Εφαρμογές Γραμμικών Μηχανών

2.1 Βιομηχανικές Εφαρμογές των Γραμμικών Μηχανών

Οι γραμμικές μηχανές έχουν τη δυνατότητα να παράγουν απευθείας γραμμική κίνηση δίχως την ανάγκη μετατροπής της περιστροφικής κίνησης με τη βοήθεια γραναζιών ή κοχλιών με αποτέλεσμα να είναι ιδιαίτερα ελκυστικές στο τομέα των εργαλειομηχανών και σε εφαρμογές οι οποίες απαιτούν υψηλή ταχύτητα και ακρίβεια. Ένα ακόμα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα είναι η έλλειψη μηχανικών μερών με αποτέλεσμα τον περιορισμό των απωλειών λόγω τριβής αλλά και την ευκολότερη και σπανιότερη συντήρησή τους. Αναλυτικότερα οι γραμμικές μηχανές αξιοποιούνται ιδιαίτερα στις ακόλουθες βιομηχανίες και εφαρμογές [1]:

- Ασανσέρ μαγνητικής ανύψωσης
- Ρομποτικές εφαρμογές για εκτέλεση κινήσεων με μεγάλη ακρίβεια, κοπή υλικών με χρήση laser ή νερού υπό πίεση και εφαρμογών pick-and-place.
- Σε ιατρικές συσκευές όπως μαγνητικοί τομογράφοι για την ακριβή μετακίνηση αισθητήρων ή τραπεζιών ασθενών καθώς και κατά τον χειρισμό χειρουργικών ρομπότ για επεμβάσεις μικροχειρουργικής.
- Μεταφορά προϊόντων και εξοπλισμού κατά μήκος μιας γραμμής παραγωγής μέσω ταινιόδρομων

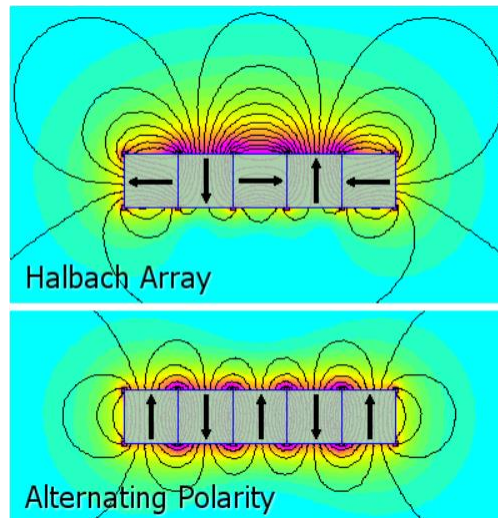
2.2 Τρένα Μαγνητικής Αιώρησης (MAGLEVs)

Ειδική μνεία στις εφαρμογές των γραμμικών μηχανών αξίζει στα τρένα μαγνητικής αιώρησης (MAGLEVs). Τα συγκεκριμένα τρένα χρησιμοποιούν συστήματα αιώρησης, καθοδήγησης και πρόωσης χωρίς επαφή, και δεν διαθέτουν τροχούς, άξονες ή άλλα συστήματα μετάδοσης κίνησης. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά σιδηροδρομικά οχήματα, δεν υπάρχει άμεση φυσική επαφή ανάμεσα στο τρένο και στις ράγες.

Εξαιτίας της ιδιαίτερης λειτουργίας τους συγκεντρώνουν πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τα «παραδοσιακά» τρένα υψηλής ταχύτητας καθώς λόγω της ανυπαρξίας τροχών και επομένως επαφής με τις ράγες μειώνονται τα κόστη συντήρησης ενώ δεν υπάρχει πιθανότητα εκτροχιασμού και ο θόρυβος και οι δονήσεις είναι σημαντικά μειωμένες (μείωση της τάξεως των 10 με 15 dB). Επιπλέον ταξιδεύουν με μεγαλύτερες ταχύτητες, μπορούν να στρίψουν καλύτερα και δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από το εξωτερικό περιβάλλον [2].

Παρόλα αυτά τα πλεονεκτήματά τους όμως η απουσία επαφής με το έδαφος έχει ένα θεμελιώδες πρόβλημα το οποίο είναι η έλλειψη ικανότητας επιβράδυνσης μέσω συμβατικών φρένων. Το «φρενάρισμα» δηλαδή θα πρέπει να γίνεται μέσω ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στις ράγες και στο βαγόνι. Επιπλέον όσο μεγαλύτερο είναι το βάρος που μεταφέρει το τρένο τόσο περισσότερη ενέργεια απαιτείται για την αιώρηση του γεγονός που καθιστά τα MAGLEVs ακατάλληλα για μεταφορά μεγάλων φορτίων (cargo trains), ενώ είναι δύσκολη και η διακλάδωση της γραμμής εξαιτίας της κατασκευής των ραγών [2]. Τέλος πρέπει να ληφθεί υπόψη και η έκθεση των επιβατών στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο το οποίο απαιτείται για την ορθή λειτουργία του σιδηροδρόμου. Αυτή μπορεί να περιοριστεί με τη διάταξη των μόνιμων μαγνητών του δρομέα σε διάταξη Halbach (Εικόνα 2.1). Με αυτό τον τρόπο ενισχύεται το μαγνητικό πεδίο στη μία πλευρά της συστοιχίας των μαγνητών ενώ είναι σημαντικά μειωμένο στην άλλη πλευρά [3].

Για τη κίνηση ενός MAGLEV απαιτείται η επίλυση τεσσάρων επιμέρους προβλημάτων, πιο συγκεκριμένα της αιώρησης, της πρόωσης, της παραμονής στη πορεία του (να μην υπάρξει δηλαδή κάποια οριζόντια μετατόπιση) και της ανέπαφης μεταφοράς ενέργειας από το έδαφος στο κινούμενο όχημα.



Εικόνα 2.1: Στο πάνω μέρος φαίνεται το μαγνητικό πεδίο μιας διάταξης Halbach ενώ στο κάτω μιας τυπικής συστοιχίας μαγνητών εναλλασσόμενης πολικότητας

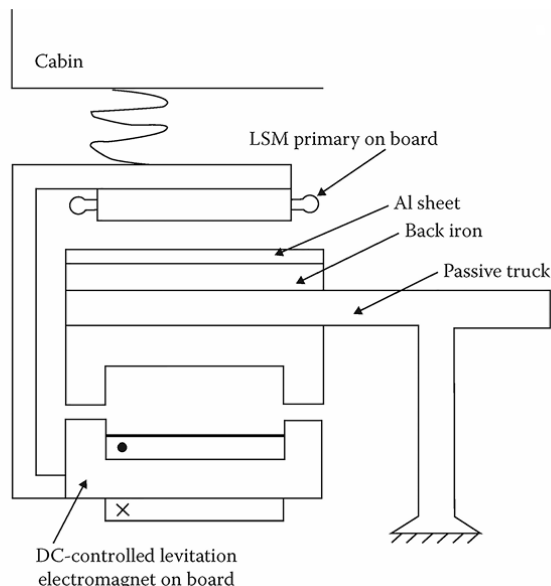
Για την επίτευξη της αιώρησης υπάρχουν δύο βασικές στρατηγικές. Η πρώτη που εφαρμόζεται για χαμηλότερες ταχύτητες λέγεται EML (Electromagnetic Levitation) και η δεύτερη EDL (Electrodynamic Levitation).

Στη περίπτωση EML η αιώρηση επιτυγχάνεται μέσω της μαγνητικής έλξης ανάμεσα στις ράγες και στο βαγόνι (Εικόνα 2.2) είναι όμως από τη φύση του ασταθές και απαιτεί διαρκή έλεγχο (μέσω της έντασης των ρευμάτων στους ηλεκτρομαγνήτες) ώστε το διάκενο να παραμένει σταθερό (περίπου 10mm). Με την αύξηση της ταχύτητας του συρμού αυξάνεται και η δυσκολία ελέγχου της απόστασης στο διάκενο γι' αυτό η συγκεκριμένη τεχνολογία δε χρησιμοποιείται σε εφαρμογές πολύ υψηλών ταχυτήτων.[1][2]

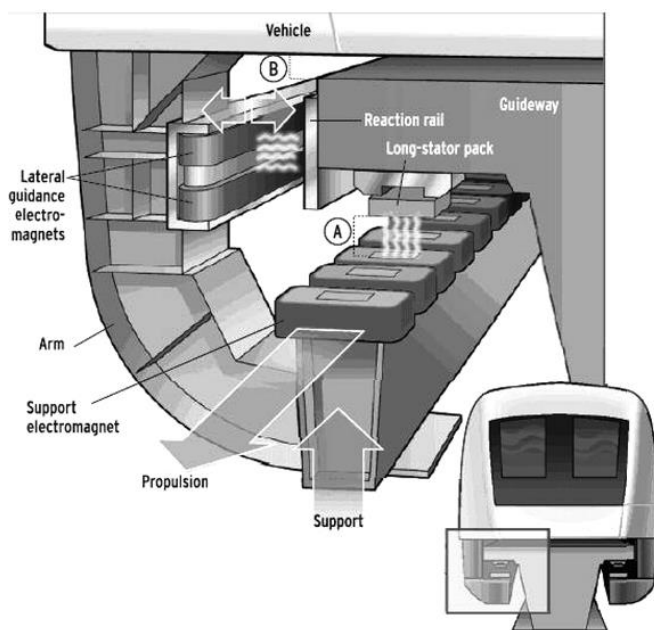
Στη περίπτωση του EDL αξιοποιείται η αποστική δύναμη μεταξύ των μαγνητών του συρμού και των ραγών (Εικόνα 2.3) για να επιτευχθεί η αιώρηση. Παρόλο που αυτός ο σχεδιασμός δε μπορεί να προκαλέσει αιώρηση σε χαμηλές ταχύτητες και είναι πιο δύσκολος στην εφαρμογή του από τον EML, λόγω της φύσης του μαγνητικού κυκλώματος είναι σταθερότερο και δεν απαιτεί έλεγχο στην απόσταση διακένου (το οποίο μπορεί να φτάσει έως και 100mm) γεγονός που το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων. [2]

Το πρόβλημα της πρόωσης λύνεται με την χρήση μιας γραμμικής ηλεκτρικής μηχανής. Τα κυριότερα είδη που αξιοποιούνται είναι η γραμμική μηχανή επαγωγής (LIM) και η σύγχρονη γραμμική μηχανή μόνιμων μαγνητών (LSM) οι οποίες θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο MAGLEV της Ιαπωνίας χρησιμοποιούνται υπεραγώγιμοι μαγνήτες αντί για μόνιμους, ενώ τόσο ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται τόσο η αιώρηση όσο και η παραμονή του στη πορεία του διαφέρει από αυτά που αναφέρθηκαν νωρίτερα αλλά στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής αναλυθούν.

Για να μην υπάρξει κάποια οριζόντια μετατόπιση με αποτέλεσμα να εκτραπεί το τρένο από τη πορεία του μπορούν να αξιοποιηθούν τόσο ελκτικές όσο και αποστικές μαγνητικές δυνάμεις. Η χρήση των αποστικών δυνάμεων ευνοεί την λειτουργία σε υψηλές ταχύτητες ενώ οι ελκτικές οι οποίες συνδέονται και με το σύστημα αιώρησης δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη υψηλών ταχυτήτων. [2]



Εικόνα 2.2: Σε αυτό το σχήμα διακρίνουμε πως πραγματοποιείται η αιώρηση του βαγονιού μέσω των ελκτικών δυνάμεων (EML) που αναπτύσσονται ανάμεσα στους μαγνήτες που βρίσκονται στις ράγες και του DC ελεγχόμενου ηλεκτρομαγνήτη που βρίσκεται στο συρμό. Επιπλέον είναι ορατή και η σύγχρονη γραμμική μηχανή που είναι υπεύθυνη για τη πρόωση. [4]



Εικόνα 2.4: Στη παρούσα εικόνα φαίνεται η αντιμετώπιση των τριών προβλημάτων (αιώρηση, οδήγηση, πρόωση) που αναλύθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο με βάση το MAGLEV Beijing-Shanghai της Κίνας. [2]

Κεφάλαιο 3

Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η θεωρητική ανάλυση της Σύγχρονης Γραμμικής Μηχανής Μόνιμων Μαγνητών. Πιο συγκεκριμένα αφού καταγραφεί ένα σύντομο ιστορικό πλαίσιο θα αναλυθούν οι διαφορετικές τοπολογίες μιας Σύγχρονης Γραμμικής Μηχανής Μόνιμων Μαγνητών μαζί με τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που αυτές προσφέρουν, ενώ στη συνέχεια θα αναλυθούν τα μαγνητικά υλικά που χρησιμοποιούνται κατά τη κατασκευή τους.

3.1 Ιστορία της Γραμμικής Μηχανής

Η έναρξη της ιστορίας των γραμμικών μηχανών μπορεί να τοποθετηθεί στη δεκαετία του 1840 και στη δουλειά του Charles Wheatstone. Ωστόσο εξαιτίας του όχι ιδιαίτερα πρακτικού σχεδιασμού των πρώτων γραμμικών μηχανών η εξέλιξη τους καθυστέρησε σημαντικά. Παρά τις κατά καιρούς επιτυχημένες «πατέντες» και μοντέλα (που ξεκίνησαν από την εποχή του Bachelet το 1914 με διάφορες διακυμάνσεις εξαιτίας των δύο Παγκοσμίων Πολέμων) το πρώτο σημαντικό μοντέλο γραμμικής μηχανής που τη συνδύαζε και με μαγνητική ανύψωση κατασκευάστηκε από τον Dr Eric Laithwaite στα τέλη της δεκαετίας του 1940.[5]

Στις ΗΠΑ έμπνευση από το έργο του Laithwaite άντλησε ο Henry Kolm ο οποίος πρότεινε τη κατασκευή ενός «magnaplane» το οποίο θα αιωρούνταν πάνω από ράγες και θα συνέδεε το Las Vegas με το Los Angeles, το San Diego και το San Francisco. Εξαιτίας όμως του κόστους κατασκευής του και πολιτικών προβλημάτων το έργο αυτό δεν υλοποιήθηκε ποτέ. [5]

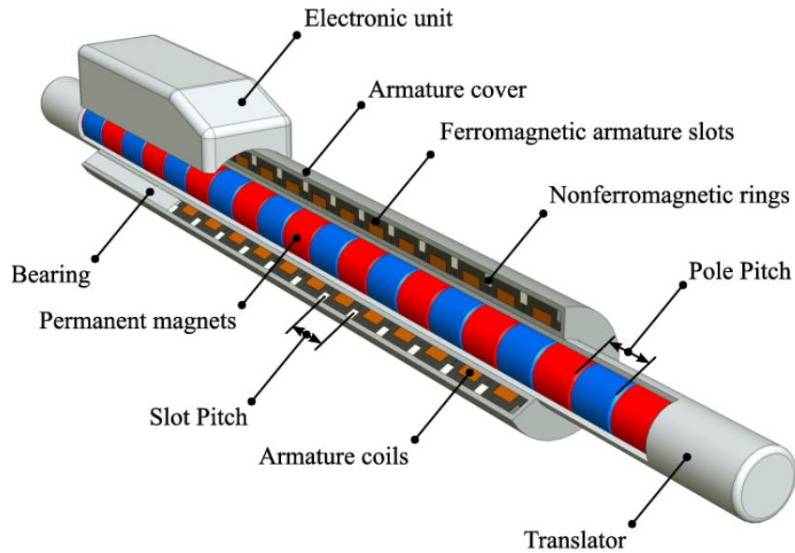
Αντίθετα με τις ΗΠΑ, η Γερμανία και η Ιαπωνία προχώρησαν σε περεταίρω έρευνα σχετικά με τα MAGLEVs. Το 1971 Γερμανοί επιστήμονες, με κρατική χρηματοδότηση, κατασκεύασαν ένα πρότυπο τραίνο το οποίο μπορούσε να φτάσει ταχύτητες έως και 433 km/h (στη βιβλιογραφία αυτό το πρότυπο αναφέρεται ως Transrapid). Παρά τις υψηλές ταχύτητες που μπορούσε να αναπτύξει, σχεδιαστικά επιλέχθηκε η μέθοδος EML ώστε να επιτευχθεί η αιώρηση.[5]

Η Ιαπωνία στη συνέχεια βασισμένη στο έργο των Γερμανών επιστημόνων προχώρησε στη κατασκευή ενός MAGLEV το οποίο θα πραγματοποιεί μια διαδρομή 438 χιλιομέτρων συνδέοντας το Τόκυο με την Οσάκα. Η κατασκευή του ξεκίνησε το 2014 και η μερική ολοκλήρωση του έργου μέχρι την Nagoya εκτιμάται ότι θα γίνει το 2034. Σε αυτή τη περίπτωση επιλέχθηκε η μέθοδος EDL για την αιώρηση του τρένου, με αξιοποίηση υπεραγωγίων μαγνητών τοποθετημένων δίπλα στο συρμό και όχι από κάτω από τα βαγόνια.[5]

3.2 Δομή Σύγχρονης Γραμμικής Μηχανής Μόνιμων Μαγνητών

Ανάλογα με τη τοπολογία της Γραμμικής Μηχανής Μόνιμων Μαγνητών η δομή της μπορεί να διαφέρει ωστόσο όλες διαθέτουν:

- Σώμα Στάτη
- Τύλιγμα Στάτη
- Σώμα Δρομέα
- Μόνιμους Μαγνήτες

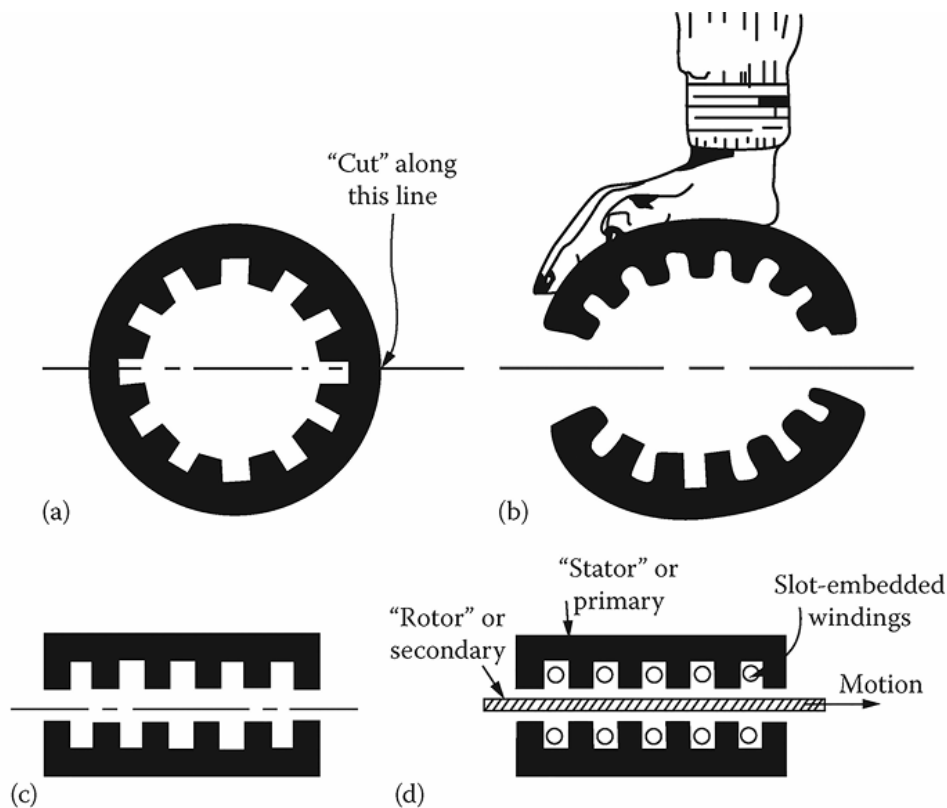


Εικόνα 3.1: Δομή μιας σωληνοειδούς γραμμικής μηχανής μόνιμων μαγνητών. [54]

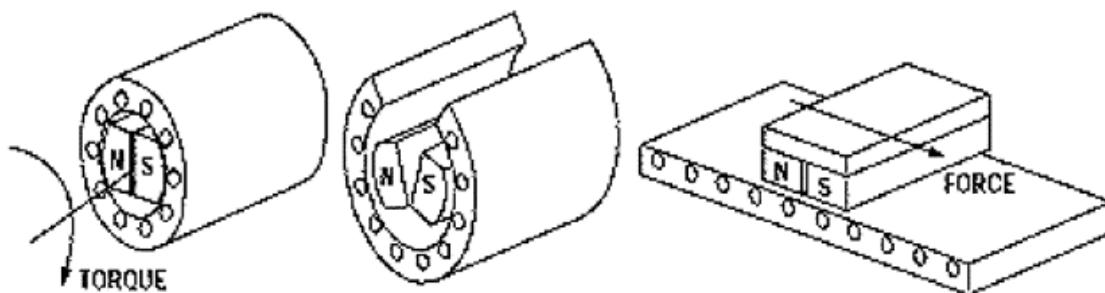
Στη βιβλιογραφία έχει επικρατήσει ο στάτης αυτής της μηχανής να λέγεται «πρωτεύον» (primary) και ο δρομέας «δευτερεύον» (secondary). Σύμφωνα με τον Laithwaite αυτή η αλλαγή ονομασίας προέκυψε καθώς ο δρομέας της γραμμικής μηχανής δεν πραγματοποιεί κυκλική κίνηση και επομένως δε μπορούσε να διατηρηθεί το αγγλικό του όνομα «rotor».[5]

3.3 Αρχή Λειτουργίας Σύγχρονης Γραμμικής Μηχανής

Ο τρόπος λειτουργίας μιας σύγχρονης γραμμικής μηχανής δε διαφέρει σημαντικά από αυτόν μιας τυπικής στρεφόμενης σύγχρονης μηχανής. Στην πραγματικότητα βασίζεται σε ένα «ξετύλιγμα» αυτής όπως φαίνεται στις εικόνες 3.2 και 3.3.



Εικόνα 3.2: Αν «κοπεί» μία κυλινδρική μηχανή στον άξονα που φαίνεται στο α δημιουργείται μία double-sided γραμμική μηχανή καθώς το πρωτεύον περιβάλλει και από τις δύο μεριές το δευτερεύον.[4]



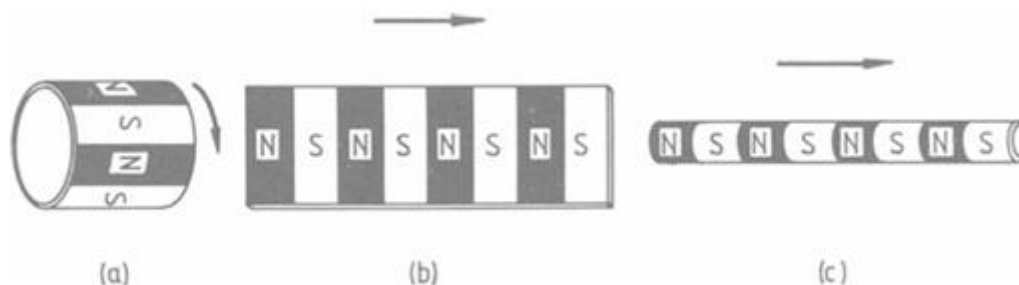
Εικόνα 3.3: Αν «κοπεί» κατά το παραπάνω τρόπο μια κυλινδρική μηχανή δημιουργείται μια single-sided γραμμική μηχανή καθώς το πρωτεύον περιβάλλει το δευτερεύον μόνο από τη μία μεριά. [2]

Με αυτό τον τρόπο το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που παράγεται εξαιτίας του ημιτονοειδούς ρεύματος που διαρρέει τα καλώδια του στάτη-πρωτεύοντος μετατρέπεται σε ένα «κινούμενο» μαγνητικό πεδίο προς μία κατεύθυνση. Έτσι το πεδίο του δρομέα-δευτερεύοντος (που στις παραπάνω εικόνες παράγεται από τους μόνιμους μαγνήτες) αλληλεπιδρά με το πεδίο του πρωτεύοντος προκαλώντας τη γραμμική του κίνηση.

Παρά τις πολλές ομοιότητες των δύο αυτών τύπων ηλεκτρικής μηχανής ως προς την αρχή λειτουργίας τους, υπάρχουν και ορισμένες σημαντικές διαφορές. Εξαιτίας του πεπερασμένου μήκους της γραμμικής μηχανής στα άκρα της υπάρχει ένα στοιχείο ασυμμετρίας με αποτέλεσμα το μαγνητικό πεδίο να παρουσιάζει ανομοιομορφία. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται «longitudinal end effect». [4][2]

3.4 Τοπολογίες Σύγχρονης Γραμμικής Μηχανής

Ανάλογα με τη γεωμετρία τους οι γραμμικές σύγχρονες μηχανές μόνιμων μαγνητών μπορούν να είναι επίπεδες (Flat) ή σωληνοειδείς (Tubular). Αυτές οι δύο τοπολογίες έχουν σημαντικές διαφορές τόσο ως προς το πρωτεύον όσο και ως προς το δευτερεύον τους.



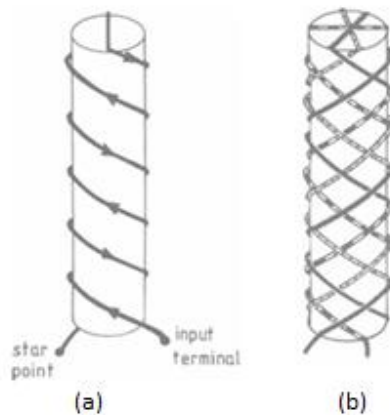
Εικόνα 3.4: (α) Δρομέας κυλινδρικής μηχανής (β) Δευτερεύον Επίπεδης γραμμικής μηχανής (γ) Δευτερεύον Σωληνοειδούς γραμμικής μηχανής [5]

Για πολλά χρόνια εξαιτίας κατασκευαστικών δυσκολιών αλλά και λόγω μη βέλτιστης αξιοποίησης της μαγνητικής ροής (καθώς όλη η ακτινική –χρήσιμη– μαγνητική ροή που δημιουργείται από κάθε πόλο πρέπει να διαπεράσει κατά μήκος τον δευτερεύοντα πυρήνα) οι σωληνοειδείς γραμμικές μηχανές δεν ήταν ιδιαίτερα διαδεδομένες. Το δεύτερο πρόβλημα ξεπεράστηκε τυλίγοντας το πρωτεύον «ελικοειδώς» όπως φαίνεται στην εικόνα 3.5 με αποτέλεσμα την παραγωγή ακτινικής μαγνητικής ροής.



Εικόνα 3.5: Ελικοειδής τύλιγμα του πρωτεύοντος για τη παραγωγή ακτινικής μαγνητικής ροής [5]

Η παραπάνω διάταξη έχει ένα βασικό μειονέκτημα καθώς εκτός από δύναμη στο δευτερεύον ασκεί και ροπή. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος απαιτείται ένα δεύτερο στρώμα ελικοειδούς τυλίγματος με αντίθετη φορά (έλικα αντίθετης κατεύθυνσης) το οποίο ακυρώνει τη περιστροφική δύναμη που προκαλεί ροπή και διπλασιάζει την ακτινική δύναμη που προκαλεί τη γραμμική κίνηση. [5]

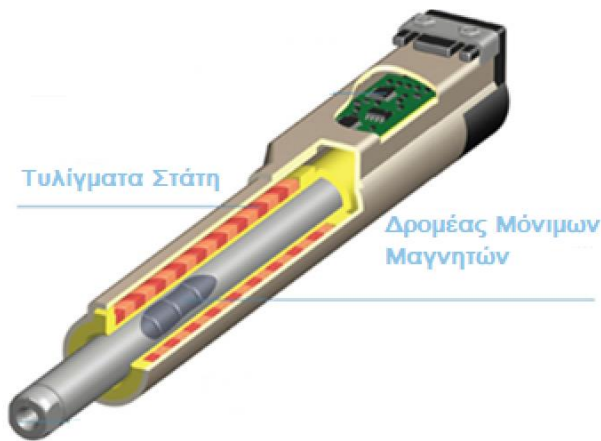


Εικόνα 3.6: (a) ελικοειδές τύλιγμα πρωτεύοντος με αντίθετη κατεύθυνση (ένας αγωγός ώστε να φαίνεται πιο καθαρά) (b) ελικοειδές τύλιγμα με τρεις αγωγούς [5]

Με αξιοποίηση αυτής της νέας γεωμετρίας για τα τυλίγματα του στάτη όλη η μαγνητική ροή από τους μόνιμους μαγνήτες αξιοποιείται πλήρως για την παραγωγή δύναμης. Σύμφωνα με τον ορισμό της δύναμης Lorentz, η δύναμη που δημιουργείται από την αλληλεπίδραση των μαγνητών της ράβδου ώσης και των πηνίων του στάτη είναι κάθετη τόσο στο μαγνητικό πεδίο όσο και στο ρεύμα — δηλαδή στην κατεύθυνση της κίνησης. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά προσδίδουν στις σωληνωτές γραμμικές μηχανές πολύ υψηλή απόδοση. Η αυξημένη αυτή απόδοση συνεπάγεται λιγότερη παραγωγή θερμότητας, γεγονός που περιορίζει τη θερμική διαστολή και συστολή των εξαρτημάτων, καθώς και τη μεταφορά θερμότητας στο φορτίο.

Επιπλέον η παραγωγή δύναμης στις σωληνοειδείς γραμμικές μηχανές είναι γραμμική συνάρτηση του ρεύματος οδήγησης, επειδή το διάκενο αέρα μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος δεν είναι κρίσιμος παράγοντας. Αυτό σημαίνει ότι ακόμη και αν το διάκενο αέρα μεταβάλλεται κατά μήκος της διαδρομής, η δύναμη που παράγει ο κινητήρας παραμένει σταθερή.

Τέλος οι σωληνοειδείς γραμμικές μηχανές μπορούν να λειτουργούν είτε με το πρωτεύον σε κίνηση και το δευτερεύον σταθερό, είτε με το δευτερεύον σε κίνηση και το πρωτεύον ακίνητο. Η δυνατότητα αυτή τις καθιστά κατάλληλους αντικαταστάτες των πνευματικών κυλίνδρων, οι οποίοι λειτουργούν συχνά με εκτεινόμενη και ανασυρόμενη ράβδο, για λειτουργίες ώθησης ή πίεσης.



Εικόνα 3.7: Σωληνοειδής γραμμική μηχανή μόνιμων μαγνητών (tubular permanent magnet linear motor)

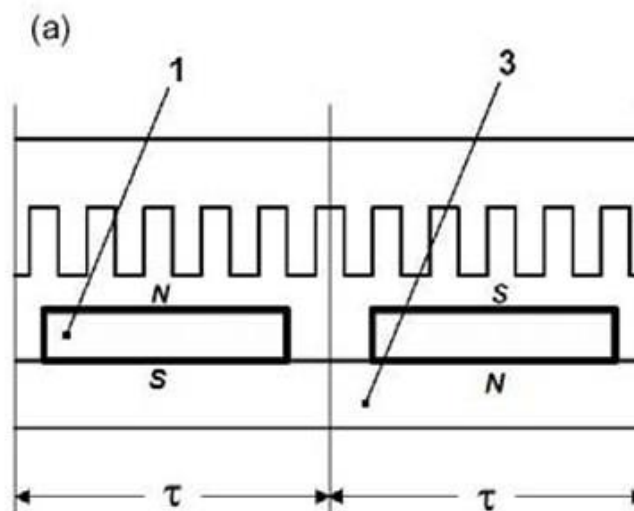
Οι LPMSM χωρίζονται ακόμα σε single-sided ή double-sided ανάλογα με την ύπαρξη μονού ή διπλού πρωτεύοντος εκατέρωθεν του δευτερεύοντος όπως φαίνεται και στις εικόνες 3.2 και 3.3. Επιπλέον εάν οι μόνιμοι μαγνήτες βρίσκονται στο πρωτεύον τότε η μηχανή έχει active reaction rail ενώ αν βρίσκονται στο δευτερεύον η μηχανή έχει passive reaction rail.

3.5 Τοπολογίες Μαγνητών

Ανάλογα με την επιθυμητή λειτουργία της μηχανής η τοπολογία των μόνιμων μαγνητών ποικίλει. Εξαιτίας των πολλών διαφορετικών γεωμετριών που αξιοποιούνται στις γραμμικές μηχανές μόνιμων μαγνητών στη συγκεκριμένη ενότητα δε θα αναφερθούν τοπολογίες σωληνοειδών μηχανών.

Δευτερεύον με Επιφανειακούς Μαγνήτες:

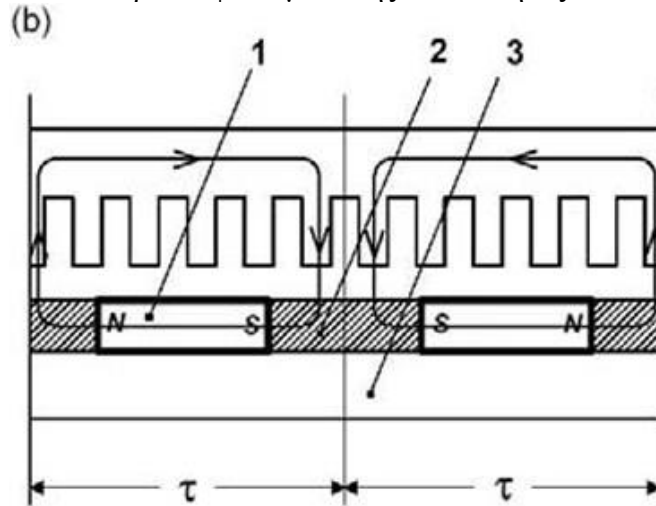
Σε αυτές τις μηχανές οι μαγνήτες τοποθετούνται στην εξωτερική πλευρά του δευτερεύοντος (σε ορισμένες εφαρμογές ακόμα και του πρωτεύοντος) προσφέροντας απλότητα στη κατασκευή και χαμηλό κόστος ενώ λόγω της εγγύτητας με το διάκενο αξιοποιείται καλύτερα η μαγνητική τους ικανότητα. Επιπλέον εμφανίζουν μειωμένη μαγνητική ροή ανάμεσα στους μαγνήτες, η οποία ονομάζεται «ροή σκέδασης», γεγονός πολύ σημαντικό για εφαρμογές που απαιτούν υψηλές αποδόσεις και μεγάλη πυκνότητα ισχύος. Ωστόσο βασικό τους μειονέκτημα αποτελούν οι αντοχές σε μηχανική καταπόνηση καθώς σε εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων ή κραδασμών ενέχεται κίνδυνος αποκόλλησής τους. [1]



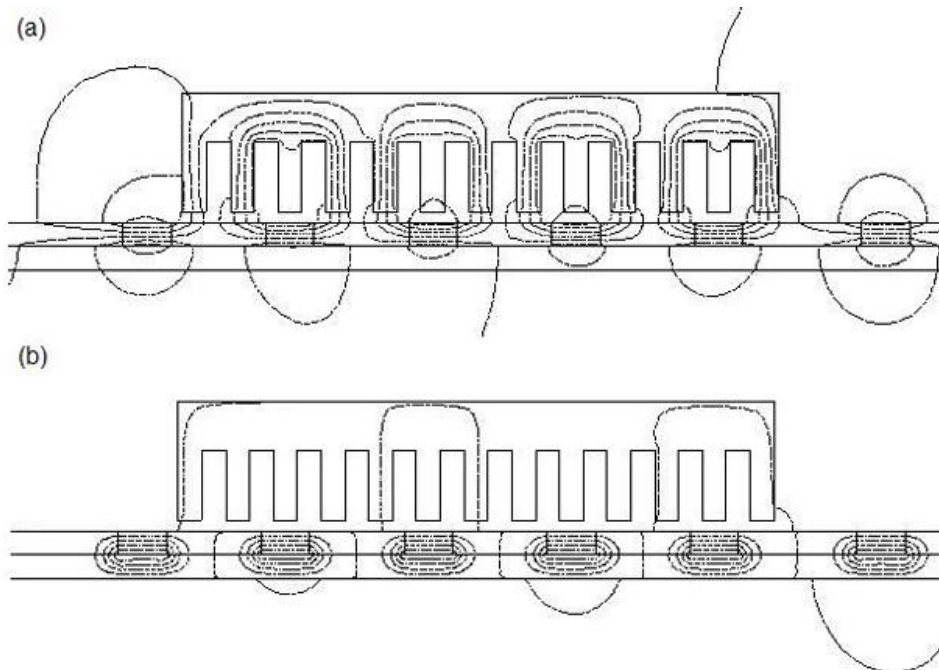
Εικόνα 3.8: LPMSM με επιφανειακούς μαγνήτες [1]

Δευτερεύον με Ένθετους Μαγνήτες:

Σε αντίθεση με τις μηχανές επιφανειακών μαγνητών, όταν η μηχανή διαθέτει ενσωματωμένους μαγνήτες, ο μαγνητικός προσανατολισμός τους είναι παράλληλος προς τη διεύθυνση του κινούμενου μαγνητικού πεδίου και όχι κάθετος. Επίσης σε αυτή τη περίπτωση απαιτείται η ύπαρξη κάποιου μη σιδηρομαγνητικού υλικού (π.χ. αλουμίνιο) ανάμεσα στους μαγνήτες ώστε να περιοριστεί η ροή σκέδασης. Η απουσία του συγκεκριμένου υλικού θα είχε ως αποτέλεσμα η ροή σκέδασης να ξεπερνά την «ωφέλιμη» ροή και η μηχανή να εμφανίζει μεγάλες απώλειες και συνεπώς μικρό βαθμό απόδοσης (Εικόνα 3.10). Με αυτή τη τοπολογία αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της μηχανικής αντοχής που είχαν οι μηχανές επιφανειακών μαγνητών όμως εμφανίζεται εντονότερα το φαινόμενο της εκτυπότητας. [1]



Εικόνα 3.9: LPMSM με ένθετους μαγνήτες [1]



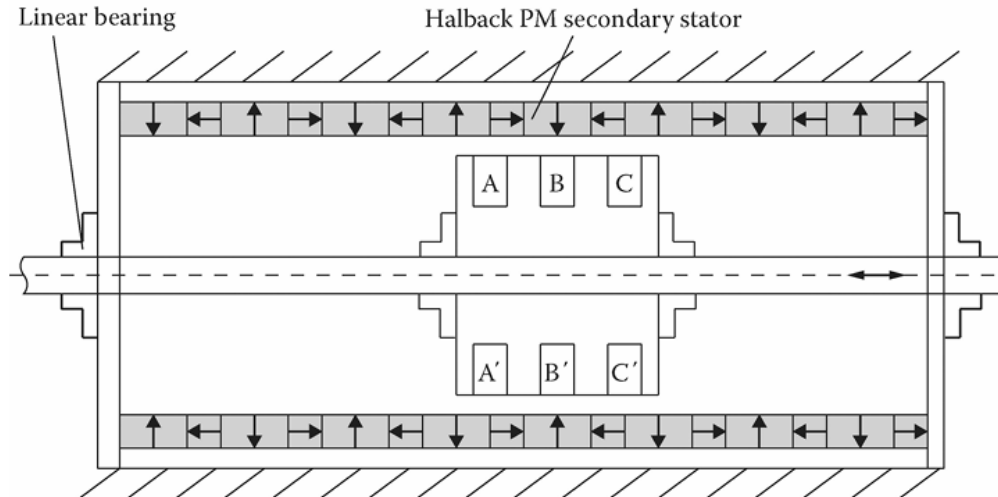
Εικόνα 3.10: Η μαγνητική ροή σε ένα LPMSM με ένθετους μαγνήτες (a) με ύπαρξη μη σιδηρομαγνητικού υλικού ανάμεσα στους μαγνήτες (b) με σιδηρομαγνητικό υλικό ανάμεσα στους μαγνήτες. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρείται ιδιαίτερα μεγάλη ροή σκέδασης [1]

Δευτερεύον με Μαγνήτες σε διάταξη Halbach:

Βασικό χαρακτηριστικό της διάταξης Halbach είναι η συγκέντρωση της μαγνητικής πυκνότητας σχεδόν αποκλειστικά στη μία πλευρά της, γι' αυτό χρησιμοποιείται ευρέως σε ηλεκτρομαγνητικό εξοπλισμό όπου

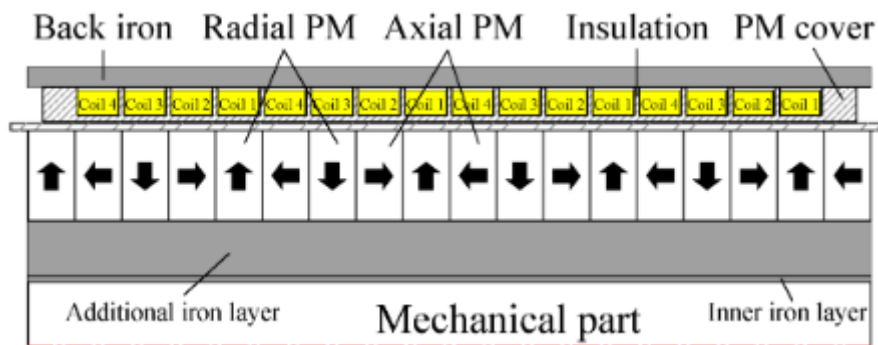
απαιτείται υψηλός βαθμός απόδοσης (βλέπε Εικόνα 2.1). Σε αντίθεση με τις προηγούμενες τοπολογίες όπου η ΗΕΔ μεταβάλλεται περιοδικά λόγω της εναλλασσόμενης πολικότητας των μαγνητών, στη διάταξη Halbach η ΗΕΔ εμφανίζει μέγιστο πλάτος στο κέντρο. [6]

Η συγκεκριμένη τοπολογία μπορεί να ενισχύει σημαντικά τη μαγνητική ροή στη μία πλευρά του δευτερεύοντος όμως εξαιτίας αυτής της ιδιότητας είναι εύχρηστη σχεδόν αποκλειστικά σε single-sided LPMSM. Για να αξιοποιηθεί κατάλληλα σε εφαρμογές double-sided LPMSM η συγκεκριμένη διάταξη απαιτείται να βρίσκεται στο σταθερό μέρος της μηχανής όπως φαίνεται στην εικόνα 3.11.



Εικόνα 3.11: Double-Sided LPMSM με διάταξη Halbach και τις φάσεις του ρεύματος στο κινούμενο πρωτεύον[4]

Η συγκεκριμένη διάταξη εμφανίζει πολλή υψηλή απόδοση ωστόσο είναι ιδιαίτερα ακριβή τόσο ως προς τα υλικά όσο και ως προς τη κατασκευή της.[7]



Εικόνα 3.12: Double-Sided LPMSM με διάταξη Halbach[7]

3.6 Συντελεστής Πληρότητας – Κατανομή Τυλίγματος Πρωτεύοντος

Όσο μικρή διατομή και να έχει ένας αγωγός, όσο σφιχτά και αν τυλιχτεί πάντα θα υπάρχουν μικρά κενά (ακόμα και εξαιτίας της μόνωσης του αγωγού από βερνίκι) με αποτέλεσμα η αύλακα (slot) να μην είναι ποτέ πλήρης χαλκού. Γι' αυτό ορίζεται ο συντελεστής πληρότητας αύλακος (fill factor) ως το πηλίκο:

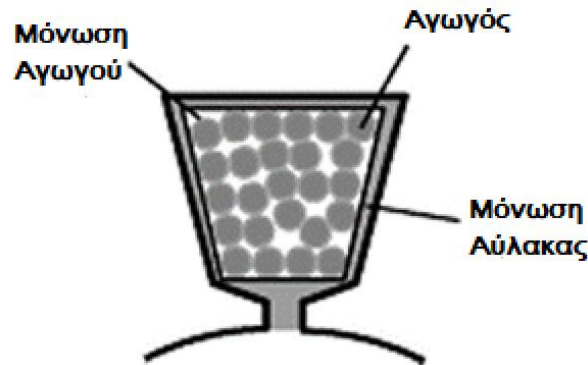
$$ff = \frac{A_{Cu}}{A_{slot}}$$

Όπου:

- A_{Cu} το εμβαδόν που καλύπτει ο χαλκός σε μία αύλακα
- A_{Slot} το εμβαδόν της αύλακας

Όπως θα δούμε και στη συνέχεια ο συντελεστής πληρότητας υπεισέρχεται στις εξισώσεις υπολογισμού της πυκνότητας του ρεύματος J (A/mm^2) με την οποία τροφοδοτούνται τα τυλίγματα κάθε φάσης στη προσομοίωση που έγινε στο FEMM. Συγκεκριμένα δίνεται από τη σχέση:

$$J = \frac{N \cdot I_{rms}}{A_{slot} \cdot ff}$$



Εικόνα 3.13: Αύλακα Μηχανής στην οποία φαίνονται οι αγωγοί που τη διαπερνούν κάθετα, οι μονώσεις τους και γίνεται αντιληπτό ότι δεν καλύπτεται πλήρως από χαλκό. [8]

Σε γενικές γραμμές και ειδικά για εφαρμογές υψηλής πυκνότητας ισχύος κρίνεται αποφασιστικής σημασίας ο συντελεστής πληρότητας αύλακος να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερος (στις περισσότερες εφαρμογές κυμαίνεται ανάμεσα σε 0,4 και 0,6).

Σημαντικό ρόλο τόσο στη μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) όσο και στο αρμονικό περιεχόμενο παίζει η διαμόρφωση των τυλιγμάτων του πρωτεύοντος. Έτσι ανάλογα με τον αριθμό των αυλάκων ανά πόλο και φάση χωρίζονται σε:

- Συγκεντρωμένα μονής ή διπλής στρώσης
- Κατανεμημένα ή κλασματικού βήματος με ένα ή παραπάνω αυλάκια ανά πόλο και φάση

Επιπλέον ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο έχουν τυλιχθεί τα κατανεμημένα ή κλασματικού βήματος χωρίζονται σε βροχοειδή (συνηθέστερα σε μηχανές με μικρό αριθμό πόλων) και σε κυματοειδή (σε πολυπολικές μηχανές χαμηλών ταχυτήτων).[9] [10]

Προτού αναλυθούν περαιτέρω οι δύο πρώτες διαμορφώσεις τυλιγμάτων κρίνεται σκόπιμη η αναφορά ορισμένων μεγεθών και σχέσεων οι οποίες είναι απαραίτητες για την κατανόηση των μεταξύ τους διαφορών.

Αριθμός αυλάκων ανά Πόλο και Φάση q

Το μέγεθος q ορίζεται ως ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση σύμφωνα με τη σχέση:

$$q = \frac{Q}{m \cdot P} \quad (3.1)$$

Όπου:

- Q ο αριθμός των αυλάκων της μηχανής
- m ο αριθμός των φάσεων
- P ο αριθμός των πόλων

Συντελεστής Πλάτους K_b

Ο συντελεστής πλάτους k_b ορίζεται όπως φαίνεται στην εξίσωση 3.2 και εκφράζει την μείωση της θεμελιώδους συνιστώσας (στην ειδική περίπτωση που τεθεί $v = 1$) ή της v -οστής τάξης αρμονικής στη γενική περίπτωση λόγω του επιλεγμένου αριθμού των αυλάκων ανά πόλο και φάση και του βήματος αύλακος.[11]

$$k_{b,v} = \frac{\sin(\frac{v \cdot q \cdot \gamma}{2})}{q \cdot \sin(\frac{v \cdot \gamma}{2})} \quad (3.2)$$

Όπου:

- v η τάξη της αρμονικής
- q ο αριθμός των αυλάκων ανα πόλο και φάση
- γ το βήμα αύλακος σε ηλεκτρικές μοίρες, δηλαδή $\gamma = \frac{m \cdot 360^\circ}{q}$

Συντελεστής Βήματος K_p

Ένας από του σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν το αρμονικό είναι η ύπαρξη πολλαπλών στρώσεων στις αύλακες του πρωτεύοντος. Έτσι ορίζεται ένας νέος συντελεστής, ο συντελεστής βήματος (K_p), ο οποίος εκφράζει τη μείωση του αρμονικού περιεχομένου όταν σε κάθε αύλακα δεν υπάρχει αποκλειστικά τύλιγμα μίας φάσης, δηλαδή το βήμα της μηχανής είναι κλασματικό.

$$k_{p,v} = \cos\left(v \cdot \frac{\pi - p}{2}\right) \quad (3.3)$$

Όπου:

- v η τάξη της αρμονικής
- p το κλασματικό βήμα σε ηλεκτρικές μοίρες

Αξιοσημείωτο είναι ότι για πλήρες βήμα ($p = 180^\circ$) ο συντελεστής βήματος είναι ίσος με τη μονάδα, δηλαδή δεν παρατηρείται μείωση του πλάτους ούτε της θεμελιώδους ούτε κάποιας αρμονικής συνιστώσας.[12]

Συντελεστής Τυλίγματος K_w

Τέλος ο συντελεστής τυλίγματος K_w ορίζεται ως το γινόμενο των συντελεστών πλάτους και βήματος και εκφράζει το τελικό ποσοστό της θεμελιώδους συνιστώσας (και της v -οστής τάξης αρμονικής) της ΜΕΔ.[13]

$$k_{w,v} = k_{b,v} \cdot k_{p,v} \quad (3.4)$$

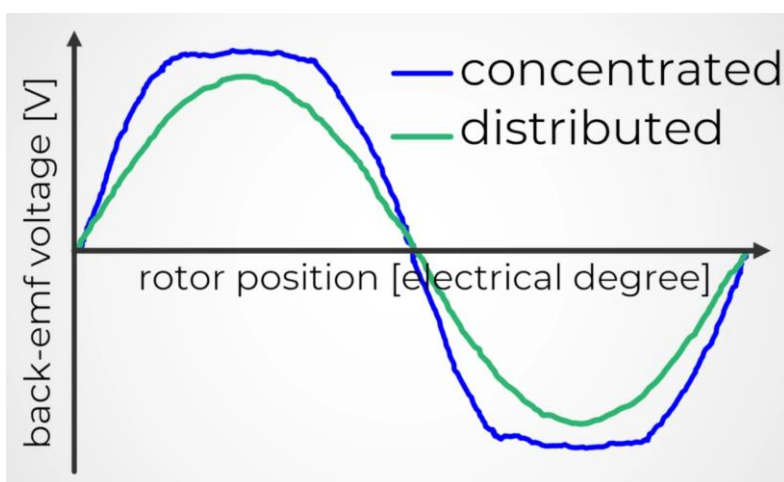
Συγκεντρωμένα Τυλίγματα



Εικόνα 3.14: Συγκεντρωμένα τυλίγματα γραμμικής μηχανής.

Σε μία μηχανή η οποία διαθέτει συγκεντρωμένο τύλιγμα στο πρωτεύον της, κάθε πηνίο τοποθετείται γύρω από ένα μόνο δόντι, εξαλείφοντας την επικάλυψη του τυλίγματος με πηνία άλλων φάσεων στα δύο άκρα του πρωτεύοντος και αποτρέποντας έτσι τον κορεσμό των πόλων. Επιπλέον ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση q ισούται με τη μονάδα με αποτέλεσμα η μηχανή να αποδίδει υψηλότερη μαγνητεγερτική δύναμη (ΜΕΔ) ενώ άλλα πλεονεκτήματα αποτελούν η απλούστερη κατασκευή, ο μεγαλύτερος συντελεστής πληρότητας αύλακος, η χαμηλή δύναμη ευθυγράμμισης (cogging force), η μείωση του μήκους, του βάρους και του κόστους κατασκευής καθώς απαιτείται λιγότερος χαλκός.[14] [15]

Καθώς στο συγκεντρωμένο τύλιγμα, κάθε πηνίο τοποθετείται σε ένα μόνο δόντι, η μαγνητική ροή (και κατ' επέκταση η αντί-ΗΕΔ) έχει μη ημιτονική κατανομή αλλά τραπεζοειδή (Εικόνα 3.15). Αυτό το φαινόμενο παρόλο που επιτρέπει τη παραγωγή υψηλής δύναμης δε συνεπάγεται απαραίτητα υψηλό βαθμό απόδοσης εξαιτίας των αρμονικών που δημιουργούνται (οι οποίες στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν έχουν καθόλου αμελητέο πλάτος). Μερικά ακόμα μειονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι ο υψηλός ακουστικός θόρυβος και οι κραδασμοί, ο χαμηλός συντελεστής τυλίγματος και οι υψηλές απώλειες δινορρευσμάτων ειδικά σε μεγάλες ταχύτητες. [16]



Εικόνα 3.15: Αντί-ΗΕΔ γραμμικής μηχανής για συγκεντρωμένο και καταναμημένο τύλιγμα. [54]

Καταναμημένα Τυλίγματα

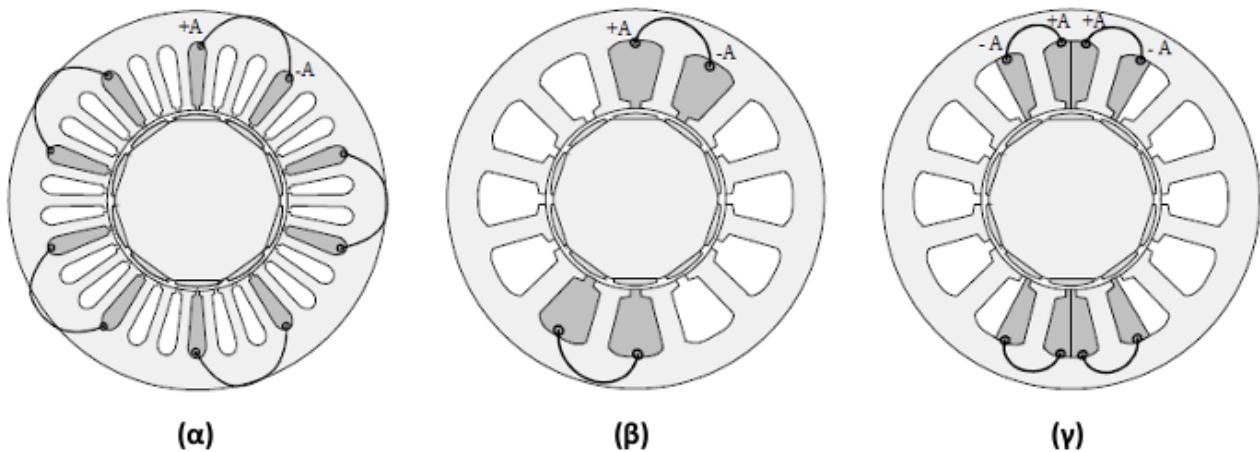


Εικόνα 3.16: Καταναμημένα τυλίγματα γραμμικής μηχανής.

Η χρήση αυτού του είδους των τυλιγμάτων συμβάλει στη παραγωγή μίας πιο ημιτονικής κατανομής της ΜΕΔ και γι' αυτό είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα σε μηχανές μονίμων μαγνητών. Εξαιτίας του μειωμένου αρμονικού τους περιεχομένου εμφανίζουν μειωμένη ταλάντωση δύναμης και μικρότερες απώλειες υστέρησης και δινορρευσμάτων, με αποτέλεσμα αύξηση της απόδοσης. Αυτή η κατανομή του τυλίγματος ωστόσο καθιστά αναπόφευκτη την επικάλυψη των φάσεων στα άκρα του πρωτεύοντος με αποτέλεσμα να απαιτείται περισσότερος χαλκός (και συνεπώς να αυξάνονται οι απώλειες χαλκού) και να αυξάνεται η πολυπλοκότητα κατασκευής, το βάρος και το κόστος της.

Συγκεντρωμένα Τυλίγματα Κλασματικού Βήματος [11] [14]

Μία ειδική υποκατηγορία των συγκεντρωμένων τυλιγμάτων αποτελούν τα συγκεντρωμένα τυλίγματα κλασματικού βήματος (Fractional-Slot Concentrated Winding - FSCW). Και σε αυτή τη διάταξη κάθε πηνίο τοποθετείται γύρω από ένα μόνο δόντι, αυτή τη φορά όμως ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση q είναι κλασματικός και όχι ίσος με τη μονάδα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, σημαντικό παράγοντα για τη διαμόρφωση του τυλίγματος αποτελεί ο αριθμός των στρώσεων. Στα τυλίγματα μονής στρώσης τα πηνία περιβάλλουν τα δόντια εναλλάξ, ενώ στα τυλίγματα διπλής στρώσης τα πηνία περιβάλλουν κάθε δόντι του πρωτεύοντος (Εικόνα 3.17).



Εικόνα 3.17: (α) Κατανεμημένα τυλίγματα μονής στρώσης, (β) Συγκεντρωμένα τυλίγματα μονής στρώσης κλασματικού βήματος, (γ) Συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσης κλασματικού βήματος

Χάρη στις μεγάλες αυτεπαγωγές και μικρές αλληλεπαγωγές που εμφανίζουν τα τυλίγματα μονής στρώσης μπορούν να περιορίσουν το ρεύμα σφάλματος γεγονός που τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές που απαιτείται λειτουργία σταθερής ισχύος σε μεγάλο εύρος στροφών (CPSR).

Τα τυλίγματα διπλής στρώσης έχουν μικρότερο αρμονικό περιεχόμενο και συνεπώς πιο ημιτονοειδή κατανομή της ΜΕΔ και μικρότερες απώλειες δινορρευσμάτων. [10]

Ένα βασικό μειονέκτημα αυτών των τοπολογιών είναι ο περιορισμένος τους αριθμός συνδυασμών πόλων-αυλάκων. Αυτός ο αριθμός όπως αναλύθηκε νωρίτερα καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το συντελεστή πλάτους και κατ' επέκταση το συντελεστή τυλίγματος K_w , ο οποίος με τη σειρά του ρυθμίζει το πλάτος της ΜΕΔ.

3.7 Αγωγοί - Μονώσεις

Αγωγοί ρεύματος είναι τα υλικά που επιτρέπουν την κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων (ελεύθερων ηλεκτρονίων) στο εσωτερικό τους. Είναι κυρίως μέταλλα καθώς αυτά διαθέτουν έναν μεγάλο αριθμό «ελεύθερων» ηλεκτρονίων στην εξωτερική τους στιβάδα, τα οποία δεν είναι δεσμευμένα σε συγκεκριμένα άτομα και μπορούν να κινηθούν σε όλο του τον όγκο. Εξαιτίας του διαφορετικού αριθμού των ελεύθερων

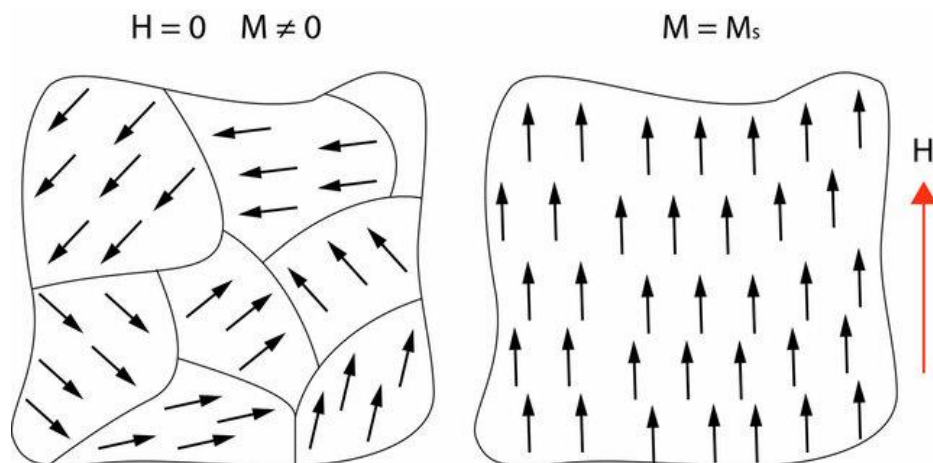
ηλεκτρονίων κάθε υλικό όταν εκτεθεί σε ένα ηλεκτρικό πεδίο αποκτά διαφορετική πυκνότητα ρεύματος. Σε φυσιολογικές συνθήκες, χωρίς δηλαδή την επίδραση κάποιου ηλεκτρικού πεδίου, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται άτακτα και τυχαία, με αποτέλεσμα να μην παρατηρείται μακροσκοπικά καμία μετακίνηση φορτίου. Ωστόσο, όταν ένα υλικό βρεθεί μέσα σε ένα ηλεκτρικό πεδίο, τα ηλεκτρόνια κινούνται προσανατολισμένα, και αυτή η κίνηση ονομάζεται ηλεκτρικό ρεύμα.

Η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος που μπορεί να «αναπτύξει» ένα υλικό εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των ελεύθερων ηλεκτρονίων του καθώς όσο περισσότερα υπάρχουν, τόσο υψηλότερη τιμή μπορεί να πάρει. Τα υλικά ανάλογα με την ικανότητά τους να άγουν ρεύμα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τους αγωγούς και τους μονωτές. Επιπλέον ορίζεται η ειδική αγωγιμότητα γ (σε Siemens ανά μέτρο (S/m)) ως δείκτης για την κατηγοριοποίηση των υλικών, σύμφωνα με τις ηλεκτρικές τους ιδιότητες. Έτσι οι αγωγοί έχουν μεγάλη τιμή ειδικής αγωγιμότητας, συνεπώς επιτρέπουν την ανάπτυξη ηλεκτρικού ρεύματος στο εσωτερικό τους, ενώ οι μονωτές έχουν μικρή τιμή ειδικής αγωγιμότητας, γεγονός που καθιστά δύσκολη την ανάπτυξη ρεύματος.

Από αγωγίμα υλικά (συνήθως χαλκό) είναι κατασκευασμένα τα καλώδια της μηχανής, ενώ μονωτές είναι το κέλυφος της μηχανής και το βερνίκι με το οποίο επικαλύπτονται τα καλώδια ώστε να μην υπάρχουν διαρροές ρεύματος κατά την επικάλυψή τους.

3.8 Σιδηρομαγνητικά Υλικά

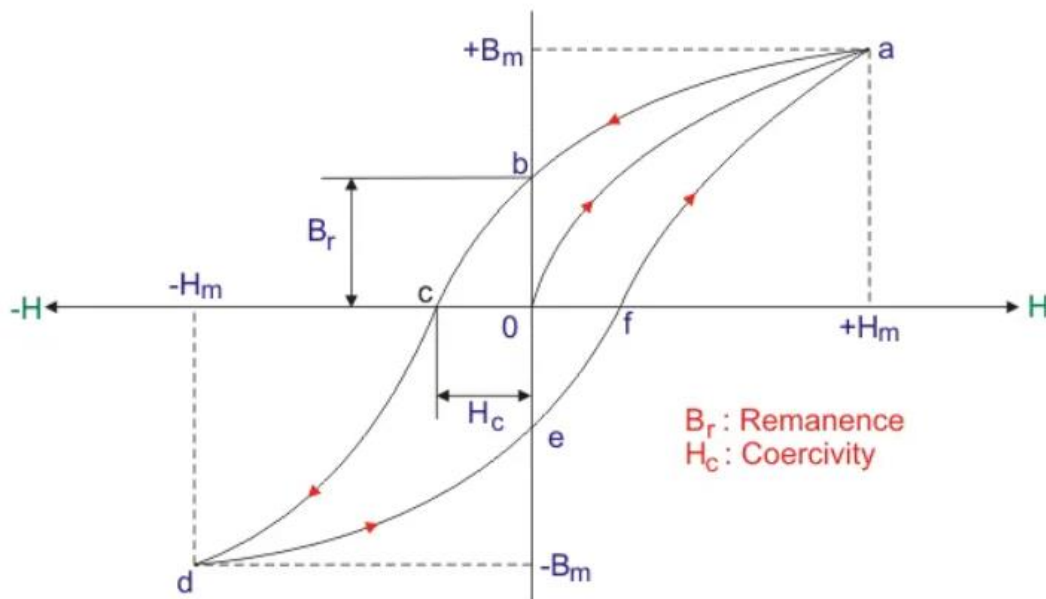
Όπως και οι κυλινδρικές σύγχρονες μηχανές έτσι και οι γραμμικές κατασκευάζονται από σιδηρομαγνητικά υλικά ώστε να ενισχύεται το μαγνητικό πεδίο του πρωτεύοντος και των μόνιμων μαγνητών και να περιορίζονται οι απώλειες εξαιτίας των δινορευμάτων («Eddy Currents») και της υστέρησης. Η ιδιαιτερότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών έναντι άλλων έγκειται στην ύπαρξη μικρών μαγνητικών δομών (« magnetic domains») τα οποία λειτουργούν ως μικροσκοπικά μαγνητικά δίπολα όπως φαίνεται στην εικόνα 3.18.



Εικόνα 3.18: Αριστερά φαίνονται οι τυχαίες μαγνητικές δομές του σιδηρομαγνητικού υλικού πριν την επιβολή ενός εξωτερικού πεδίου έντασης H και δεξιά πως γίνεται η ευθυγράμμισή τους

Εξαιτίας των τυχαίων κατευθύνσεων και της μικροσκοπικής διάστασης κάθε μαγνητικού διπόλου το υλικό από μόνο του δεν εμφανίζει μαγνητικές ιδιότητες. Η επιβολή όμως ενός εξωτερικού μαγνητικού πεδίου H προκαλεί την ευθυγράμμιση αυτών των διπλών στην κατεύθυνση του εν λόγω πεδίου με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας μαγνητικής επαγωγής B . Μάλιστα αν η μαγνητική επαγωγή του υλικού ξεπεράσει κάποια τιμή τότε το υλικό δεν «χάνει» τη μαγνήτισή του ακόμα και μετά την απομάκρυνση του εξωτερικού πεδίου H . Επίσης αν ευθυγραμμιστεί ικανός αριθμός τέτοιων περιοχών το υλικό εμφανίζει αντίσταση στη δημιουργία μαγνητικής επαγωγής B , επέρχεται δηλαδή μαγνητικός κορεσμός.

Τα παραπάνω περιγράφονται σε ικανό βαθμό σε ένα διάγραμμα B-H, το οποίο αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως καμπύλη μαγνήτισης ή βρόγχος υστέρησης.



Εικόνα 3.19: Εδώ παρουσιάζεται ένας ενδεικτικός βρόγχος υστέρησης ο οποίος θα αναλυθεί παρακάτω. [55]

Ένας ενδεικτικός βρόγχος υστέρησης φαίνεται στην εικόνα 3.19. Υποθέτουμε ότι αρχικά το σιδηρομαγνητικό υλικό είναι αμαγνήτιστο ($B=0$) και εκτός οποιουδήποτε εξωτερικού μαγνητικού πεδίου ($H=0$).

Καθώς αυξάνεται σταδιακά η ένταση του μαγνητικού πεδίου H οι μαγνητικές δομές του υλικού ευθυγραμμίζονται με αποτέλεσμα την αύξηση της μαγνητικής επαγωγής B έως το σημείο a όπου και επέρχεται κορεσμός. Από εκείνο το σημείο και έπειτα όσο και να αυξηθεί το μαγνητικό πεδίο πέραν της τιμής του H_m το υλικό συμπεριφέρεται ως μη μαγνητικό.

Όταν μειωθεί η ένταση του εξωτερικού πεδίου σε τιμές μικρότερες από το H_m η μαγνητική επαγωγή B ακολουθεί τη καμπύλη ab . Παρατηρούμε ότι δεν μηδενίζεται με τον μηδενισμό του εξωτερικού πεδίου αλλά παίρνει τη τιμή B_r , η οποία ονομάζεται παραμένουσα μαγνήτιση (Remanence), και προέρχεται από ορισμένες περιοχές οι οποίες παραμένουν ευθυγραμμισμένες.

Με την αύξηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου προς την αντίθετη κατεύθυνση η μαγνητική επαγωγή ακολουθεί τη καμπύλη bc και μηδενίζεται για ένταση H_c , η οποία ονομάζεται απομαγνητίζουσα δύναμη (Coercivity).

Με περαιτέρω αύξηση της έντασης του πεδίου προς την ίδια κατεύθυνση η επαγωγή ακολουθεί τη καμπύλη cd έως ότου παρατηρηθεί εκ νέου το φαινόμενο του κορεσμού στις τιμές H_m και B_m .

Παρατηρούμε ότι η καμπύλη είναι συμμετρική δηλαδή το φαινόμενο ακολουθεί αντίστοιχη πορεία για την αντίθετη διαδικασία ολοκληρώνοντας έτσι τον μέγιστο βρόγχο μαγνητικής υστέρησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχουν σημεία λειτουργίας του υλικού εκτός αυτού του βρόγχου.

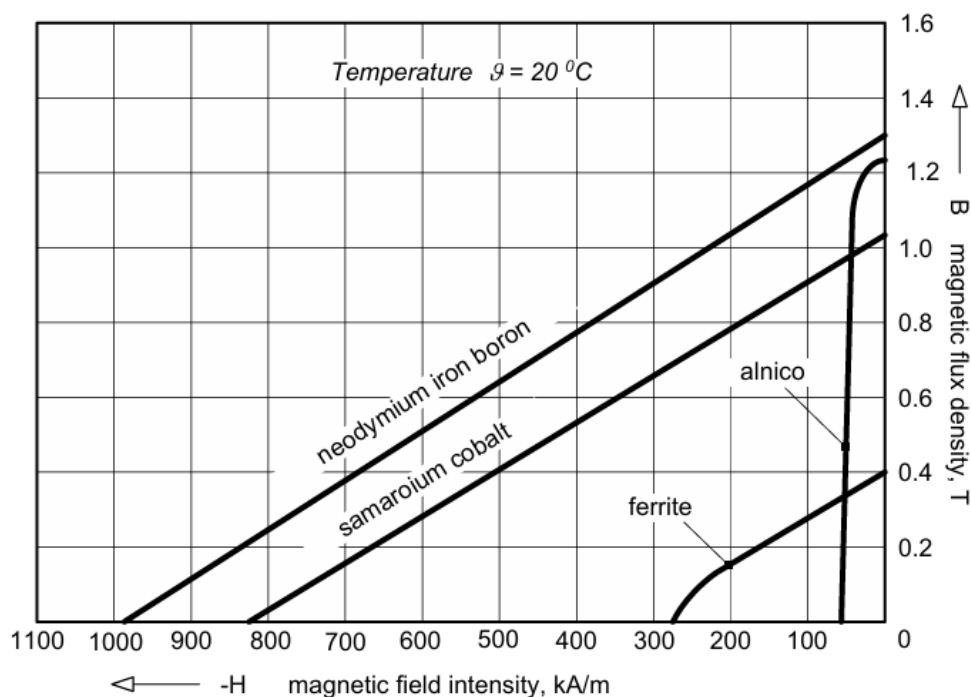
Ανάλογα με την ικανότητά τους να διατηρούν τη παραμένουσα μαγνήτισή τους και με την ενέργεια που χρειάζεται να δαπανηθεί για τη δημιουργία μιας καμπύλης B-H (η οποία ισούται με το εμβαδόν του βρόγχου) τα σιδηρομαγνητικά υλικά χωρίζονται σε σκληρά και μαλακά.

Μαλακά Σιδηρομαγνητικά Υλικά:

Τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν μεγάλη μαγνητική διαπερατότητα, συνεπώς μικρότερο βρόγχο υστέρησης, και έτσι μπορούν να απομαγνητιστούν και να μαγνητιστούν ευκολότερα με τη δαπάνη μικρότερων ποσών ενέργειας. Συνήθως χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση προϋπαρχόντων μαγνητικών πεδίων.

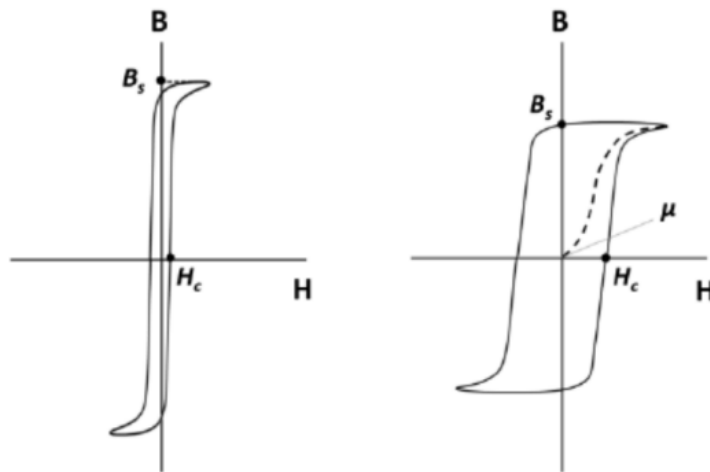
Σκληρά Σιδηρομαγνητικά Υλικά:

Στα σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά ανήκουν οι μόνιμοι μαγνήτες. Αυτά τα υλικά έχουν μεγάλο βρόγχο υστέρησης και επομένως απαιτείται μεγάλο ποσό ενέργειας για να μαγνητιστούν ή να απομαγνητιστούν. Οι μόνιμοι μαγνήτες χρησιμοποιούνται πλέον όλο και περισσότερο αντί για ηλεκτρομαγνήτες, επειδή κατά τη λειτουργία της μηχανής έχουν πολύ μικρές ενεργειακές απώλειες. Βασικό κριτήριο για την επιλογή τους στην εκάστοτε εφαρμογή είναι η παραμένουσα μαγνήτιση, καθώς η υψηλή τιμή της αυξάνει τις επιδόσεις της μηχανής και την πυκνότητα ισχύος, καθώς και η αντοχή που διαθέτουν να μην χάνουν τη μαγνήτιση τους σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας ή λόγω επιβολής κάποιου δυνατού εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Για αυτούς τους λόγους κατά την αξιολόγηση ενός μόνιμου μαγνήτη απαιτείται κυρίως η εξέταση του δευτέρου τεταρτημορίου του βρόγχου υστέρησης του.



Εικόνα 3.20: Καμπύλες B-H για διάφορους μόνιμους μαγνήτες σε θερμοκρασία 20°C [1]

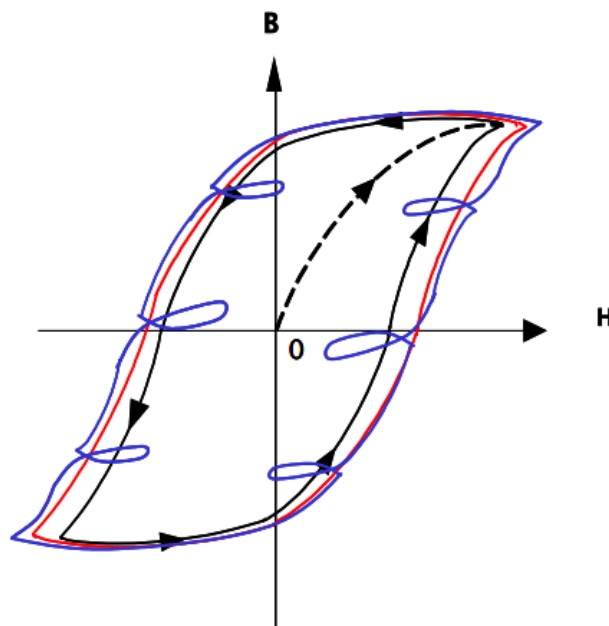
Οι διαφορές ανάμεσα σε σκληρά και μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά γίνονται ευκολότερα κατανοητές μέσα από τη μελέτη των βρόγχων υστέρησης τους.



Εικόνα 3.21: Στη παραπάνω εικόνα φαίνονται δύο βρόγχο υστέρησης, ο αριστερά (και πιο «λεπτός») αντιστοιχεί σε μαλακό ενώ ο δεξιά σε σκληρό σιδηρομαγνητικό υλικό[17]

Είναι ευδιάκριτο ότι ένα μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό έχει βρόγχο υστέρησης «λεπτό» και «επιμήκη» δηλαδή χρειάζεται μικρή εξωτερική δύναμη για να απομαγνητιστεί (χαμηλό H_c), έχει υψηλή μαγνητική ευαισθησία (υψηλό μ_{max}) και μπορεί να φτάσει σε υψηλό επίπεδο κορεσμού μαγνήτισης (B_s). Αντίθετα ένα σκληρό σιδηρομαγνητικό υλικό δεν απομαγνητίζεται εύκολα, οπότε διατηρεί την αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια για μεγάλο χρονικό διάστημα – εκτός αν επέμβει εξωτερική δύναμη.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραπάνω ανάλυση προκύπτει αγνοώντας τόσο τις απώλειες οι οποίες θα προέκυπταν εξαιτίας των δινορευμάτων όσο και τα φαινόμενα των ανώτερων αρμονικών συνιστωσών. Μελετήσαμε δηλαδή τον στατικό βρόγχο υστέρησης και αγνοήσαμε και τα δύο δυναμικά κομμάτια του τα οποία φαίνονται στην εικόνα 3.22.



Εικόνα 3.22: Με μαύρο χρώμα απεικονίζεται ο στατικός βρόγχος υστέρησης που μελετήσαμε νωρίτερα σε αυτό το κεφάλαιο, με κόκκινο χρώμα ο δυναμικός βρόγχος υστέρησης αν ληφθούν υπόψη τα δινορεύματα και με μπλε χρώμα ο δυναμικός βρόγχος υστέρησης με ανώτερες αρμονικές συνιστώσες. Η εικόνα προέρχεται από τη διδακτορική διατριβή του κ. Παναγιώτη Ροβολή [18]

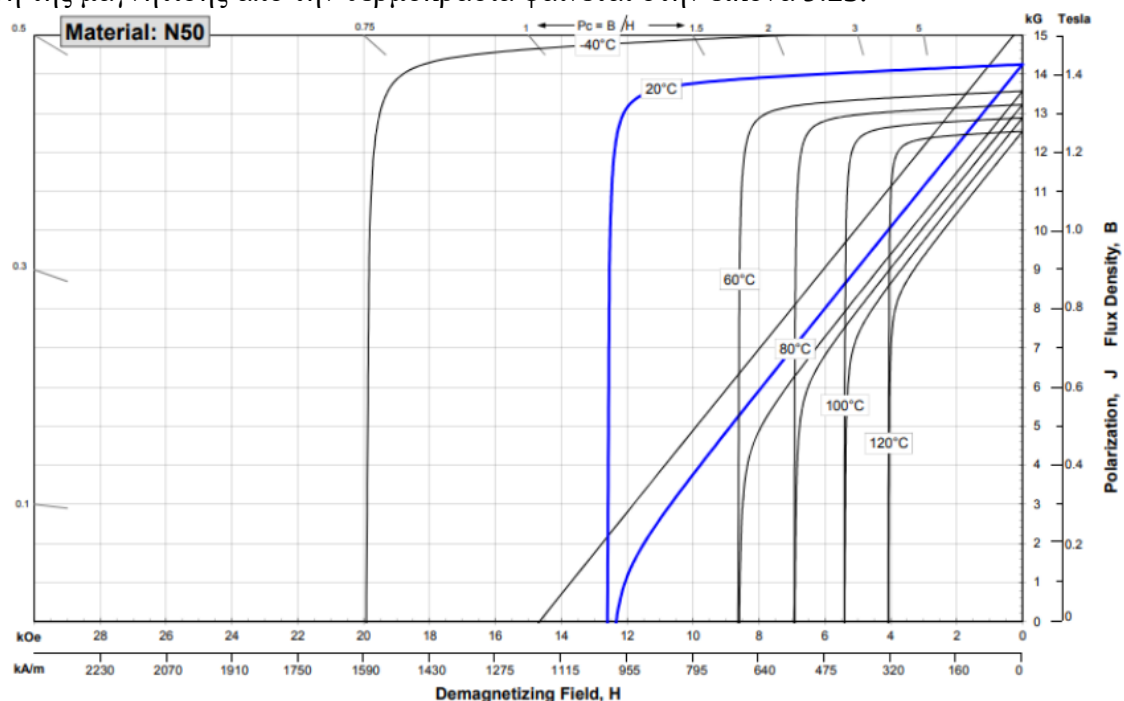
Είναι εμφανές ότι αν ληφθούν υπόψη τα δινορεύματα (τα οποία εμφανίζονται υπό μορφή θερμότητας και αντιτίθενται στην μεταβολή του μαγνητικού πεδίου) το εμβαδόν του βρόγχου αυξάνεται και συνεπώς αυξάνονται και οι απώλειες.

Απομαγνήτιση Μόνιμων Μαγνητών:

Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των μηχανών με μόνιμους μαγνήτες (εκτός από τις πρόσθετες απώλειες δινορρευσμάτων οι οποίες θα αναληθούν στο κεφάλαιο ...) είναι ο κίνδυνος απομαγνήτισης, είτε μερικής είτε πλήρους. Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο, καθώς επηρεάζει την προβλεπόμενη απόδοση του κινητήρα. Οι κυριότεροι μηχανισμοί με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί είναι η έκθεση των μαγνητών σε ισχυρό πεδίο απομαγνήτισης και η αύξηση της θερμοκρασίας. Η δεύτερη περίπτωση κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική καθώς κατά τη λειτουργία του κινητήρα η αύξηση της θερμοκρασίας του είναι αναπόφευκτη και γι' αυτό είναι εξαιρετικά σημαντική η ύπαρξη ενός κατάλληλου μηχανισμού ψύξης.

Η απομαγνήτιση οδηγεί σε μείωση του μαγνητικού πεδίου του δρομέα, με αποτέλεσμα να απαιτείται ενίσχυση του πεδίου του στάτη για να διατηρηθεί η επιθυμητή απόδοση. Η ενίσχυση αυτή επιτυγχάνεται μέσω αύξησης του ρεύματος στα τυλίγματα, κάτι που συνεπάγεται επιπλέον ενεργειακές απώλειες και αύξηση της μέσης θερμοκρασίας λειτουργίας του κινητήρα, γεγονός που οδηγεί σε περαιτέρω απομαγνήτιση. Συνεπώς η μερική απομαγνήτιση μπορεί σταδιακά να εξελιχθεί σε πλήρη απομαγνήτιση, οδηγώντας τελικά σε αναγκαστική και δαπανηρή αντικατάσταση του δρομέα.

Η εξάρτηση της μαγνήτισης από την θερμοκρασία φαίνεται στην εικόνα 3.23.



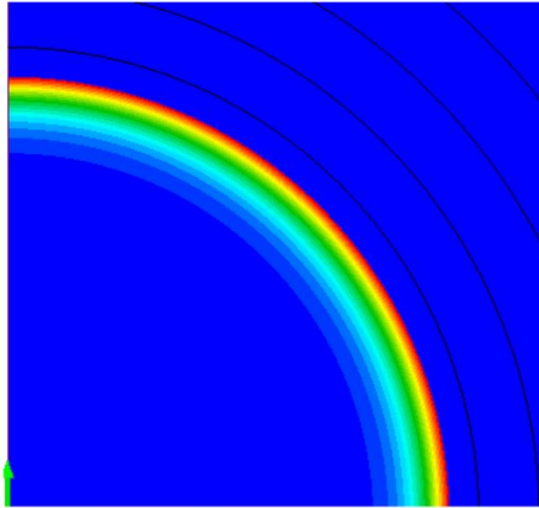
Εικόνα 3.23: Το δεύτερο τεταρτημόριο ενός βρόγχου υστέρησης για το μαγνήτη Νεοδημίου (NdFeB) N50 στο οποίο αποτυπώνεται και η εξάρτηση της μαγνήτισης του από τη θερμοκρασία. [56]

3.9 Υλικά Άξονα και Κελύφους

Εκτός από τα σιδηρομαγνητικά υλικά απαραίτητα είναι και τα υλικά για την υποστήριξη της μηχανής. Αυτά σκοπό έχουν χωρίς να επηρεάζουν το μαγνητικό πεδίο να υποστηρίξουν μηχανικά τις κινήσεις της μηχανής και να είναι ανθεκτικά σε μηχανικά φορτία και μηχανικές ταλαντώσεις. Σε αυτή τη κατηγορία ανήκουν υλικά όπως carbon steel, cast iron, πλαστικό και γενικότερα μη σιδηρομαγνητικά μέταλλα. Αξίζει να σημειωθεί ότι μηχανή που απασχολεί την παρούσα εργασία δε διαθέτει κέλυφος ενώ για τη στήριξή της αξιοποιήθηκαν μία αλουμινένια βάση και κολώνες (περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της μηχανής στο κεφάλαιο ...).

3.10 Επιδερμικό Φαινόμενο και Φαινόμενο Γειτνίασης (Skin and Proximity Effects)

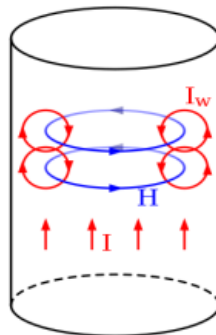
Το επιδερμικό φαινόμενο (skin effect) αποτελεί φαινόμενο που παρατηρείται σε αγωγούς οι οποίοι διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) ή εκτίθενται σε μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία, οδηγώντας σε μη ομοιόμορφη κατανομή του ηλεκτρικού ρεύματος κατά την εγκάρσια διατομή του αγωγού. Το φαινόμενο αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη συγκέντρωση του ρεύματος κοντά στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού και τη σταδιακή μείωση της πυκνότητας καθώς προσεγγίζεται το κέντρο όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.24.



Εικόνα 3.24: Ένα τεταρτημόριο μιας κάθετης διατομής ενός κυλινδρικού καλωδίου το οποίο διαρρέεται από AC ρεύμα υψηλής συχνότητας. Διακρίνεται ότι η πυκνότητα του ρεύματος αυξάνεται όσο απομακρύνεται από το κέντρο του αγωγού και μεγιστοποιείται στο εξωτερικό του (κόκκινο χρώμα)[19]

Στο εσωτερικό ενός κυλινδρικού αγωγού που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα I δημιουργείται ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο H , το οποίο λόγω αυτεπαγωγής του αγωγού επάγει στο εσωτερικό του ρεύματα I_w . Η αύξηση της έντασης του ρεύματος I συνεπάγεται αντίστοιχη ενίσχυση του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου H .

Σύμφωνα με τον νόμο της επαγωγής (νόμος του Faraday και νόμος του Lenz), τα επαγόμενα ρεύματα I_w έχουν τέτοια κατεύθυνση ώστε να αντιστέκονται στη μεταβολή που τα προκάλεσε, δηλαδή στη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου H όπως φαίνεται στην εικόνα 3.25. Συνεπώς, εντός του δακτυλίου (προς το εσωτερικό), τα επαγόμενα ρεύματα αντιτίθενται στο αρχικό ρεύμα I , ενώ εκτός του δακτυλίου συντάσσονται με αυτό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το συνολικό ρεύμα να μην κατανέμεται ομοιόμορφα στη διατομή του αγωγού και κατ' επέκταση η πυκνότητα ρεύματος να είναι μεγαλύτερη κοντά στην εξωτερική επιφάνεια.



Εικόνα 3.25: Επιδερμικό φαινόμενο σε αγωγό ο οποίος διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα I

Η παράμετρος που χρησιμοποιείται για τη σύγκριση της συμπεριφοράς δύο υλικών ονομάζεται βάθος επιδερμίδας ή skin depth. Καθώς μετακινούμαστε από την εξωτερική επιφάνεια του αγωγού, όπου η πυκνότητα του ρεύματος είναι μέγιστη, προς το εσωτερικό του, η πυκνότητα μειώνεται εκθετικά. Το βάθος επιδερμίδας ορίζεται ως η απόσταση από την επιφάνεια του αγωγού στην οποία η πυκνότητα του ρεύματος φτάνει το 37% (δηλαδή το $1/e$) της αρχικής μέγιστης τιμής. Η τιμή αυτή υπολογίζεται με την εξίσωση:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}}$$

όπου:

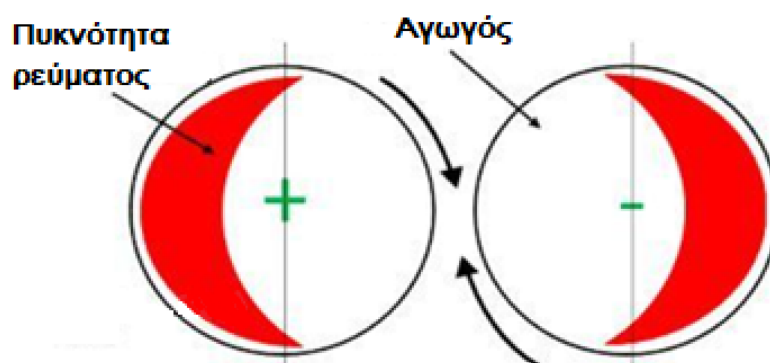
- ω είναι η γωνιακή συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος (s^{-1})
- μ η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού (H/m)
- γ η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού (S/m).

Το επιδερμικό φαινόμενο σε εναλλασσόμενα κυκλώματα μόνιμης κατάστασης περιορίζει τη βέλτιστη διαστασιολόγηση ενός αγωγού, ανάλογα με τις φυσικές ιδιότητες του υλικού και τη συχνότητα λειτουργίας. Ιδιαίτερα για τις συχνότητες ισχύος (50/60 Hz), έχει αποδειχθεί ότι η χρήση κυλινδρικών αγωγών με διάμετρο άνω των 10 mm δεν αυξάνει ουσιαστικά τη ικανότητα αγωγής ρεύματος, οδηγώντας σε περιττή κατανάλωση χαλκού.[19]

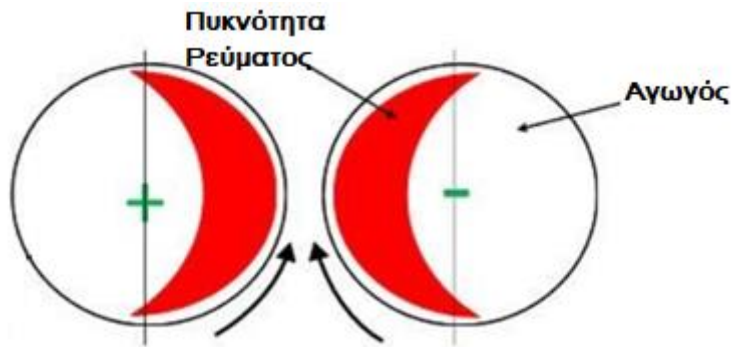
Ο αγωγός επιδεικνύει αντίστοιχη συμπεριφορά και όταν βρεθεί σε μεταβαλλόμενο πεδίο που οφείλεται σε κάποιον γειτονικό αγωγό. Πιο συγκεκριμένα όταν δύο παράλληλοι αγωγοί διαρρέονται από ρεύματα ίδιας κατεύθυνσης, τα επαγόμενα ρεύματα που δημιουργούνται στον πρώτο λόγω του μαγνητικού πεδίου του δεύτερου είναι τέτοια, ώστε η πυκνότητα ρεύματος είναι μέγιστη στα σημεία των αγωγών που βρίσκονται πιο μακριά μεταξύ τους (Εικόνα 3.26).

Αντίθετα, όταν δύο παράλληλοι αγωγοί διαρρέονται από ρεύματα αντίθετης κατεύθυνσης, η πυκνότητα του ρεύματος αυξάνεται στις περιοχές των αγωγών που βρίσκονται πιο κοντά μεταξύ τους (Εικόνα 3.27).

Και στις δύο περιπτώσεις, η αντίσταση κάθε αγωγού αυξάνεται, επειδή το μαγνητικό του πεδίο επάγει ρεύματα στον γειτονικό αγωγό, τα οποία προκαλούν απώλειες ισχύος, και αυτή η ενέργεια καλύπτεται από τον αρχικό αγωγό που παράγει το μαγνητικό πεδίο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο γειτνίασης. [20]



Εικόνα 3.26: Πυκνότητα ρεύματος σε μια εγκάρσια διατομή δύο αγωγών όταν αυτοί διαρρέονται από ρεύματα ίδιας κατεύθυνσης.



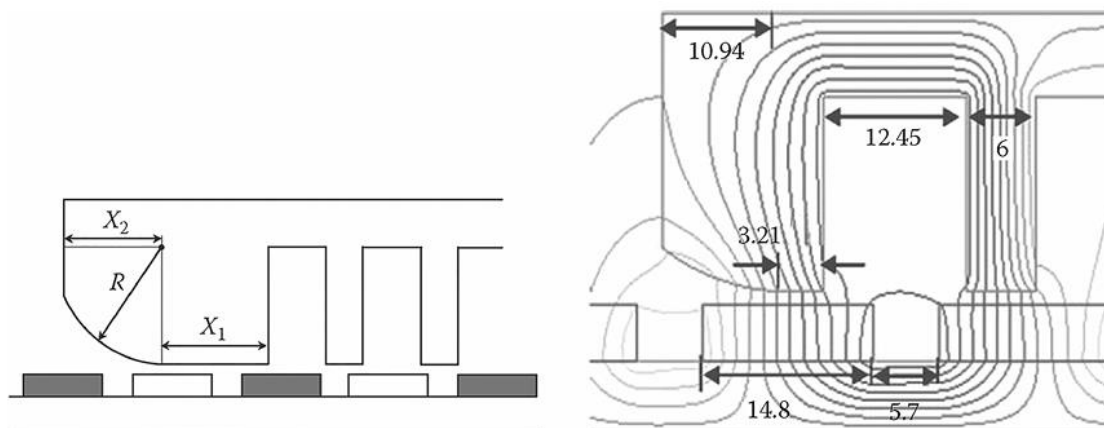
Εικόνα 3.27: Πυκνότητα ρεύματος σε μια εγκάρσια διατομή δύο αγωγών όταν αυτοί διαρρέονται από ρεύματα αντίθετης κατεύθυνσης.

3.11 Longitudinal End Effect και Cogging Force

Το longitudinal end effect σε μία γραμμική μηχανή αναφέρεται στη μεταβολή της μαγνητικής συμπεριφοράς και της παράγωγης ώσης (thrust) κοντά στα άκρα του πρωτεύοντος (στάτη) ή του δευτερεύοντος (δρομέα), σε αντίθεση με το κεντρικό τμήμα. Αυτό οφείλεται στο πεπερασμένο μήκος του εκάστοτε τμήματος με συνέπεια:

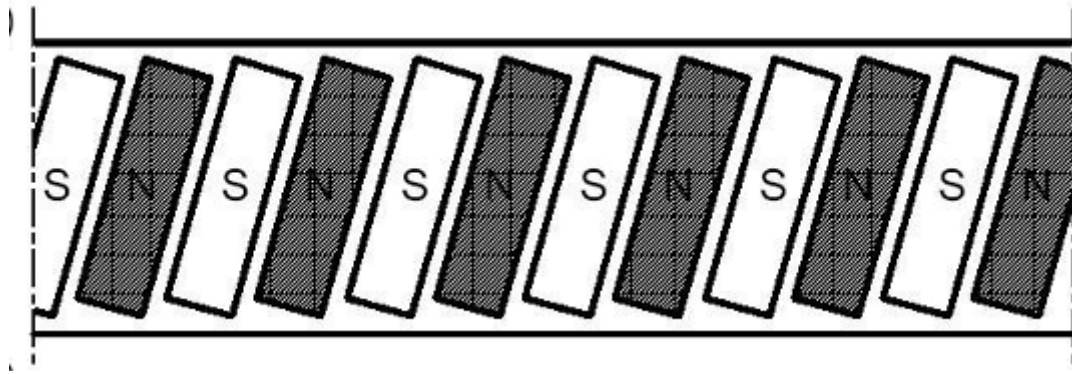
- Η κατανομή του μαγνητικού πεδίου κατά το μήκος της μηχανής να μην είναι ομοιόμορφη.
- Στην αρχή και στο τέλος του δευτερεύοντος, οι δυνάμεις οδηγούν σε μειωμένη ώση, αυξημένες απώλειες από επαγόμενα ρεύματα, και ασυμφωνία ανάμεσα στους φάσεις του στάτη.
- Αυτό το αποτέλεσμα είναι ιδιαίτερα εμφανές σε σύντομης διαδρομής γραμμικές μηχανές και επηρεάζει την απόδοση και ομαλότητα της κίνησης.

Ένας τρόπος να μειωθούν οι δυνάμεις που ασκούνται στα άκρα της μηχανής (drag force) είναι το «λοξό» κόψιμο και η διεύρυνση του ακριανού δοντιού του πρωτεύοντος όπως φαίνεται στην εικόνα 3.28.



Εικόνα 3.28: Διευρυμένο και «λοξό» κομμένο δόντι του πρωτεύοντος για τη μείωση του longitudinal end effect [1]

Έκτος όμως από το longitudinal end effect σε μία γραμμική μηχανή σημαντική κρίνεται και η αντιμετώπιση της δύναμης ευθυγράμμισης (cogging force). Εξαιτίας των δοντιών του πρωτεύοντος, το δευτερεύον τείνει να ευθυγραμμίζεται σε συγκεκριμένες θέσεις με αποτέλεσμα να απαιτείται η άσκηση μεγαλύτερης δύναμης για τη συνέχιση της γραμμικής κίνησης. Αυτή η δύναμη ονομάζεται cogging force και έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ομαλότητας της κίνησης. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα οι μαγνήτες του δευτερεύοντος συχνά τοποθετούνται «λοξά» γεγονός που προκαλεί μείωση των απότομων μεταβολών της μαγνητικής έλξης ανάμεσα σε πρωτεύον και δευτερεύον.

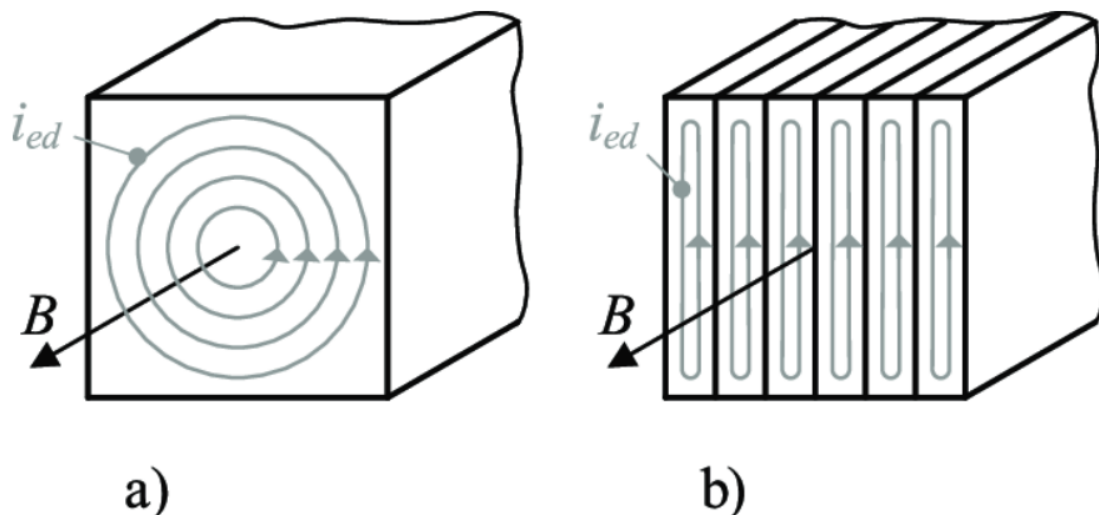


Εικόνα 3.29: «Λοξή» τοποθέτηση μαγνητών στο δευτερεύον μιας γραμμικής μηχανής [1]

3.12 Δινορρεύματα

Το φαινόμενο των δινορρευμάτων προκαλείται από την παρουσία ενός αγωγού ή ενός σιδηρομαγνητικού υλικού (ειδικά μαλακού καθώς εμφανίζουν αγωγίμες ιδιότητες) εντός ενός μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Σύμφωνα με τον νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής του Faraday, κάθε μεταβολή της μαγνητικής ροής που διαπερνά μια αγωγίμη επιφάνεια προκαλεί την ανάπτυξη μιας ηλεκτρεγερτικής δύναμης (ΗΕΔ) σε αυτήν την επιφάνεια. Η επαγόμενη αυτή ΗΕΔ ωθεί τα ελεύθερα του ηλεκτρόνια σε προσανατολισμένη κίνηση «παράγοντας» ηλεκτρικά ρεύματα που ρέουν σε κλειστούς βρόγχους (ή δίνες), κάθετα στο επίπεδο της κατεύθυνσης της μαγνητικής ροής σε μια προσπάθεια να διατηρήσουν σταθερό το μαγνητικό πεδίο που έχει αναπτυχθεί στο υλικό (όπως υπαγορεύει ο νόμος του Lenz). Τα ρεύματα αυτά ονομάζονται δινορρεύματα ή eddy currents και αποτελούν μία σημαντική πηγή θερμικών απωλειών στον πυρήνα της μηχανής. [21]

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού, αφού οι απώλειες των δινορρευμάτων εξαρτώνται από το πάχος της λαμαρίνας και από τη συχνότητα, η μαγνητική λαμαρίνα του πυρήνα δεν αποτελείται από ολόσωμο, συμπαγή σίδηρο αλλά από πολύ λεπτά ελάσματα τα οποία είναι μονωμένα μεταξύ τους (συνήθως με ρητίνη). [22]



Εικόνα 3.30: Ο «τεμαχισμός» του σιδηρομαγνητικού υλικού για τον περιορισμό των απωλειών δινορρευμάτων. [57]

3.13 Μοντέλα Απωλειών

Οι απώλειες μιας μηχανής καθορίζουν τον βαθμό απόδοσής της, ο οποίος αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς δείκτες κατά την αξιολόγηση της. Γι' αυτό κρίνεται αποφασιστικής σημασίας η εύρεση κατάλληλων αναλυτικών μεθόδων ώστε αυτές να υπολογίζονται με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια, εντός φυσικά ενός εύλογου υπολογιστικού χρόνου. Ειδικά στις ηλεκτρικές μηχανές μονίμων μαγνητών όπου ο βαθμός απόδοσης συχνά ξεπερνά το 90% ο προσδιορισμός των απωλειών απαιτεί εξαιρετικά υψηλή ακρίβεια και μελέτη πολλών φαινομένων. Παραδοσιακά οι απώλειες μιας μηχανής χωρίζονταν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις απώλειες πυρήνα και τις απώλειες χαλκού. Με την εξέλιξη όμως τόσο των μηχανών όσο και των υπολογιστικών μοντέλων πλέον μια ικανοποιητική ανάλυση περιλαμβάνει ακόμα απώλειες λόγω εγγύτητας, επιδερμικού φαινομένου και μονίμων μαγνητών. [23]

3.13.1 Απώλειες Πυρήνα

Για την εκτίμηση των απωλειών πυρήνα έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι, με κάποιες να ενσωματώνουν τα φαινόμενα απωλειών (δινωρεύματα, υστέρηση, πρόσθετες απώλειες) απευθείας στη μαγνητική χαρακτηριστική B-H ενός χρονικά μεταβαλλόμενου μοντέλου. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την άμεση παρατήρηση των επιδράσεων των απωλειών στην τάση και στο ρεύμα στους ακροδέκτες της μηχανής, αλλά η υλοποίηση και η προσομοίωση ενός τέτοιου μοντέλου μπορεί να είναι ιδιαίτερα απαιτητική. Γι' αυτό τον λόγο οι πιο συνηθισμένες προσεγγίσεις στηρίζονται σε εμπειρικούς τύπους και σταθερές, οι οποίες όμως δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται αλόγιστα καθώς με τη σειρά τους βασίζονται σε συγκεκριμένους παράγοντες και παραδοχές η άγνοια των οποίων μπορεί να οδηγήσει το μοντέλο σε «κατάρρευση».

Μοντέλο Steinmetz

Ο Steinmetz εισήγαγε το 1892 μία εμπειρική προσέγγιση για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα, στην οποία στηρίχτηκαν και διάφορα άλλα μεταγενέστερα μοντέλα. Ωστόσο ένα βασικότατο μειονέκτημά της είναι ότι παύει να ισχύει σε περιπτώσεις μη ημιτονοειδούς κατανομής του πεδίου. [24]

Σε αυτό το μοντέλο οι απώλειες δίνονται από τη σχέση:

$$P_{fe} = k_{SE} \cdot f^{\alpha} \cdot \hat{B}^{\beta} \quad (3.5)$$

Όπου:

- P_{fe} οι απώλειες του πυρήνα (W/kg)
- f η συχνότητα
- $\hat{B}$ το μέγιστο της μαγνητικής επαγωγής
- Οι συντελεστές k_{SE} , α , β υπολογίζονται μέσω προσαρμογής της καμπύλης των πειραματικών μετρήσεων που λαμβάνονται υπό ημιτονοειδή διέγερση

Για την αντιμετώπιση του βασικού μειονεκτήματος της 3.5 και τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα για μη ημιτονοειδή κατανομή πεδίου αναπτύχθηκε η τροποποιημένη εξίσωση Steinmetz (Modified Steinmetz Equation – MSE) η οποία γράφεται:

$$P_{fe} = k_{SE} \cdot f_{eq}^{\alpha-1} \cdot \hat{B}^{\beta} \cdot f \quad (3.6)$$

Όπου f_{eq} μια ισοδύναμη συχνότητα που εξαρτάται από τη συχνότητα μαγνήτισης και απομαγνήτισης του υλικού. Η εξάρτηση αυτή φαίνεται στη σχέση:

$$f_{eq} = \frac{2}{\Delta B^2 \cdot \pi^2} \cdot \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt$$

Όπου: ΔB το πλάτος μεταξύ δύο μεγίστων της μαγνητικής επαγωγής.

Ένα βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι πως σε περίπτωση μικρής θεμελιώδους συχνότητας της κυματομορφής εμφανίζει μειωμένη ακρίβεια.

Τέλος ένα ακόμα μοντέλο που βασίζεται στην μέθοδο Steinmetz είναι η γενικευμένη εξίσωση Steinmetz (Generalized Steinmetz Equation – GSE) η οποία αν και βελτιώνει την ακρίβεια της 3.6, σε περίπτωση που κάποια αρμονική συνιστώσα κοντά στη θεμελιώδη έχει υψηλή τιμή δεν εμφανίζει αποδεκτά αποτελέσματα. Η εξίσωσή της είναι:

$$P_{fe} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T k_{GSE} \cdot \left| \frac{dB}{dt} \right|^\alpha \cdot |B(t)|^{\beta-\alpha} dt$$

Γενικά οι διάφορες παραλλαγές της εξίσωσης Steinmetz προσφέρουν έναν απλό και γρήγορο τρόπο υπολογισμού των απωλειών πυρήνα. Οι απαραίτητοι συντελεστές μπορούν να ληφθούν εύκολα. Ωστόσο, οι μέθοδοι αυτές παρουσιάζουν περιορισμούς, ιδιαίτερα όταν η μαγνητική διέγερση περιλαμβάνει κυματομορφές με έντονο αρμονικό περιεχόμενο. Επιπλέον, σε χαμηλές θεμελιώδεις συχνότητες, όπου κυριαρχεί η υστέρηση μπορούν να προκύψουν σημαντικές αποκλίσεις στην εκτίμηση των απωλειών. [25]

Μοντέλο Διαχωρισμού Απωλειών (Jordan)

Από την πρώτη διατύπωση του από τον Steinmetz το μοντέλο των απωλειών σε φερρομαγνητικά υλικά έχει αλλάξει και εξελιχθεί αρκετά. Μία από τις σημαντικότερες καινοτομίες εισήχθη από τον Jordan ο οποίος πρώτος πρότεινε τον διαχωρισμό των απωλειών σε απώλειες υστέρησης και δινορρευσμάτων. [26] Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο οι απώλειες πυρήνα υπολογίζονται από τη σχέση:

$$P_{fe} = P_h + P_e = k_h \cdot f \cdot \hat{B}^2 + k_e \cdot f^2 \cdot \hat{B}^2 \quad (3.7)$$

Από την εξίσωση 3.7 προκύπτει πως και οι δύο συνιστώσες είναι ανάλογες του τετραγώνου του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής. Επιπλέον οι απώλειες υστέρησης εξαρτώνται από τη συχνότητα ενώ οι απώλειες δινορρευσμάτων από το τετράγωνο της. Τέλος οι συντελεστές k_h και k_e προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα μέσω curve fitting.

Πολλά ακόμα μοντέλα βασίστηκαν στις παραδοχές που έκανε ο Jordan προτείνοντας νέους διορθωτικούς συντελεστές (όπως οι Pry και Bean [27]) ή νέες συνιστώσες απωλειών (όπως ο Bertotti που εισήγαγε τις απώλειες λόγω ανώμαλης κατανομής δινορρευσμάτων [28]), τα οποία όμως δε θα αναλυθούν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, καθώς για τον υπολογισμό των απωλειών στο κεφάλαιο 4.5.13 θα χρησιμοποιηθεί το «παραδοσιακό» μοντέλο Jordan με βάση τη μεθοδολογία που προτείνεται στο [23].

Πιο συγκεκριμένα, η μαγνητική ροή σε συνάρτηση με το χρόνο, όπως προβλέπεται από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, δεν θα είναι ημιτονοειδής, καθώς το FEMM λαμβάνει υπόψη την επίδραση της γεωμετρίας της μηχανής όσο ο δρομέας κινείται σε σχέση με τον στάτη. Παρόλο που οι ιδιότητες του σιδήρου δεν είναι γραμμικές, μια ευρέως χρησιμοποιούμενη προσεγγιστική μέθοδος εκτίμησης των απωλειών βασίζεται στην υπόθεση ότι οι απώλειες μπορούν ακόμα να αναλυθούν σε διάφορες συνιστώσες που αντιστοιχούν σε χρονικές αρμονικές. Η εξίσωση των απωλειών εφαρμόζεται σε κάθε αρμονική και τα αποτελέσματα αθροίζονται για να προκύψει μια εκτίμηση των συνολικών απωλειών πυρήνα. Επομένως η σχέση 3.7 γίνεται:

$$P_{fe} = P_h + P_e = \sum_{m=1}^{\infty} k_h \cdot m \cdot f \cdot B_m^2 + k_e \cdot m^2 \cdot f^2 \cdot B_m^2 \quad (3.8)$$

Όπου:

- B_m το πλάτος της m -στης αρμονικής της βασικής συχνότητας f
- m η τάξη της αρμονικής
- k_h και k_e οι συντελεστές υστέρησης και δινορρευσμάτων αντίστοιχα

Τέλος πρέπει να ληφθεί υπόψη ο συντελεστής ελασματοποίησης. Εξαιτίας της κατασκευής των πυρήνων από ελάσματα σιδήρου (και όχι από ολόσωμο όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 3.5), μεταξύ των φύλλων της μαγνητικής λαμαρίνας υπάρχει ρητίνη ή κάποιο βερνίκι με αποτέλεσμα μία μικρή μείωση του ενεργού μήκους του πυρήνα. Η επίδραση αυτού του φαινομένου στις απώλειες σιδήρου εκφράζεται μέσω του

συντελεστή ελασματοποίησης (stacking factor) ο οποίος παίρνει τιμές μικρότερες της μονάδας. Στη παρούσα εργασία θεωρούμε τον συντελεστή ελασματοποίησης ίσο με 0,95 με αποτέλεσμα η εξίσωση 3.8 να γίνει:

$$P_{fe} = P_h + P_e = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{k_h \cdot m \cdot f \cdot B_m^2 + k_e \cdot m^2 \cdot f^2 \cdot B_m^2}{0.95} \quad (3.9)$$

3.13.2 Απώλειες Χαλκού

Τσως οι σημαντικότερες απώλειες μιας μηχανής ειδικά σε περιπτώσεις χαμηλών ταχυτήτων είναι οι απώλειες χαλκού, οι οποίες οφείλονται στο φαινόμενο Joule. Πρόκειται δηλαδή για ωμικές απώλειες κατά τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος από τους αγωγούς της μηχανής οι οποίες υπολογίζονται από τη σχέση:

$$P_{cu} = 3 \cdot I^2 \cdot R_{cu} \quad (3.10)$$

Είναι επομένως απαραίτητος ο υπολογισμός του ρεύματος που ρέει σε κάθε φάση της μηχανής καθώς και η ωμική αντίσταση μίας φάσης.

Η ενεργός (RMS) τιμή του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό μιας φάσης του πρωτεύοντος είναι:

$$I = \frac{J \cdot ff \cdot A_{slot}}{N} \quad (3.11)$$

Όπου:

- J η ενεργός τιμή πυκνότητα ρεύματος
- ff ο συντελεστής πληρότητας
- A_{slot} το εμβαδόν των αυλάκων του πρωτεύοντος
- N ο αριθμός των ελιγμάτων ανά αύλακα

Η αντίσταση χαλκού εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού δηλαδή το μήκος του, τη διατομή του και την ειδική αντίσταση του χαλκού η οποία επηρεάζεται από τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στο τυλίγμα κατά τη λειτουργία της μηχανής. Η τιμή της δίνεται από τη σχέση:

$$R_{cu} = \rho_{20^\circ C} \cdot \frac{L_{\phi\acute{\alpha}\sigma\eta\varsigma}}{A_{cu}} \quad (3.12)$$

Όπου:

- $\rho_{20^\circ C}$ η ειδική αντίσταση του χαλκού για 20 °C
- A_{cu} η διατομή του αγωγού
- $L_{\phi\acute{\alpha}\sigma\eta\varsigma}$ το μήκος μιας φάσης του τυλίγματος

Καθώς η μηχανή βρίσκεται σε λειτουργία οι αγωγοί θερμαίνονται εξαιτίας του φαινομένου Joule επομένως στην εξίσωση 3.12 πρέπει να ληφθεί υπόψη μία διορθωμένη τιμή της ειδικής αντίστασης του χαλκού η οποία δίνεται από το τύπο:

$$\rho_{\theta^\circ C} = \rho_{20^\circ C} \cdot (1 + \alpha \cdot (\theta - 20^\circ C)) \quad (3.13)$$

Όπου:

- $\rho_{100^\circ C}$ η ειδική αντίσταση του χαλκού για θ °C
- α ο συντελεστής θερμοκρασιακής μεταβολής

Γενικά για τον υπολογισμό του μήκους μίας φάσης μιας μηχανής χρησιμοποιείται η σχέση:

$$L_{\phi\acute{\alpha}\sigma\eta\varsigma} = \frac{Q}{m} \cdot N \cdot 2 \cdot l \quad (3.14)$$

Όπου:

- Q ο αριθμός των αυλάκων της μηχανής
- m ο αριθμός των φάσεων
- N ο αριθμός των ελιγμάτων ανά αύλακα

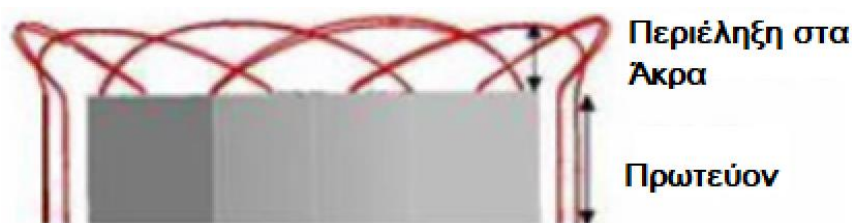
- l το μήκος του αγωγού που απαιτείται για να διαπεράσει ο αγωγός το ενεργό μήκος της μηχανής μαζί με τη μέση απόσταση δύο διαδοχικών αυλάκων της ίδιας φάσης

Για την μηχανή που θα αναλυθεί στη παρούσα διπλωματική το μήκος του αγωγού l έχει υπολογιστεί από τον τύπο:

$$l = depth + \pi \cdot 0.03 \quad (3.15)$$

Όπου $depth$ το ενεργό μήκος της μηχανής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στον όρο $2 \cdot \pi \cdot 0.03$ δεν λαμβάνεται υπόψη μόνο η μέση απόσταση δύο διαδοχικών αυλάκων της ίδιας φάσης αλλά και η απαιτούμενη ακτινική καμπυλότητα των αγωγών η οποία προκύπτει εξαιτίας του κατανεμημένου τυλίγματος (οπτικά φαίνεται για μια κυλινδρική μηχανή στην Εικόνα 3.31). [29]



Εικόνα 3.31: Η περιέλιξη στα άκρα μιας κυλινδρικής μηχανής

3.13.3 Απώλειες Μόνιμων Μαγνητών

Οι απώλειες δινορρευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες θεωρούνταν μέχρι πρόσφατα αμελητέες στον σχεδιασμό κινητήρων με κατανεμημένα τυλίγματα, κυρίως λόγω της σχεδόν ημιτονοειδούς μορφής της μαγνητεγερτικής δύναμης. Ειδικότερα στους κινητήρες επιφανειακών μαγνητών, όπου οι μόνιμοι μαγνήτες βρίσκονται στο διάκενο, αναπτύσσονται στην επιφάνειά τους δινορρεύματα λόγω της μεταβολής της ΜΕΔ. Έτσι προκαλείται αύξηση της θερμοκρασίας τους η οποία σε ορισμένες ακραίες περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσει και σε απομαγνητίση.

Για τον υπολογισμό αυτών των απωλειών συνήθως αξιοποιούνται αναλυτικά μοντέλα με συγκεκριμένες σαφείς προσεγγίσεις και παραδοχές. Στη παρούσα εργασία θα χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο που προτείνεται στα κείμενα [23] και [30]. Πιο συγκεκριμένα υποθέτουμε ότι οι πυρήνες του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος διαθέτουν άπειρη μαγνητική διαπερατότητα και μηδενική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Επιπλέον, θεωρείται ότι οι μόνιμοι μαγνήτες παρουσιάζουν ηλεκτρική αγωγιμότητα σ_m , τα επαγόμενα δινορρεύματα έχουν αξονική κατεύθυνση, ενώ η μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας στο διάκενο, η οποία οφείλεται στην εναλλαγή δοντιών και αυλάκων, παραλείπεται ως αμελητέα.

Με την χρήση των «groups» του FEMM μπορούμε να ξεχωρίσουμε τα «elements» τα οποία ανήκουν στους μαγνήτες από την υπόλοιπη γεωμετρία και να υπολογίσουμε εκτελώντας μια «σύγχρονη περιστροφή» (βλέπε ενότητα 4.4) τα επαγόμενα δινορρεύματα, λόγω του χρονομεταβλητού πεδίου, σε αυτές τις περιοχές με τη σχέση:

$$J_m = -\sigma_m \cdot \frac{dA}{dt} + J_c \quad (3.16)$$

Το μέγεθος A λέγεται διανυσματικό δυναμικό και είναι κομβικό για οποιονδήποτε υπολογισμό γίνεται στο FEMM, ως σ_m ορίζεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα των μόνιμων μαγνητών και το J_c αποτελεί μία περιοριστική (ή εξαναγκασμένη) πυκνότητα ρεύματος, η οποία επιλέγεται έτσι ώστε το συνολικό ρεύμα στη διατομή κάθε μαγνήτη να είναι μηδέν. Όπως θα δούμε αναλυτικά στο κεφάλαιο 4 η επίλυση χρονομεταβλητών προβλημάτων στο FEMM είναι ιδιαίτερα περίπλοκη γι' αυτό αντικαθιστούμε το ρυθμό

μεταβολής του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού με τις αρμονικές συνιστώσες του οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν πολύ εύκολα αξιοποιώντας την εντολή fft του Matlab. Έτσι η εξίσωση 3.16 γράφεται:

$$J_m = -\sigma_m \cdot j \cdot f \cdot A + J_c \quad (3.17)$$

Οι απώλειες για κάθε αρμονική υπολογίζονται στη συνέχεια με ολοκλήρωση της ποσότητας J_c^2/σ_m πάνω από τον όγκο κάθε μαγνήτη και στο τέλος προστίθενται ώστε να προκύψουν οι συνολικές απώλειες μόνιμων μαγνητών.

$$P_{mag} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_m \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{\infty} \Delta v_i \cdot (2 \cdot \pi \cdot j \cdot f)^2 \cdot (J_{m,j})^2 \quad (3.18)$$

Όπου m ο αριθμός των στοιχειωδών όγκων των τριγωνικών στοιχείων των μαγνητών και j η τάξη της αρμονικής συνιστώσας.

3.13.4 Απώλειες Λόγω Εγγύτητας και Επιδερμικού Φαινομένου

Σε ορισμένες μηχανές εξαιτίας του φαινομένου εγγύτητας οι απώλειες στο χαλκό μπορούν να αυξηθούν σε σημαντικό βαθμό. Εξαιτίας της μικρής διατομής των τυλιγμάτων στη παρούσα διπλωματική θα μπορούσαν να αμεληθούν, ωστόσο για λόγους πληρότητας θα υπολογιστούν με τη βοήθεια του FEMM.

Για χαμηλές συχνότητες οι απώλειες εξαιτίας του επιδερμικού φαινομένου μπορούν να υπολογιστούν από τη σχέση:

$$P_{prox} = c_{prox} \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (3.19)$$

Όπου c_{prox} ένας συντελεστής απωλειών ο οποίος δίνεται από το τύπο:

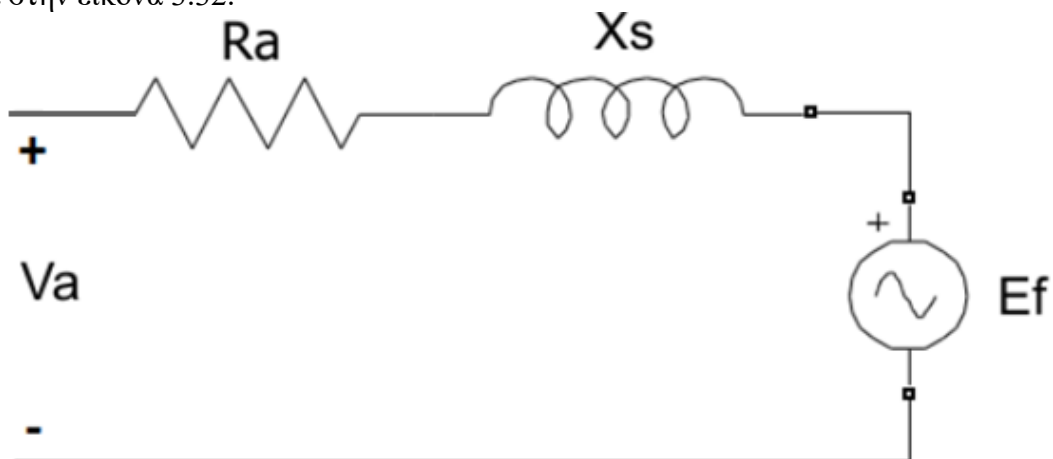
$$c_{prox} = f f \cdot \frac{\pi^2}{8} \cdot \sigma_{wire} \cdot d_{wire}^2 \quad (3.20)$$

Όπου:

- σ_{wire} η ηλεκτρική αγωγιμότητα του χαλκού
- d_{wire} η διάμετρος του αγωγού [23] [31]

3.14 Ισοδύναμο Κύκλωμα

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα μιας σύγχρονης μηχανής είναι ένα απλοποιημένο μοντέλο που μας βοηθά να αναλύσουμε τη συμπεριφορά της στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Κατά τη σχεδιάσή του η ηλεκτρεγερτική δύναμη που επάγεται από τον δρομέα στον στάτη συνδέεται σε σειρά με μία αντίδραση και ένα πηνίο, τα οποία περιγράφουν την επαγωγική συμπεριφορά και τις ωμικές απώλειες της μηχανής. Οπτικά αυτό φαίνεται στην εικόνα 3.32.



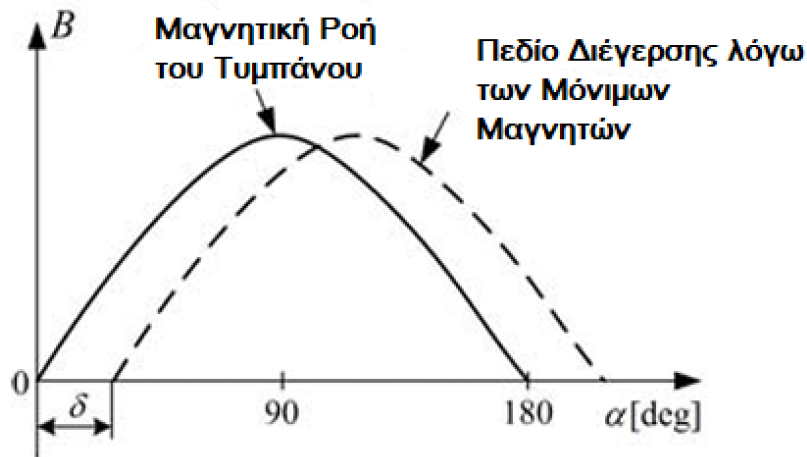
Εικόνα 3.32: Το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα μίας σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών

Η E_f αναπαριστά την ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ), η R_a αντιπροσωπεύει την αντίσταση του χαλκού των τυλίγμάτων του στάτη της φάσης Α, η X_s είναι η σύγχρονη επαγωγική αντίδραση και η V_a η φασική τάση της φάσης Α.

Καθώς η μηχανή είναι τριφασική και τα τυλίγματά της είναι κατάλληλα χωρικά τοποθετημένα ανάμεσα σε κάθε φάση υπάρχει διαφορά 120 ηλεκτρικών μοιρών. Έτσι για την τάση των φάσεων έχουμε:

$$\begin{aligned} V_a &= V_{max} \cdot \cos(\omega \cdot t + \delta) \\ V_b &= V_{max} \cdot \cos\left(\omega \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3} + \delta\right) \\ V_c &= V_{max} \cdot \cos\left(\omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3} + \delta\right) \end{aligned}$$

Η γωνία δ μιας γραμμικής ηλεκτρικής μηχανής λέγεται γωνία φορτίου ή δύναμης (συνηθέστερα load angle) και ορίζεται ως η σχετική γωνία της κυματομορφής της μαγνητικής επαγωγής των μόνιμων μαγνητών και της κυματομορφής της μαγνητικής ροής του οπλισμού (Εικόνα 3.33). Είναι επίσης η γωνία ανάμεσα στην ΗΕΔ και στη τερματική τάση V_a . [1]



Εικόνα 3.33: Η γωνιακή απόκλιση ανάμεσα στη μαγνητική επαγωγή των μόνιμων μαγνητών και στη κυματομορφή της μαγνητικής ροής του οπλισμού

3.15 Μετασχηματισμός Park

Καθώς το πρόβλημα που προκύπτει από το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο εξαιτίας της εξάρτησης των μεγεθών από το χρόνο ορίζεται ο μετασχηματισμός Park ο οποίος ανάγει τα χρονομεταβλητά μεγέθη του ακίνητου πλαισίου a, b, c σε χρονοσταθερά στο κινούμενο πλαίσιο $d-q$.

Σε μια «παραδοσιακή» κυλινδρική μηχανή ορίζεται ως γωνία θ η γωνία ανάμεσα στον άξονα d του δρομέα της μηχανής και στον άξονα της φάσης Α. Σε μία γραμμική μηχανή όμως αυτούς τους δύο άξονες δεν τους χωρίζει γωνία αλλά απόσταση, συνεπώς ο μετασχηματισμός Park γράφεται ελαφρώς διαφορετικά.

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos\left(-\frac{\pi}{\tau}x\right) & \cos\left(-\frac{\pi}{\tau}x + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(-\frac{\pi}{\tau}x - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(-\frac{\pi}{\tau}x\right) & \sin\left(-\frac{\pi}{\tau}x + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(-\frac{\pi}{\tau}x - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix}$$

Το μέγεθος τ λέγεται pole pitch και είναι η απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς πόλους της μηχανής. Ως x ορίζεται η απόσταση ανάμεσα στον άξονα d και τον άξονα της φάσης A . Αξίζει να σημειωθεί ότι ο μετασχηματισμός αυτός ισχύει για οποιοδήποτε μέγεθος και όχι αποκλειστικά για τη τάση όπως γράφτηκε εδώ. [4]

Με βάση τον ορισμό του μετασχηματισμού οι πεπλεγμένες ροές d - q είναι:

$$\begin{aligned} \lambda_d &= \Phi_{PM} + L_d \cdot I_d \\ \lambda_q &= L_q \cdot I_q \end{aligned}$$

Αν μεταφέρουμε στο πλαίσιο d - q όλα τα μεγέθη προκύπτουν οι εξισώσεις [32] [33]:

$$V_d = R \cdot I_d + L_d \cdot \frac{dI_d}{dt} - \frac{\pi}{\tau} \cdot u \cdot L_q \cdot I_q \quad (3.21)$$

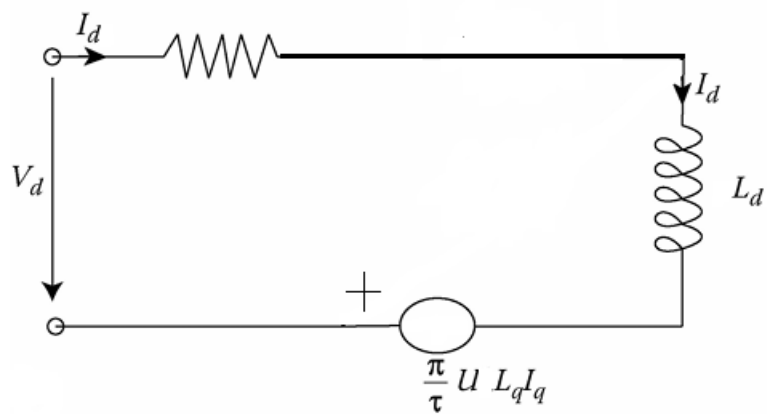
$$V_q = R \cdot I_q + L_q \cdot \frac{dI_q}{dt} + \frac{\pi}{\tau} \cdot u \cdot (L_d \cdot I_d + \Phi_{PM}) \quad (3.22)$$

Όπου:

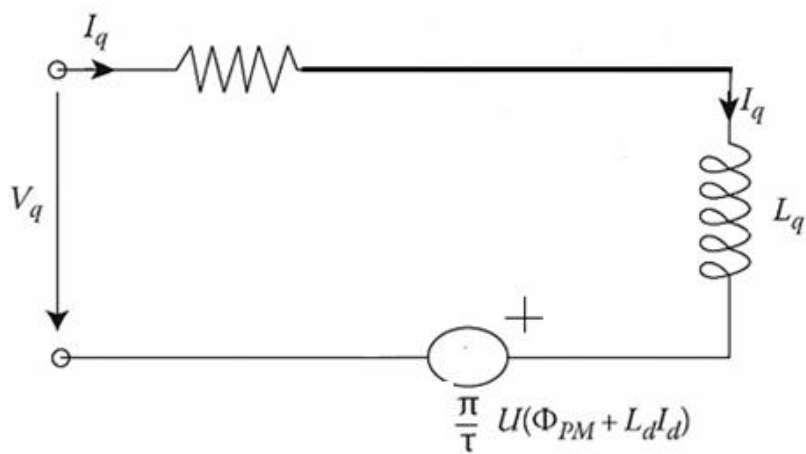
- Φ_{PM} η συζευγμένη μαγνητική ροή που παράγουν οι μόνιμοι μαγνήτες
- p ο αριθμός των πόλων της μηχανής
- u η γραμμική ταχύτητα του δρομέα u_s πολλαπλασιασμένη με τον αριθμό των ζεύγων πόλων, δηλαδή:

$$u = \frac{p}{2} \cdot u_s$$

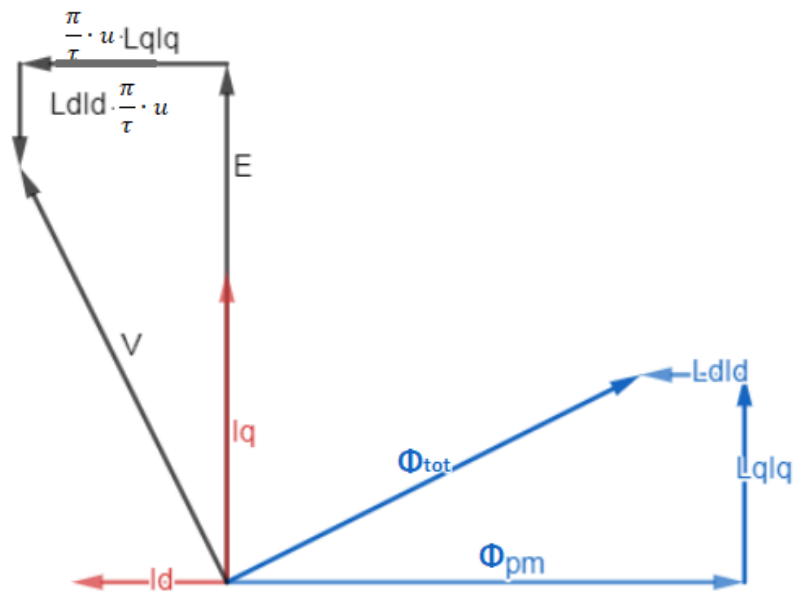
Οι εξισώσεις 3.21 και 3.22 μπορούν να αποτυπωθούν και ως ισοδύναμα κυκλώματα όπως φαίνεται στις εικόνες 3.34 και 3.35.



Εικόνα 3.34: Το ισοδύναμο κύκλωμα d άξονα



Εικόνα 3.35: Το ισοδύναμο κύκλωμα q άξονα



Εικόνα 3.36: Διανοσματικό διάγραμμα σύγχρονης γραμμικής μηχανής μόνιμων μαγνητών

Τέλος δύο πολύ σημαντικά μεγέθη που μπορούν να εξαχθούν μέσω της ανάλυσης σε d-q άξονες είναι η ισχύς και η οριζόντια δύναμη που ασκείται στο δευτερεύον. Η πρώτη δίνεται από τη σχέση[32]:

$$P_{em} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{p}{2} \cdot u_s \cdot \left((L_d \cdot I_d + \Phi_{PM}) \cdot I_q - L_q \cdot I_q \cdot I_d \right) \quad (3.23)$$

Η οριζόντια δύναμη (thrust force) μπορεί να υπολογιστεί εύκολα από την 3.19 ως εξής:

$$F_T = \frac{P_{em}}{u_s} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{p}{2} \cdot (\Phi_{PM} + (L_d - L_q) \cdot I_d) \cdot I_q \quad (3.24)$$

Στην παραπάνω εξίσωση παραμένει εμφανής και η συνιστώσα της οριζόντιας δύναμης λόγω μαγνητικής αντίστασης (reluctance). Οι αυτεπαγωγές που παρουσιάζονται στους άξονες d και q της μηχανής σχετίζονται με τη μαγνητική αντίσταση και επομένως με τη γεωμετρία του κινητήρα. Η διαφορά των αυτεπαγωγών μεταξύ των δύο αξόνων αντανακλά την εκτυπότητα και δείχνει την επίδραση της μαγνητικής ροπής στην απόδοση της μηχανής. Παρ' όλα αυτά, στις συγκεκριμένες μηχανές, ο κύριος μηχανισμός παραγωγής δύναμης προέρχεται από την αλληλεπίδραση του πεδίου των μόνιμων μαγνητών με το εγκάρσιο πεδίο του στάτη, το οποίο δημιουργείται από το ρεύμα στον άξονα q.

Κεφάλαιο 4

Προσομοίωση Γραμμικής Μηχανής Μονίμων Μαγνητών στο Λογισμικό FEMM

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η θεωρητική ανάλυση της Σύγχρονης Γραμμικής Μηχανής Μονίμων Μαγνητών. Κατόπιν για την επαλήθευση των χαρακτηριστικών που υπολογίστηκαν διεξήχθησαν πειράματα προσδιορισμού της ΗΕΔ, των απωλειών χαλκού και της δύναμης ευθυγράμμισης.

4.1 Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων - FEMM

Ένα μαγνητικό πρόβλημα μπορεί θεωρητικά να περιγραφεί με μια μερική διαφορική εξίσωση και κατάλληλες οριακές συνθήκες, όμως όταν πρόκειται για πολύπλοκες γεωμετρίες, όπως αυτές που συναντώνται στις ηλεκτρικές μηχανές η εύρεση αναλυτικών λύσεων είναι εξαιρετικά δύσκολη. Για την αντιμετώπιση αυτής της δυσκολίας αναπτύχθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Σύμφωνα με αυτή, το αρχικό πρόβλημα χωρίζεται σε πολλές μικρότερες περιοχές, οι οποίες ονομάζονται στοιχεία (elements), δημιουργώντας ένα πλέγμα (mesh). Στη συνέχεια το μαγνητικό πρόβλημα λύνεται σε κάθε περιοχή ξεχωριστά και η συνολική λύση προκύπτει από τη συνδυασμένη επίλυση αυτών των επιμέρους προβλημάτων.

Στη παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί το ελεύθερο λογισμικό FEMM (Finite Element Method Magnetics) για την επίλυση του μαγνητικού προβλήματος. Το συγκεκριμένο λογισμικό δύναται να επιλύσει δισδιάστατα (2D) μαγνητοστατικά αλλά και θερμικά προβλήματα εφόσον ακολουθηθεί η εξής διαδικασία τριών σταδίων. [34]

Πρώτο στάδιο αποτελεί η προεπεξεργασία. Κατά τη διάρκειά της σχεδιάζεται η γεωμετρία του προβλήματος, ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες και επιλέγονται τα υλικά του. Στη συνέχεια γίνεται η πλεγματοποίηση (meshing) κατά την οποία η γεωμετρία χωρίζεται σε πολλά μικρά τρίγωνα.

Το δεύτερο στάδιο είναι αυτό της επίλυσης. Σε κάθε τριγωνικό στοιχείο του πλέγματος γίνεται επίλυση των ηλεκτρομαγνητικών διαφορικών εξισώσεων που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Με αυτόν τον τρόπο, το αρχικό πρόβλημα μετατρέπεται σε ένα σύστημα γραμμικής άλγεβρας με χιλιάδες αγνώστους, το οποίο διατυπώνεται με τη μορφή πινάκων. Η προσέγγιση της λύσης σε κάθε στοιχείο βασίζεται στη γραμμική παρεμβολή των τιμών του διανυσματικού δυναμικού A στα σημεία των κορυφών του τριγώνου (κόμβους). Για την επίλυση του συστήματος, χρησιμοποιείται κυρίως η μέθοδος Newton-Raphson, λόγω της ταχύτητας και της αξιοπιστίας της στη σύγκλιση. Η διαδικασία συνεχίζεται επαναληπτικά μέχρι το σφάλμα να περιοριστεί εντός προκαθορισμένων ορίων.

Το τελευταίο στάδιο αποτελεί η μετεπεξεργασία, δηλαδή η απεικόνιση και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

4.2 Μαγνητοστατικά Προβλήματα

Μαγνητοστατικά ονομάζονται τα προβλήματα στα οποία το μαγνητικό πεδίο δεν αποτελεί συνάρτηση του χρόνου, παραμένει δηλαδή αμετάβλητο. Σε αυτή τη περίπτωση οι εξισώσεις του Maxwell γράφονται ως εξής [34]:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (4.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (4.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4.4)$$

Όπου:

- E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου
- D η πυκνότητα του ηλεκτρικού πεδίου
- H η ένταση του μαγνητικού πεδίου
- B η μαγνητική επαγωγή
- J η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος
- P η πυκνότητα του ηλεκτρικού φορτίου

Επιπλέον σε κάθε υλικό ισχύει η καταστατική του εξίσωση:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (4.5)$$

Στην ειδική περίπτωση των μόνιμων μαγνητών έχουμε:

$$\vec{B} = \mu_o \cdot \vec{H} + \vec{M} \quad (4.6)$$

Όπου M η μόνιμη μαγνήτιση του μαγνήτη και μ_o η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

Αν το υλικό είναι μη γραμμικό τότε η διαπερατότητα του μ υπολογίζεται ως συνάρτηση της μαγνητικής επαγωγής:

$$\mu(B) = \frac{B}{H(B)} \quad (4.7)$$

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 4.1 το FEMM υπολογίζει τα ζητούμενα μεγέθη μέσω του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού A, το οποίο συνδέεται με τη μαγνητική επαγωγή μέσω της σχέσης:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (4.8)$$

Επομένως από τις εξισώσεις 4.2 και 4.7 προκύπτει:

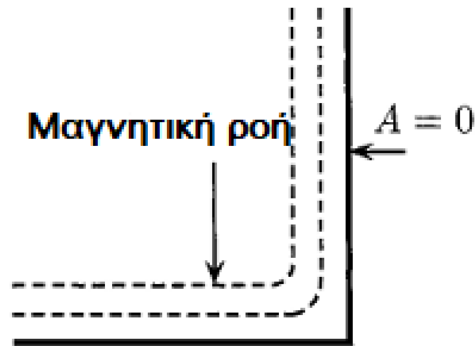
$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \cdot \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (4.9)$$

Το βασικό πλεονέκτημα της χρήσης του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού $\vec{A}$ είναι ότι ενσωματώνει όλες τις σχετικές εξισώσεις και συνθήκες του μαγνητοστατικού πεδίου σε μία εξίσωση μίας μεταβλητής. Είναι προφανές ότι εάν είναι γνωστό το $\vec{A}$ μπορούν πολύ εύκολα να προσδιοριστούν και τα $\vec{B}$ και $\vec{H}$.

4.3 Προσδιορισμός Οριακών Συνθηκών

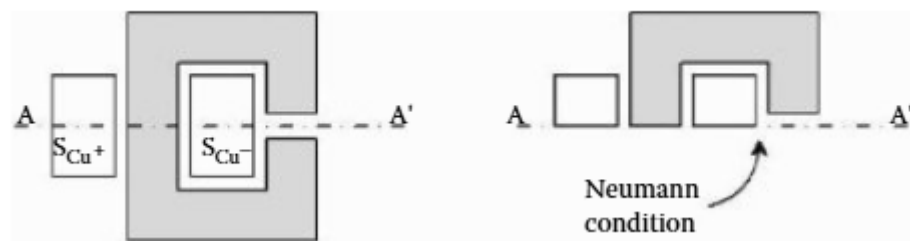
Η επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος είναι ουσιαστικά επίλυση διαφορικών εξισώσεων. Έτσι για να εξασφαλιστεί η ύπαρξη μοναδικής λύσης είναι απαραίτητο το πρόβλημα να είναι καλά ορισμένο δηλαδή να έχουν ορισθεί οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες. Οι συνθήκες αυτές χωρίζονται στις εξής κατηγορίες[35]:

- Dirichlet: Σε μαγνητοστατικά προβλήματα, είναι απαραίτητο να ορίσουμε την τιμή του διανυσματικού δυναμικού A σε τουλάχιστον έναν κόμβο. Συνήθως, αυτό γίνεται στην εξωτερική επιφάνεια του στάτη, όπου τίθεται $A = 0$. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το εξωτερικό τμήμα του πυρήνα του στάτη θεωρείται ως μία συνεχής γραμμή μαγνητικής ροής — κάτι που στην πραγματικότητα δεν ισχύει απόλυτα. Η κύρια συνέπεια αυτής της συνοριακής συνθήκης είναι ότι δεν επιτρέπεται μαγνητική ροή να διαφεύγει από το πίσω μέρος του πυρήνα. Στη περίπτωση που τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του FEMM δείξουν έντονο κορεσμό στο πυρήνα, τότε η υπόθεση $A = 0$ στην εξωτερική του επιφάνεια δεν είναι πλέον σωστή. Τότε απαιτείται ο ορισμός μιας ακόμα επιφάνειας του εξωτερικού χώρου ώστε το όριο $A = 0$ να μεταφερθεί μακριά από το εξωτερικό τμήμα του στάτη.



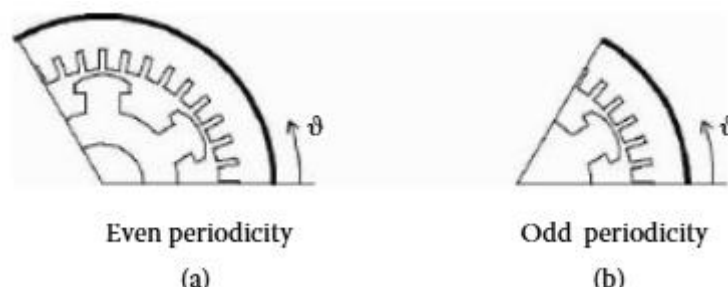
Εικόνα 4.1: Η ομογενής συνθήκη Dirichlet

- Neuman: Η συνοριακή συνθήκη Neuman προσδιορίζει το μέτρο της καθετής παραγώγου του A σε ένα σύνορο. Πιο συνηθισμένη είναι η χρήση της ομογενούς συνθήκης Neuman $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ η οποία αναγκάζει τις μαγνητικές γραμμές να τέμνουν το σύνορο κάθετα.



Εικόνα 4.2: Η ομογενής συνθήκη Neuman [36]

- Robin: Αυτή η συνοριακή συνθήκη ουσιαστικά αποτελεί συνδυασμό των Dirichlet και Neuman αφού το διανυσματικό δυναμικό A με τη κάθετη παράγωγό του.
- Περιοδική: Αυτές οι συνοριακές συνθήκες είναι χρήσιμες σε γεωμετρίες όπου παρατηρείται επανάληψη των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, αλλά οι συνοριακές συνθήκες Dirichlet και Neumann δεν είναι κατάλληλες. Ουσιαστικά συνδέει δύο σύνορα μεταξύ τους θέτοντας τα αντίστοιχα στοιχεία τους ίσα.
- Αντιπεριοδική: Έχει αντίστοιχη χρήση και λειτουργία με τη περιοδική συνθήκη, συνδέει δηλαδή δύο σύνορα μεταξύ τους αλλά θέτει ίσα μέτρα και αντίθετη φορά. Γενικά η επιλογή περιοδικής ή αντιπεριοδικής συνθήκης πρέπει να γίνεται με προσοχή εξαιτίας της ομοιότητας των δύο.

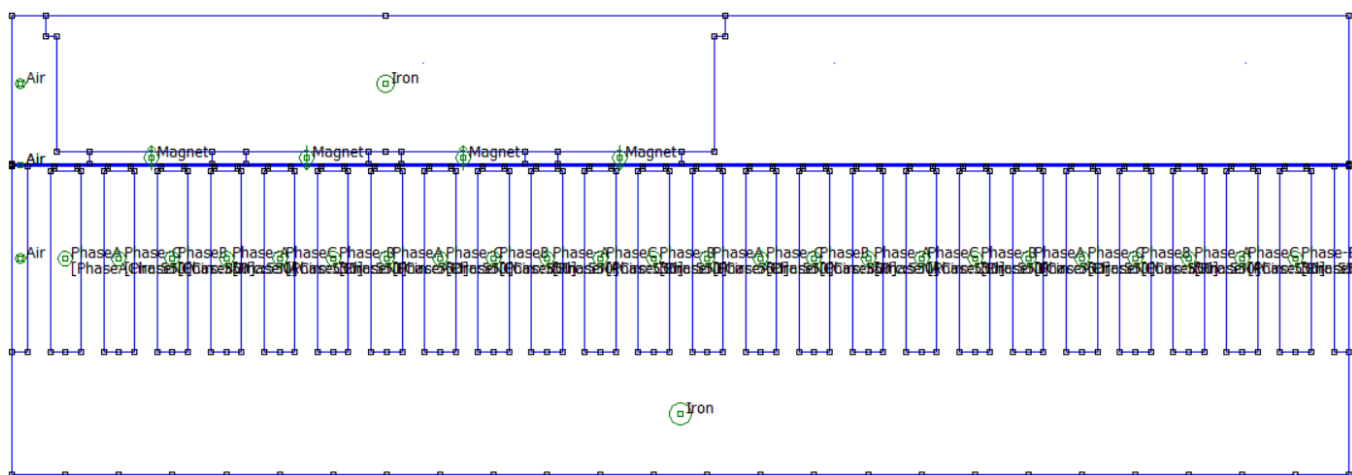


Εικόνα 4.3: (a) Κατά τη μελέτη δύο πόλων επιλέγεται η περιοδική συνθήκη (b) Κατά τη μελέτη ενός πόλου επιλέγεται η αντιπεριοδική συνθήκη [36]

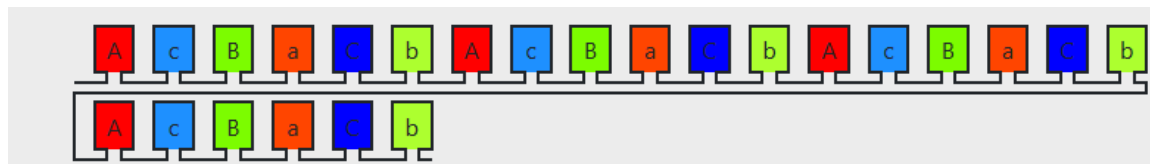
Η «κλασματοποίηση» της γεωμετρίας, δηλαδή η σχεδίαση ενός μέρους της και μοντελοποίηση του υπόλοιπου με κατάλληλες συνοριακές συνθήκες, είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς περιορίζει σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο, γεγονός απολύτως επιθυμητό. Στη παρούσα εργασία λόγω έλλειψης συμμετρίας στην υπό μελέτη μηχανή δεν ήταν δυνατόν να γίνει κλασματική ανάλυση της.

4.4 Γεωμετρία Σύγχρονης Γραμμικής Μηχανής Μόνιμων Μαγνητών

Η σύγχρονη γραμμική μηχανή μονίμων μαγνητών που θα μελετηθεί στη παρούσα διπλωματική αρχικά σχεδιάστηκε από το φοιτητή Χριστόφορο Ποιητάρη [37]. Τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά φαίνονται στο παρακάτω πίνακα, ενώ όλη η γεωμετρία που σχεδιάστηκε στο FEMM στις ακόλουθες εικόνες. Το ενεργό μήκος που επιλέχθηκε για τη συγκεκριμένη μηχανή είναι 30mm, ενώ το μαγνητικό πεδίο του πρωτεύοντος δημιουργείται από τυλίγματα τριών φάσεων με την αλληλουχία της εικόνας 4.5. Στη πράξη για κάθε φάση χρησιμοποιήθηκαν πηνία 22 σπειρών και 15 παράλληλων κλάδων, δηλαδή συνολικά σε κάθε αύλακα βρίσκονται τοποθετημένοι 330 αγωγοί χαλκού.



Εικόνα 4.4: Το Ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο που σχεδιάστηκε στο FEMM

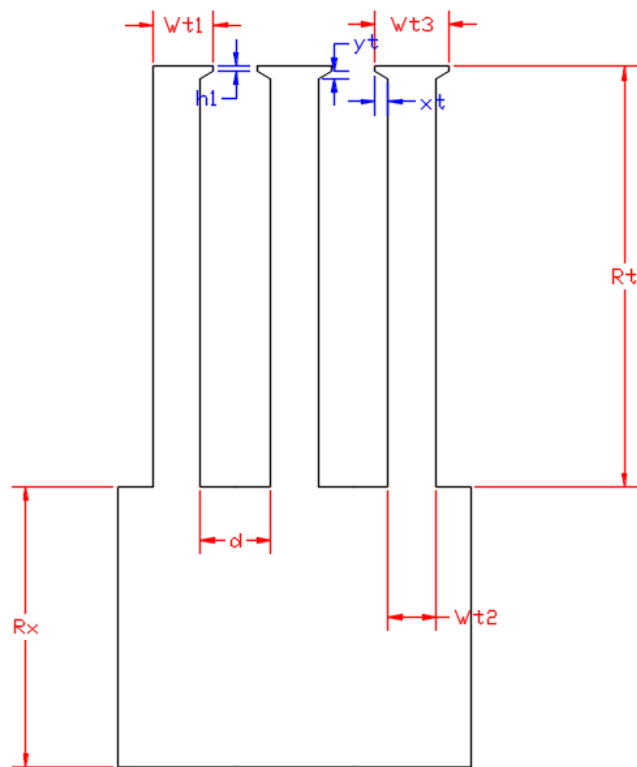


Εικόνα 4.5: Η διαδοχή των φάσεων της μηχανής

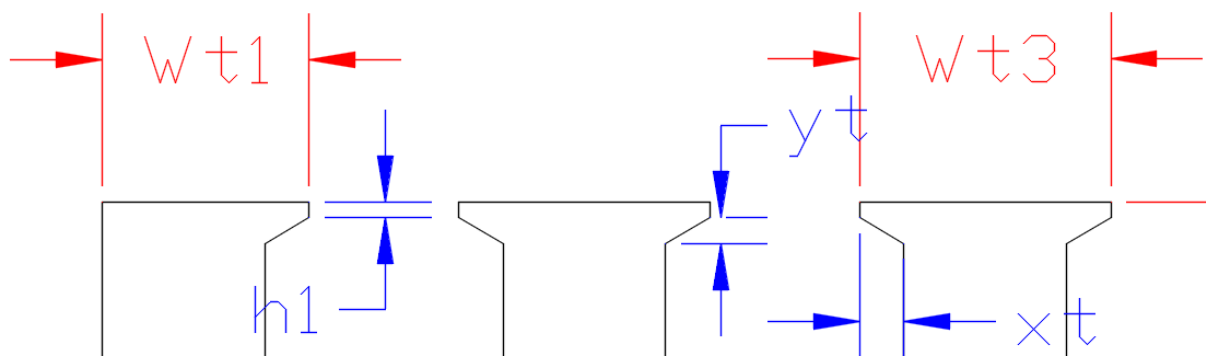
Αναλυτικότερα για το σχεδιασμό του πρωτεύοντος χρησιμοποιήθηκαν οι εξής εξαρτημένες μεταβλητές:

Εξαρτημένες μεταβλητές πρωτεύοντος	
W_{t1}	6.5mm
W_{t2}	5.1mm
W_{t3}	7.9mm
R_x	30mm
R_t	45mm
d	7.5mm
h_1	0.5mm
x_t	1.4mm
y_t	0.81mm

Πίνακας 4.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πρωτεύοντος της μηχανής



Εικόνα 4.6: Τμήμα του πρωτεύοντος της υπό μελέτη μηχανής

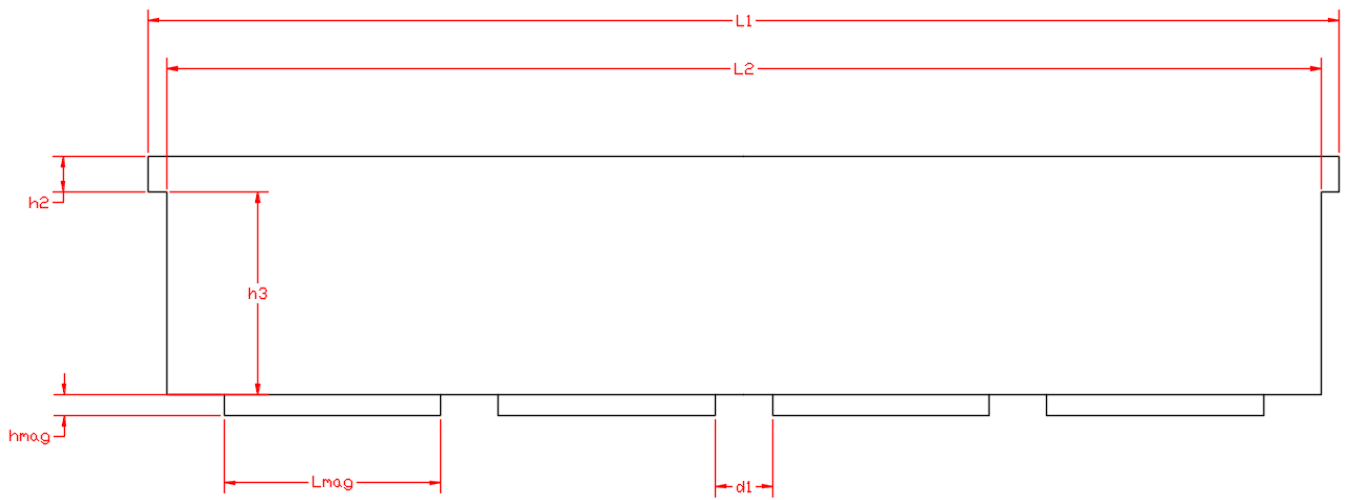


Εικόνα 4.7: Λεπτομέρεια από τα δόντια του πρωτεύοντος

Ομοίως για το σχεδιασμό του δευτερεύοντος χρησιμοποιήθηκαν οι εξής εξαρτημένες μεταβλητές:

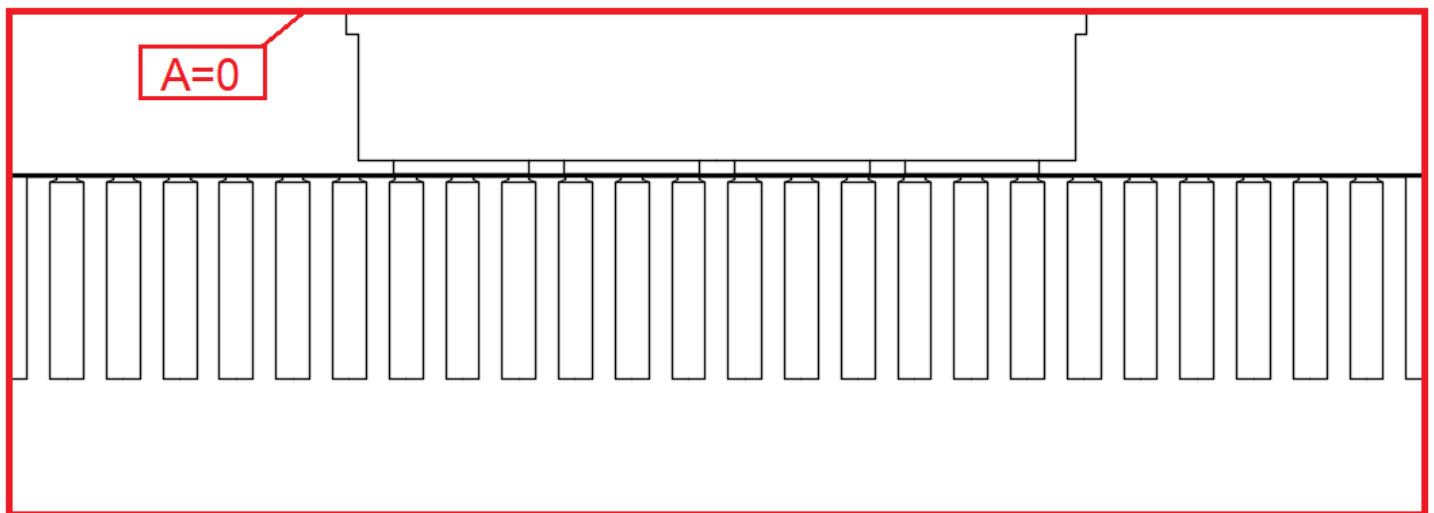
Εξαρτημένες μεταβλητές δευτερεύοντος	
L_1	165mm
L_2	160mm
h_2	5mm
h_3	28mm
L_{mag}	30mm
h_{mag}	3mm
d_1	8mm

Πίνακας 4.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δευτερεύοντος της μηχανής



Εικόνα 4.8: Το δευτερεύον της υπό μελέτη μηχανής

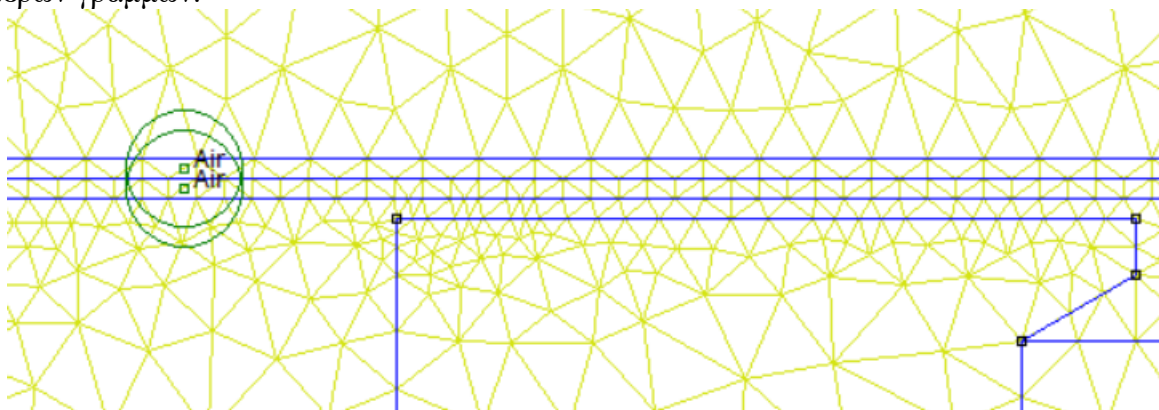
Οι συνοριακές συνθήκες που απαιτούνται για την επίλυση του προβλήματος φαίνονται στη παρακάτω εικόνα. Καθώς μοντελοποιείται ολόκληρη η γεωμετρία της μηχανής χρειαζόμαστε μόνο την ομογενή συνθήκη Dirichlet γύρω από τη περιφέρειά της.



Εικόνα 4.9: Ομογενής συνοριακή συνθήκη Dirichlet στην υπό μελέτη μηχανή

Διάκενο

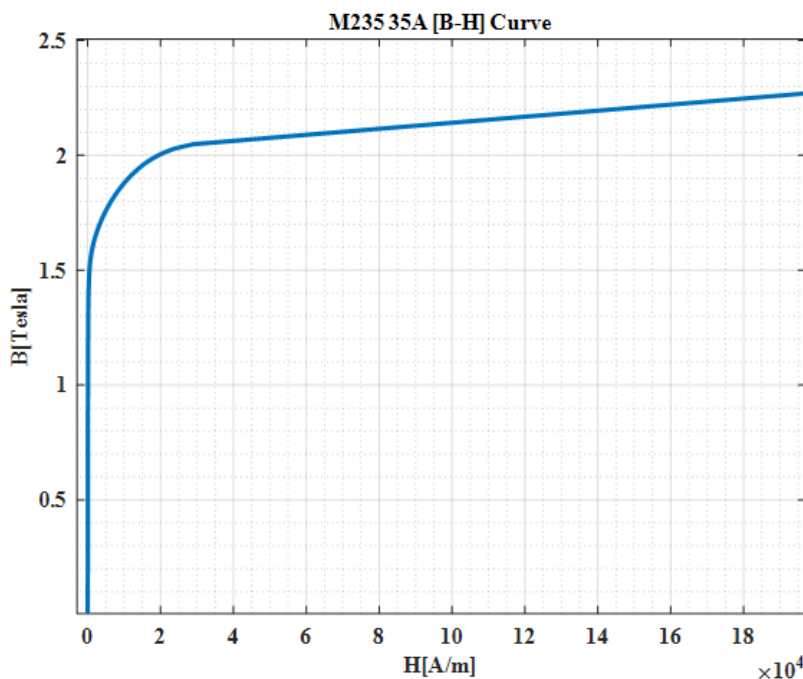
Αποφασιστικής σημασίας για την ορθή μελέτη μιας μηχανής είναι η κατάλληλη μελέτη του διακένου της. Εφόσον εκεί γίνεται η ηλεκτρομηχανική μετατροπή είναι απαραίτητη η «πύκνωση» του πλέγματος σε αυτό το σημείο ώστε να αυξηθεί η υπολογιστική ακρίβεια του FEMM. Αυτό επιτυγχάνεται με τη προσθήκη περισσότερων γραμμών.



Εικόνα 4.10: Η πύκνωση του τριγωνικού πλέγματος στο διάκενο της μηχανής

Επιλογή Υλικών

Τα υλικά κατασκευής της μηχανής επιλέχθηκαν με άξονα την επάρκεια τους στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών. Έτσι ο πυρήνας του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος είναι κατασκευασμένα από μαγνητική λαμαρίνα τύπου M235 35A πάχους 0.35 mm με ειδικές απώλειες 2.35 W/kg σε συχνότητα 50 Hz για μέγιστη επαγωγή 1.5 T. Η χαρακτηριστική καμπύλη μαγνήτισης της είναι:



Οι μαγνήτες που παράγουν το πεδίο του δευτερεύοντος είναι μαγνήτες Σαμαρίου-Κοβαλτίου (SmCo17) οι οποίοι είναι αρκετά ανθεκτικοί στις υψηλές θερμοκρασίες.

4.5 Υπολογισμός Μεγεθών

Για να περιγραφεί η διαδικασία της προσομοίωσης απαραίτητος είναι πρώτα ο ορισμός μερικών σημαντικών εννοιών. Αυτές είναι η λειτουργική κατάσταση και η σύγχρονη περιστροφή.

Λειτουργική Κατάσταση

Ως λειτουργική κατάσταση ορίζεται το ζεύγος (J , δ) όπου J είναι η ενεργός πυκνότητα ρεύματος σε κάθε αύλακα της μηχανής και δ η γωνία δύναμης (load angle), όπως αυτή προσδιορίστηκε στην ενότητα 3.7. Οι λειτουργικές καταστάσεις διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας που επιδιώκεται για τη μηχανή. Για κάθε τέτοια χαρακτηριστική κατάσταση, υπολογίζονται βασικά μεγέθη όπως η οριζόντια δύναμη (thrust), η τάση, οι απώλειες και ο βαθμός απόδοσης.

Σύγχρονη Περιστροφή

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 4.1 το FEMM λύνει δισδιάστατα μαγνητοστατικά προβλήματα. Όμως το δευτερεύον της μηχανής καθώς κινείται γραμμικά, αλλάζει θέση με αποτέλεσμα για την επαρκή ανάλυση μιας λειτουργικής κατάστασης να μην επαρκεί μία μόνο προσομοίωση, η οποία αποτελεί ένα απλό στιγμιότυπο του ευρύτερου προβλήματος.

Σύγχρονη περιστροφή ονομάζεται αυτή η σειρά προσομοιώσεων, στην οποία μεταβάλλονται τα ρεύματα (μέσω ολίσθησης της φάσης τους) και η θέση του δρομέα με κατάλληλο βήμα ώστε να γίνεται ταυτόχρονη μετακίνηση με ίδια ταχύτητα («σύγχρονη») των δύο αλληλεπιδρώντων πεδίων. Δηλαδή η γεωμετρία σχεδιάζεται και πλεγματοποιείται σε κάθε νέα προσομοίωση, ενώ παράλληλα συλλέγονται δεδομένα για τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν. Αυτή η διαδικασία αν γινόταν «χειροκίνητα» θα απαιτούνταν πολύς χρόνος, επομένως γίνεται με κατάλληλες εντολές μέσω της διεπαφής FEMM – Matlab.[34]

Αναλυτικότερα τόσο το πρωτεύον όσο και το δευτερεύον της μηχανής μπορούν να περιγραφούν με δύο d-q πλαίσια. Ο άξονας d του πρωτεύοντος ταυτίζεται με τον άξονα της φάσης A ενώ ο άξονας d του δευτερεύοντος διέρχεται από το σημείο όπου το μαγνητικό πεδίο (B) γίνεται μέγιστο (καθώς το δευτερεύον έχει ροή μόνο στον ορθό άξονα). Στη γραμμική μηχανή μόνιμων μαγνητών (LPMSM) που μελετάμε αυτό ταυτίζεται με το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου ενός από τους μόνιμους μαγνήτες.

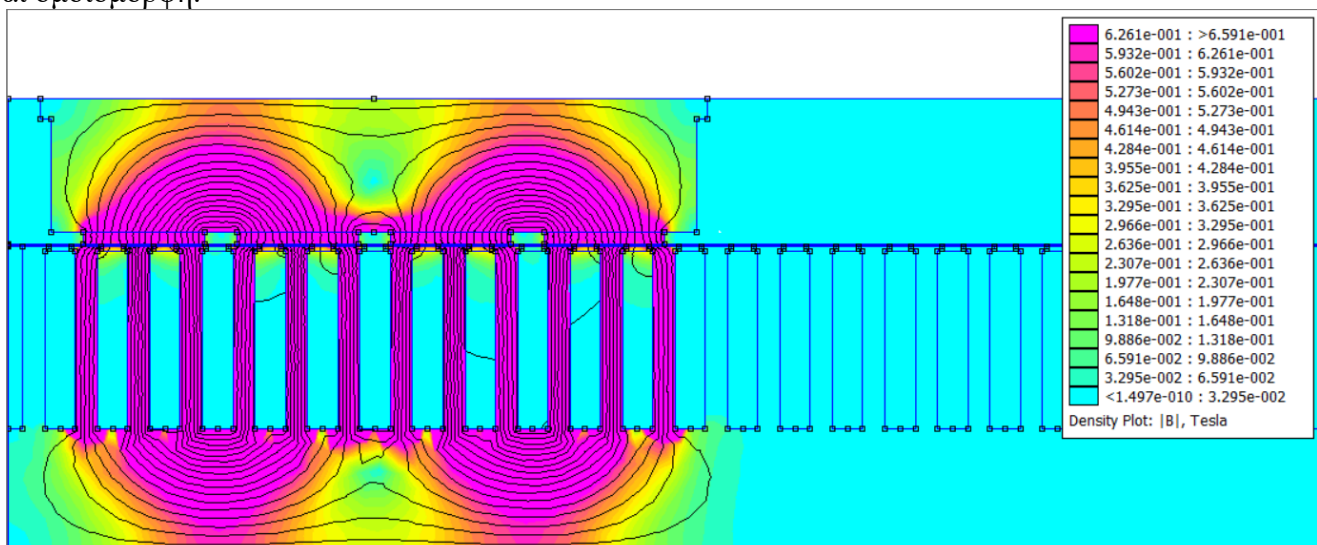
Κατά τη διαδικασία κατασκευής του δευτερεύοντος της μηχανής, αυτό αρχικά τοποθετείται σε μία τυχαία θέση. Επιπλέον, όσον αφορά το τύλιγμα του πρωτεύοντος, δεν είναι εκ των προτέρων γνωστή η γωνιακή θέση του άξονα στον οποίο η φάση A δέχεται τη μέγιστη μαγνητική ροή από τον δρομέα καθώς αυτό είναι κατανεμημένο. Αυτό που έχει σημασία είναι ο καθορισμός της σχετικής θέσης μεταξύ των δύο αξόνων (του άξονα του δευτερεύοντος και εκείνου της φάσης A) και εν τέλει η ευθυγράμμισή τους. Αυτή επιτυγχάνεται μέσω ενός πειράματος κενού φορτίου.

Δοκιμή Κενού Φορτίου

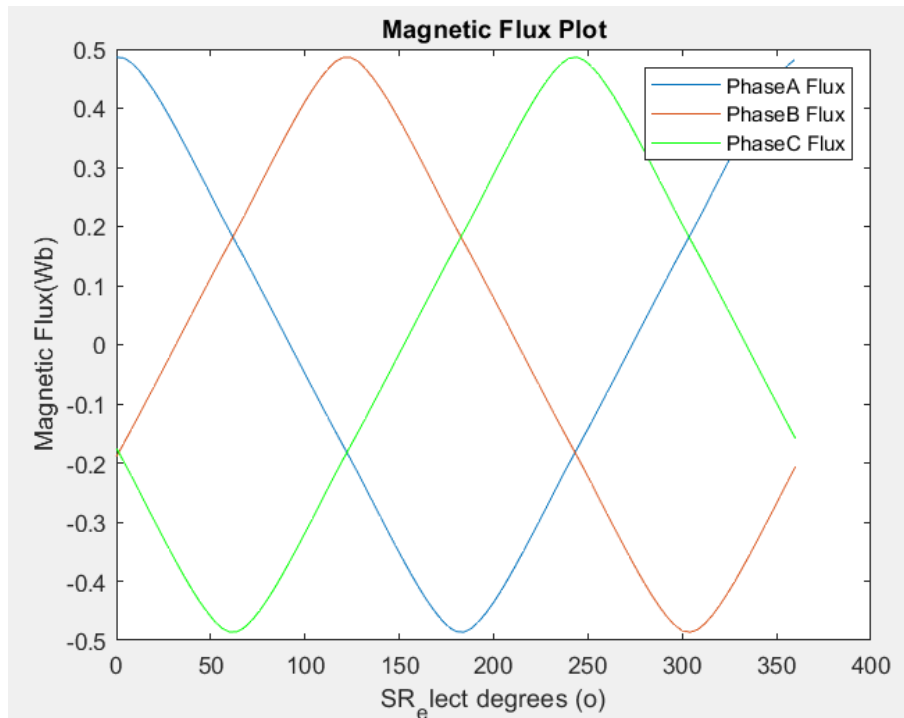
Για να πραγματοποιήσουμε μία δοκιμή κενού φορτίου θέτουμε μηδενικά ρεύματα στο πρωτεύον και με σταθερό μικρό βήμα προς τα δεξιά μετατοπίζουμε το δευτερεύον για μία ηλεκτρική περίοδο, αποθηκεύοντας παράλληλα για κάθε προσομοίωση τις τιμές των μαγνητικών ροών στα τυλίγματα. Οι δύο άξονες θα έχουν ευθυγραμμιστεί όταν μεγιστοποιηθεί η μαγνητική ροή της φάσης του τυλίγματος A, οπότε αυτή η θέση αποθηκεύεται και αποτελεί το εναρκτήριο σημείο για κάθε σύγχρονη περιστροφή. Σε αυτή τη θέση θέτουμε στο μετασχηματισμό Park (ενότητα 3.15) $\chi = 0$ καθώς η απόσταση των δύο αξόνων είναι μηδενική.

4.5.1 Υπολογισμός Μαγνητικής Ροής Κενού Φορτίου

Καθώς εκτελούμε τη δοκιμή κενού φορτίου αποθηκεύουμε τη μαγνητική ροή κάθε φάσης των τυλιγμάτων σε έναν πίνακα. Επειδή οι αγωγοί του πρωτεύοντος δε διαρρέονται από ρεύμα η μετρούμενη ροή οφείλεται εξ ολοκλήρου στους μόνιμους μαγνήτες του δευτερεύοντος γι' αυτό και η κατανομή του μαγνητικού πεδίου είναι ομοιόμορφη.

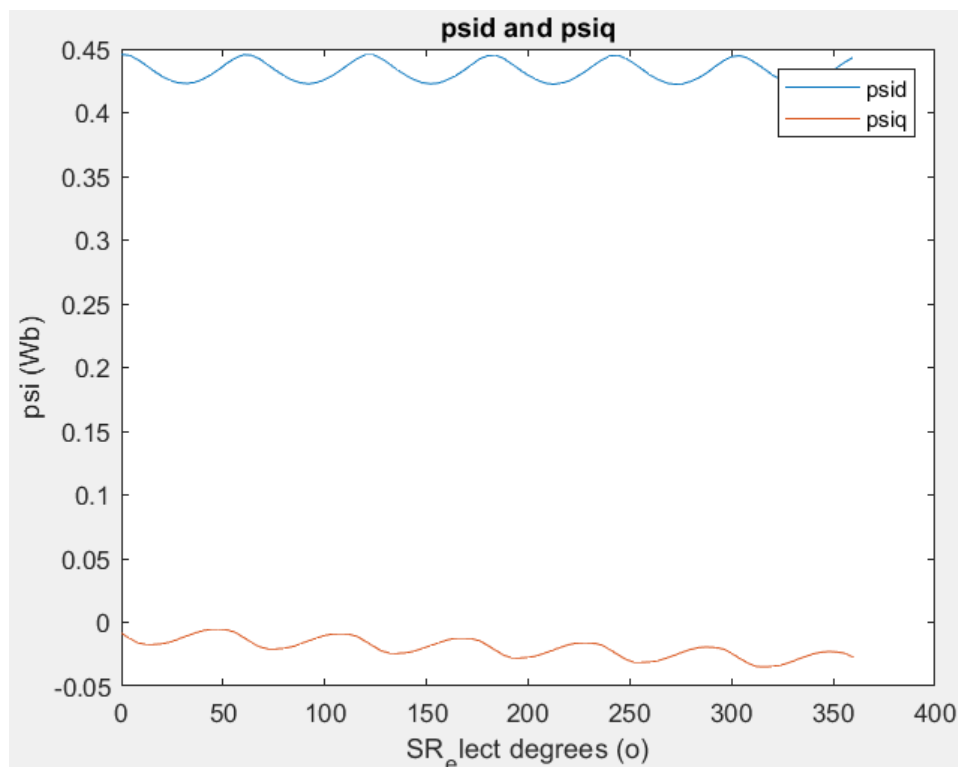


Εικόνα 4.11: Κατανομή του μαγνητικού πεδίου για κενό φορτίο κατά την έναρξη της προσομοίωσης



Διάγραμμα 4.1: Πεπλεγμένη Μαγνητική Ροή (flux linkage) των τριών φάσεων για δοκιμή κενού φορτίου

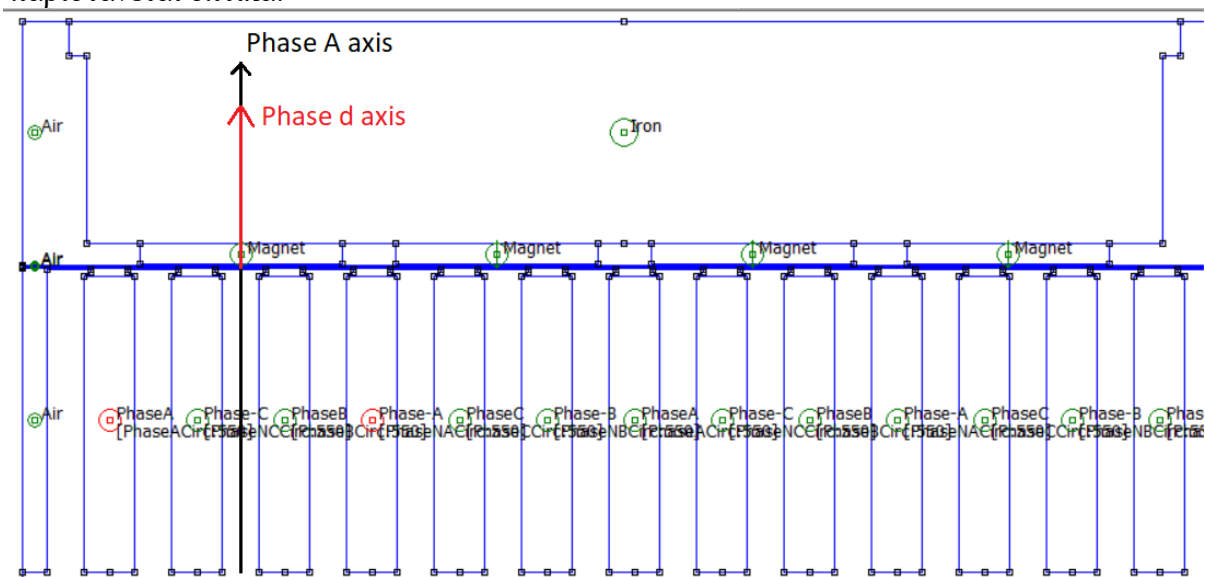
Για να επιβεβαιώσουμε την ορθή ευθυγράμμιση του d άξονα και του άξονα της φάσης A εφαρμόζουμε το μετασχηματισμό Park στη πεπλεγμένη μαγνητική της εικόνας 4.13.



Διάγραμμα 4.2: Πεπλεγμένη Μαγνητική ροή μετασχηματισμένη στο d-q πλαίσιο

Παρατηρώ ότι η ροή του άξονα q είναι σχεδόν μηδενική, ενώ είναι μέγιστη στον άξονα d, όπως ήταν δηλαδή αναμενόμενο στη περίπτωση ευθυγράμμισης των δύο αξόνων. Η ελαφριά κυμάτωση που φαίνεται

οφείλεται στη συνιστώσα εκτυπότητας καθώς η μηχανή διαθέτει έκτυπους πόλους. Η ευθυγράμμιση των αξόνων παριστάνεται οπτικά:



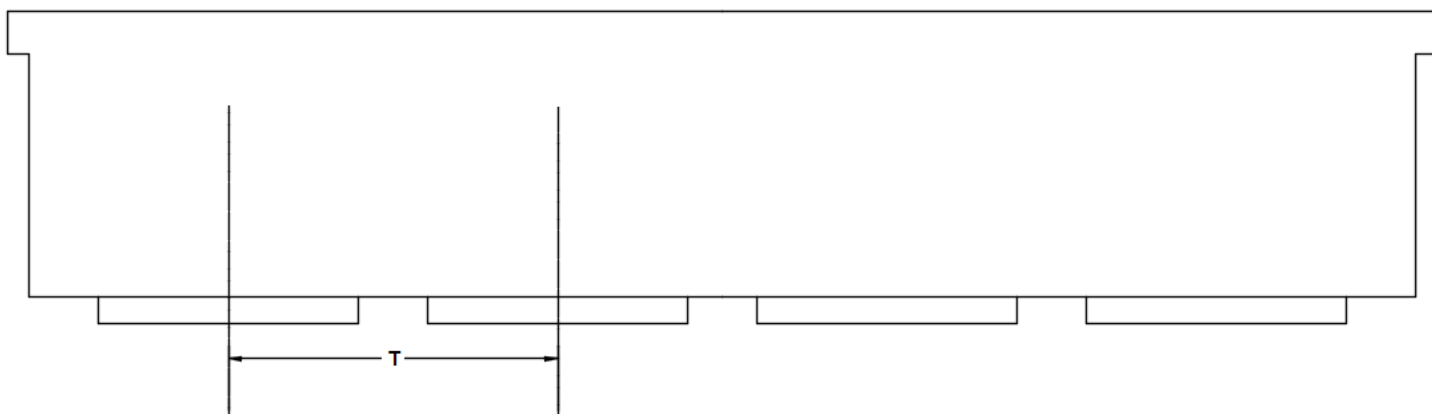
Εικόνα 4.12: Η ευθυγράμμιση των αξόνων d και της φάσης A του τυλίγματος

4.5.2 Υπολογισμός Δύναμης Ευθυγράμμισης

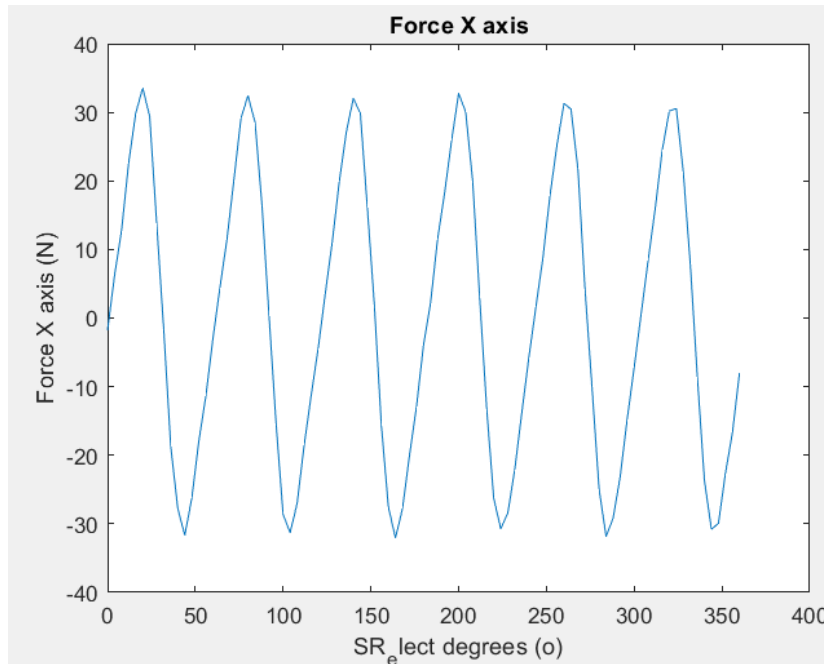
Στη προσομοίωση κενού φορτίου μετρήθηκε και η οριζόντια δύναμη που ασκείται ανάμεσα στο πρωτεύον και το δευτερεύον, η οποία όπως αναφέραμε νωρίτερα λέγεται δύναμη ευθυγράμμισης ή cogging force [38]. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι για τον υπολογισμό της δύναμης ευθυγράμμισης δεν αρκεί να θέσουμε μηδενική πυκνότητα ρεύματος στους αγωγούς και να μετακινούμε με μικρό βήμα το δρομέα. Το βήμα του δρομέα καθορίζεται από τη ταχύτητά του η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$u_s = 2 \cdot f \cdot \tau \quad (4.1)$$

Η συχνότητα είναι 50 Hz ενώ το pole pitch μετρήθηκε 37,5 mm. Επομένως η ονομαστική ταχύτητα της μηχανής είναι 3.75 m/s. Για ονομαστική λοιπόν ταχύτητα σε κάθε ηλεκτρική μοίρα το δευτερεύον μετατοπίζεται κατά 0,21mm. Μετρώντας έτσι την οριζόντια δύναμη που ασκείται μεταξύ πρωτεύοντος και δευτερεύοντος εξαιτίας των εναλλαγών δοντιών και αέρα προκύπτει η κυματομορφή της εικόνας 4.17.



Εικόνα 4.13: Το Pole pitch τ της υπό μελέτη μηχανής



Διάγραμμα 4.3: Δύναμη ευθυγράμμισης σε συνάρτηση της ηλεκτρικής γωνίας

4.5.3 Υπολογισμός ΗΕΔ Κενού Φορτίου

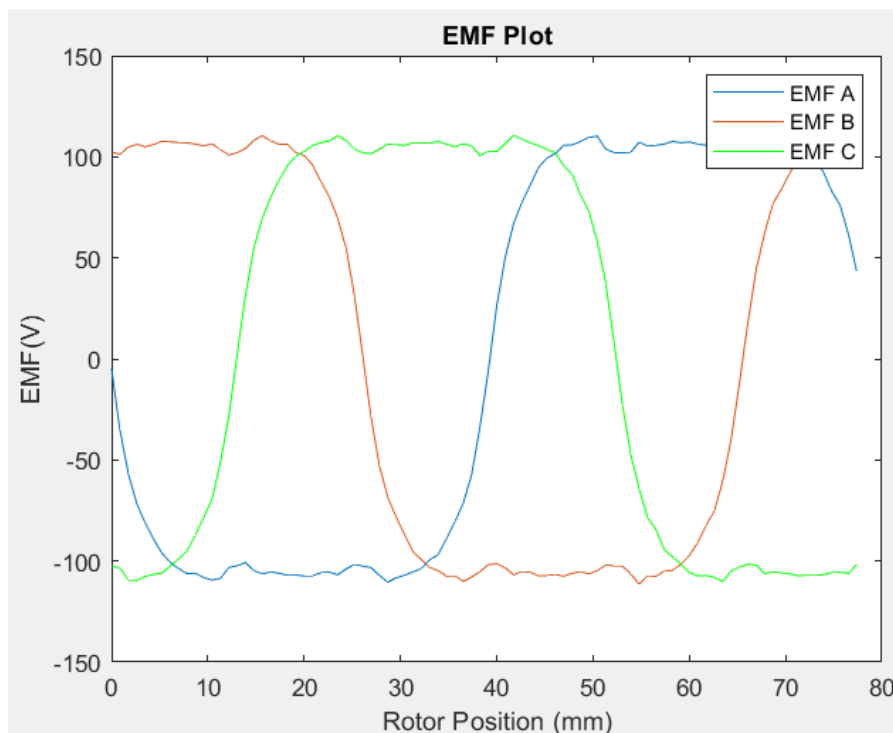
Για να υπολογιστεί η ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) που αναπτύσσεται σε κάθε λειτουργική κατάσταση της μηχανής, ξεκινάμε με τη λειτουργία σε συνθήκες κενού φορτίου. Άλλωστε η ΗΕΔ δεν εξαρτάται άμεσα από την ένταση του ρεύματος, αλλά κυρίως από το μαγνητικό πεδίο της μηχανής.

Για να υπολογίσουμε την ΗΕΔ της μηχανής αξιοποιούμε τον νόμο του Faraday σύμφωνα με τον οποίο:

$$e(x) = \frac{d\Lambda(x)}{dt} = \frac{d\Lambda(x)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{d\Lambda(x)}{dx} \cdot u_s \quad (4.2)$$

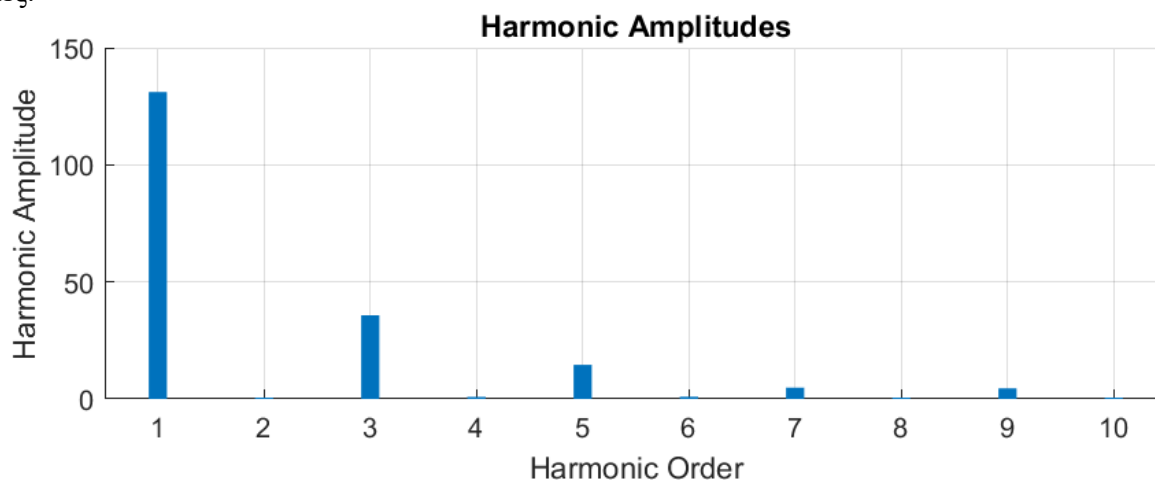
Παρόλο που αρχικά για να υπολογίσουμε την ΗΕΔ απαιτούνταν η χρονική παραγωγή της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής Λ , με το μαθηματικό «τρίκ» που φαίνεται στην εξίσωση 4.2 μπορούμε να εφαρμόσουμε παραγωγή ως προς το χώρο. Δεδομένου ότι η ανάλυση στο λογισμικό FEMM είναι μαγνητοστατική, και δεν μπορούσαν να προσομοιωθούν δύο διαδοχικές χρονικές στιγμές, το γεγονός ότι μπορούμε να επιτύχουμε το ίδιο αποτέλεσμα μεταβάλλοντας τις τιμές των ρευμάτων και τη θέση του δευτερεύοντος είναι ιδιαίτερα σημαντικό.

Έτσι για μία πλήρη ηλεκτρική περίοδο και ονομαστική ταχύτητα, η τιμή της επαγόμενης ΗΕΔ κάθε φάσης υπολογίστηκε ως εξής:



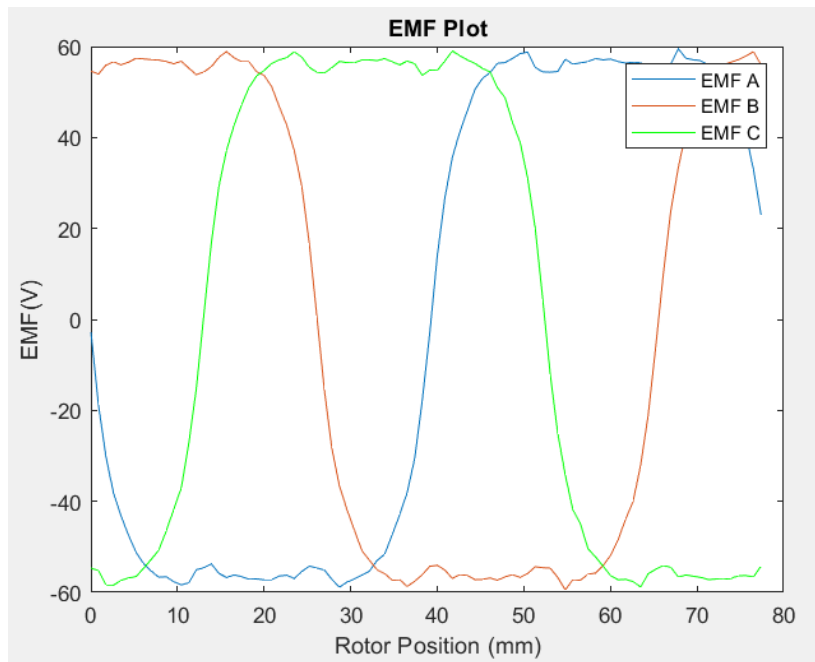
Διάγραμμα 4.4: Επαγόμενη ΗΕΔ σε κενό φορτίο για u_s 3,75 m/s

Με τη χρήση της εντολής fft του Matlab γίνεται η αρμονική ανάλυση που φαίνεται παρακάτω, για τις 10 πρώτες αρμονικές. Παρατηρούμε μεγάλο πλάτος στις αρμονικές 3^{ης} τάξης και 5^{ης} τάξης. Αυτό οφείλεται στη γεωμετρία του διακένου και στους έκτυπους μαγνήτες, συνεπώς οι εν λόγω αρμονικές είναι χωρικές αρμονικές.

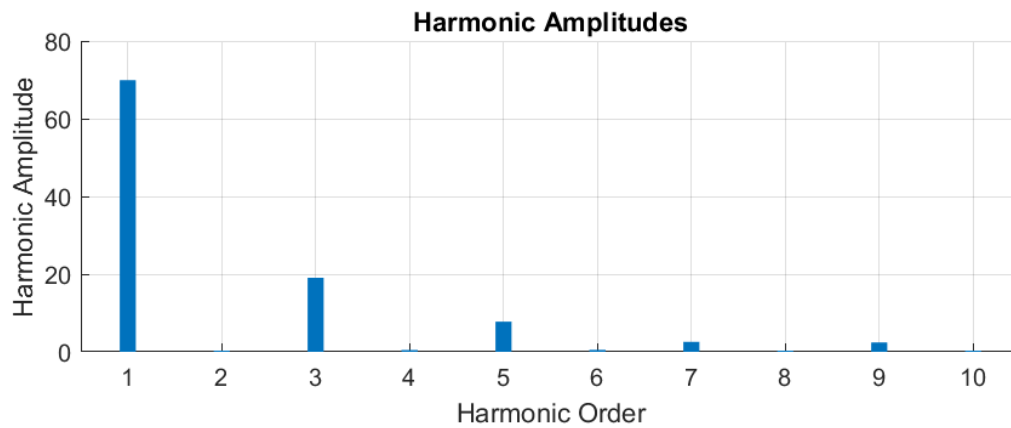


Διάγραμμα 4.5: Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου της ΗΕΔ της φάσης Α

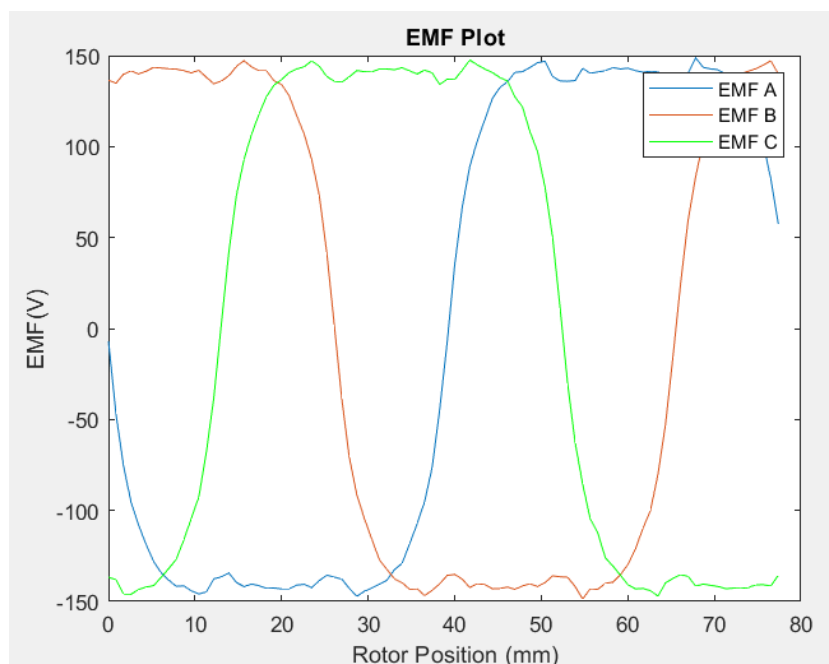
Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιήθηκε δύο ακόμα φορές για ταχύτητες 2 m/s και 5 m/s ώστε να μπορούν να συγκριθούν οι ΗΕΔ μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



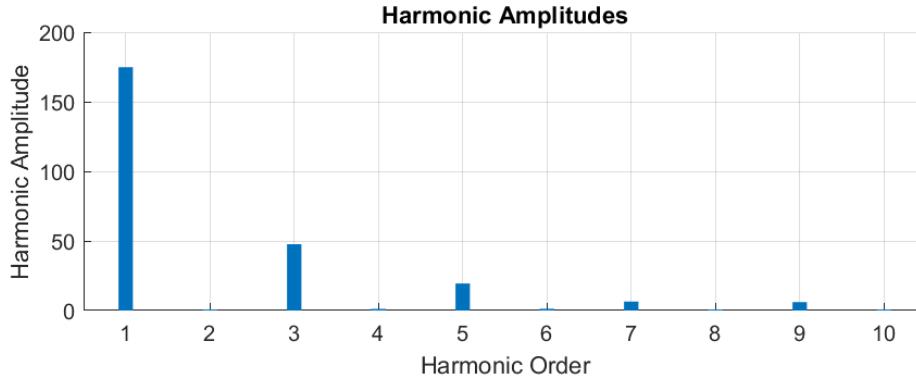
Διάγραμμα 4.6: Επαγόμενη ΗΕΔ σε κενό φορτίο για u_s 2 m/s



Διάγραμμα 4.7: Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου της ΗΕΔ της φάσης Α



Διάγραμμα 4.8: Επαγόμενη ΗΕΔ σε κενό φορτίο για u_s 5 m/s



Διάγραμμα 4.9: Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου της ΗΕΔ της φάσης Α

Οι μοναδικές διαφοροποιήσεις ανάμεσα στις κυματομορφές της ΗΕΔ για διαφορετικές ταχύτητες είναι το μέγιστο πλάτος της (και κατ' επέκταση η RMS τιμή της), το οποίο είναι ανάλογο της ταχύτητας λειτουργίας της, όπως προκύπτει και από τη σχέση 4.2.

4.5.4 Υπολογισμός Αυτεπαγωγών Ορθού και Κάθετου Άξονα

Όπως φαίνεται από τη σχέση 3.20 η διαφορά $L_d - L_q$ είναι σημαντική καθώς καθορίζει για ποιες τιμές της γωνίας δ μεγιστοποιείται η οριζόντια δύναμη (thrust). Αναλυτικότερα διακρίνουμε 3 περιπτώσεις[11]:

- $L_d = L_q$, σε αυτή τη περίπτωση μηδενίζεται η συνιστώσα εκτυπότητας, άρα η οριζόντια δύναμη μεγιστοποιείται για $\delta = 90^\circ$.
- $L_d < L_q$, σε αυτή τη περίπτωση η οριζόντια δύναμη μεγιστοποιείται για $\delta > 90^\circ$.
- $L_d > L_q$, σε αυτή τη περίπτωση η οριζόντια δύναμη μεγιστοποιείται για $\delta < 90^\circ$.

Για τον ακριβή υπολογισμό τους ακολουθώ την εξής διαδικασία [39]:

Ευθυγραμμίζω τους άξονες της φάσης Α και του ορθού άξονα d. Στη συνέχεια βάζω στη θέση των μαγνητών αέρα ώστε να μην επηρεάζουν τη μαγνητική ροή που παράγουν τα τυλίγματα του πρωτεύοντος. Κατόπιν επιβάλλω ονομαστικό ρεύμα μόνο στον άξονα d (και μηδενικό στον άξονα q) και μετρώ την πεπλεγμένη μαγνητική ροή λ_d με τη βοήθεια του FEMM. Η αυτεπαγωγή ορθού άξονα είναι:

$$L_d = \frac{\lambda_d}{I_d} = 0.17841 \text{ H}$$

Η ονομαστική πυκνότητα ρεύματος της μηχανής είναι $J_n = 3.93 \text{ A/mm}^2$, οπότε από τη σχέση 3.11 επιλέγοντας συντελεστή πληρότητας $ff = 0.6$, για επιφάνεια αύλακος $A_{slot} = 329.42 \text{ mm}^2$ και $N = 330$ ελίσματα ανά αύλακα προκύπτει:

$$I_a = 2.3538 \text{ A}$$

Επειδή όμως ο άξονας της φάσης Α είναι ευθυγραμμισμένος με τον άξονα d ισχύει:

$$I_a = I_d = 2.3538 \text{ A}$$

Για τον υπολογισμό της αυτεπαγωγής του κάθετου άξονα ακολουθώ την αντίστοιχη διαδικασία, δηλαδή μηδενίζω το ρεύμα στον άξονα d και επιβάλλω ονομαστικό στον άξονα q μετρώντας παράλληλα την πεπλεγμένη μαγνητική ροή λ_q με τη βοήθεια του FEMM. Επομένως η αυτεπαγωγή του κάθετου άξονα είναι:

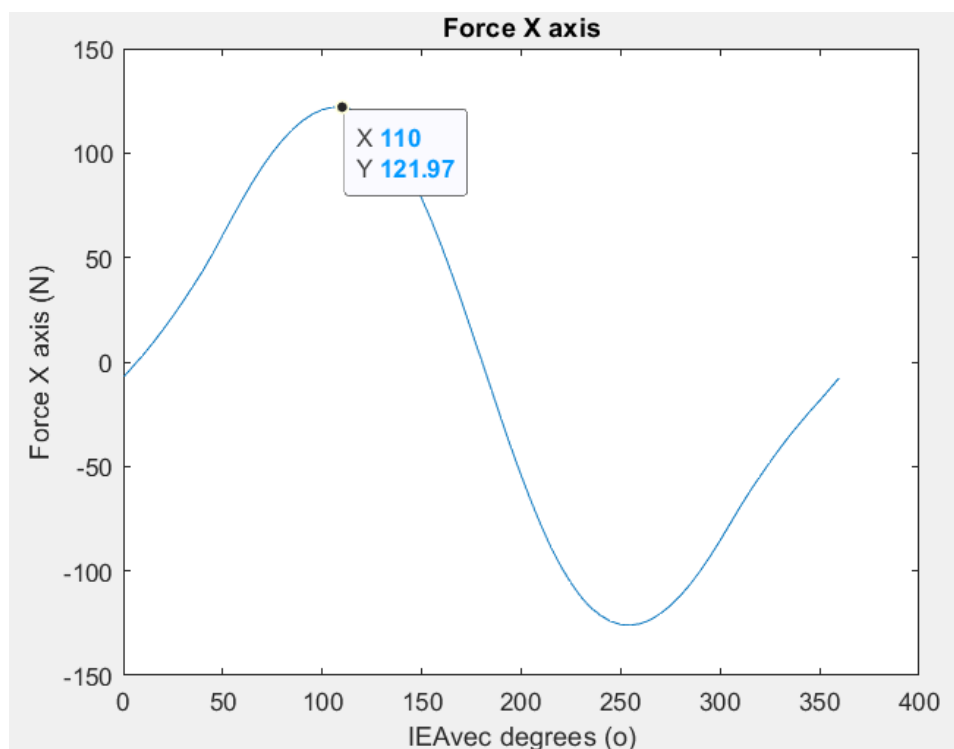
$$L_q = \frac{\lambda_q}{I_q} = 0.18 \text{ H}$$

Παρατηρούμε ότι το L_q είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από το L_d επομένως αναμένουμε η οριζόντια δύναμη να μεγιστοποιείται για $\delta > 90^\circ$.

Λειτουργία Υπό Φορτίο

Για να διερευνήσουμε τη λειτουργία της μηχανής υπό φορτίο απαραίτητος είναι ο σχεδιασμός της καμπύλης γωνίας – δύναμης. Η πιο ενδιαφέρουσα λειτουργική κατάσταση μιας μηχανής είναι αυτή στην οποία η οριζόντια δύναμη που παράγει είναι μέγιστη, επομένως αναγκαίος είναι ο προσδιορισμός της γωνίας φορτίου δ (load angle) για την οποία συμβαίνει αυτό. Βάσει βιβλιογραφίας [9] αυτή η γωνία είναι στις 90° ωστόσο όπως είδαμε στην ενότητα 4.5.4 αφού ισχύει ότι $L_d < L_q$ αναμένουμε η γωνία δ να είναι λίγο μεγαλύτερη εξαιτίας της δύναμης που παράγεται από την εκτυπότητα των μόνιμων μαγνητών του δευτερεύοντος.

Ο τρόπος εύρεσής της είναι μέσω της προσομοίωσης με σταθερό δευτερεύον. Αναλυτικότερα σχεδιάζουμε τη γεωμετρία του προβλήματος μόνο κατά την πρώτη επίλυση, θέτουμε ονομαστικό ρεύμα στα τυλίγματα του πρωτεύοντος και ευθυγραμμίζουμε τον άξονα της φάσης A με τον άξονα d. Στη συνέχεια μέσω ολίσθησης φάσης στα ρεύματα των τυλιγμάτων προσομοιώνεται η μεταβολή της γωνίας φορτίου δ της μηχανής. Απαραίτητη προϋπόθεση ώστε να εκτελεστεί σωστά η εν λόγω προσομοίωση είναι η διατήρηση της ημιτονοειδούς κατανομής των ρευμάτων των τριών φάσεων. Έτσι σε κάθε στιγμιότυπο, για κάθε γωνία δ επιλύεται το μαγνητοστατικό πρόβλημα και υπολογίζεται η οριζόντια δύναμη (thrust) που παράγεται στο διάκενο της μηχανής. Η καμπύλη γωνίας φορτίου- οριζόντιας δύναμης φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



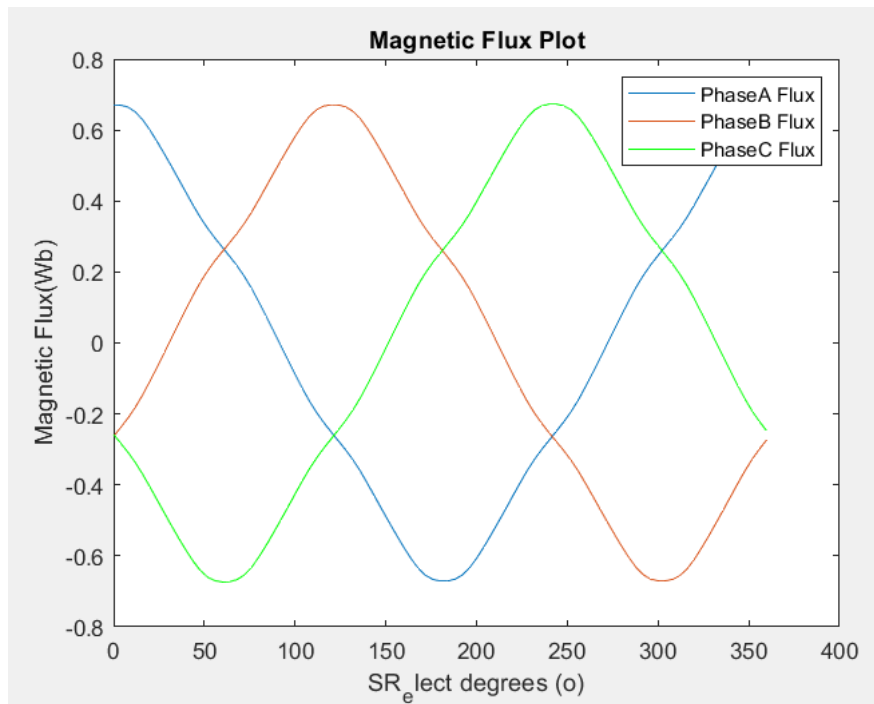
Διάγραμμα 4.10: Η Καμπύλη Γωνίας Φορτίου – Οριζόντιας Δύναμης. Η μέγιστη τιμή της δύναμης είναι 121.97 N στη γωνία $\delta = 110^\circ$ για ονομαστικό ρεύμα

Για λόγους πληρότητας στη παρούσα εργασία τα σημαντικότερα μεγέθη δε θα υπολογιστούν μόνο για τη λειτουργική κατάσταση $[J_n, 110^\circ]$ Αλλά και για τις:

- $J = J_n, \delta = 0^\circ$
- $J = J_n, \delta = 90^\circ$

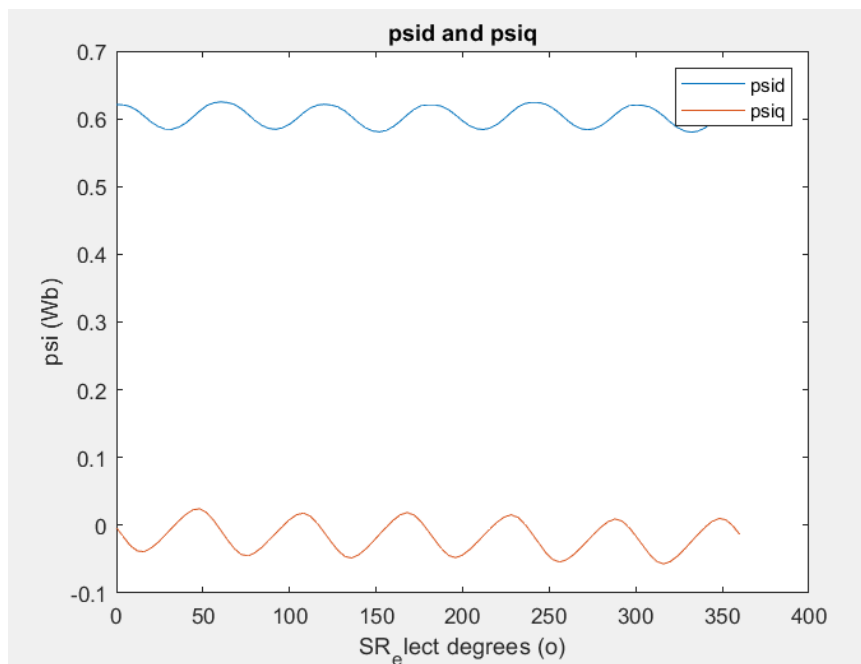
4.5.5 Υπολογισμός Μαγνητικής Ροής για $J = J_n$ και $\delta = 0^\circ$

Για τον υπολογισμό της μαγνητικής ροής σε αυτή τη λειτουργική κατάσταση και για ονομαστική ταχύτητα εκτελούμε μία σύγχρονη περιστροφή θέτοντας $J = J_n$ και $\delta = 0^\circ$.



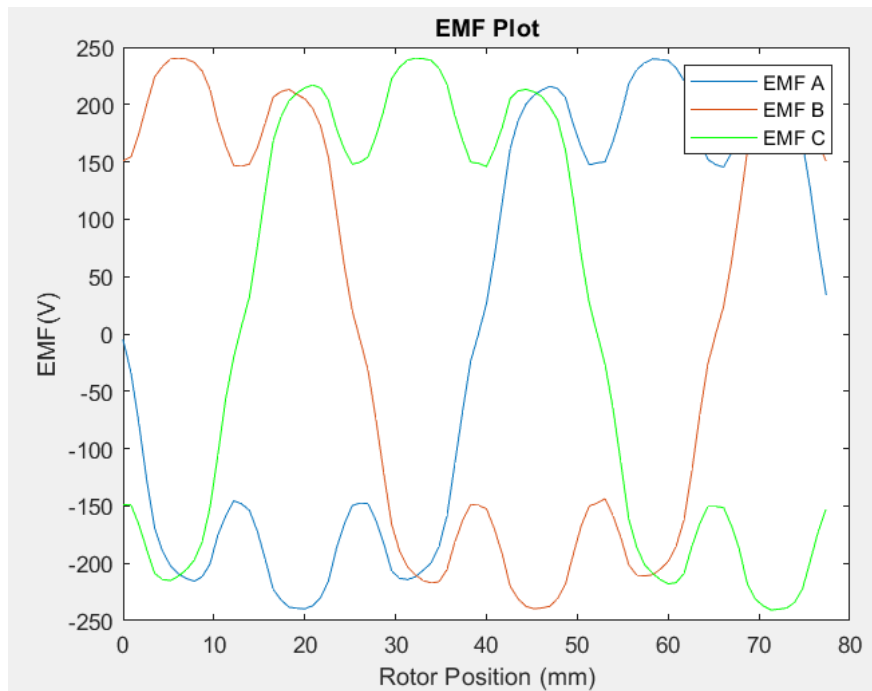
Διάγραμμα 4.11: Πεπλεγμένη Μαγνητική Ροή (flux linkage) των τριών φάσεων στη λειτουργική κατάσταση $J = J_n$ και $\delta = 0^\circ$

Ομοίως με το πείραμα κενού φορτίου μεταφέρουμε τις πεπλεγμένες μαγνητικές ροές στο d-q πλαίσιο ώστε να ελέγξουμε την ευθυγράμμιση των δύο αξόνων. Η μικρή κυμάτωση που παρατηρείται στη πεπλεγμένη μαγνητική ροή οφείλεται στη συνιστώσα εκτυπότητας καθώς οι μαγνήτες του δευτερεύοντος είναι έκτυποι.



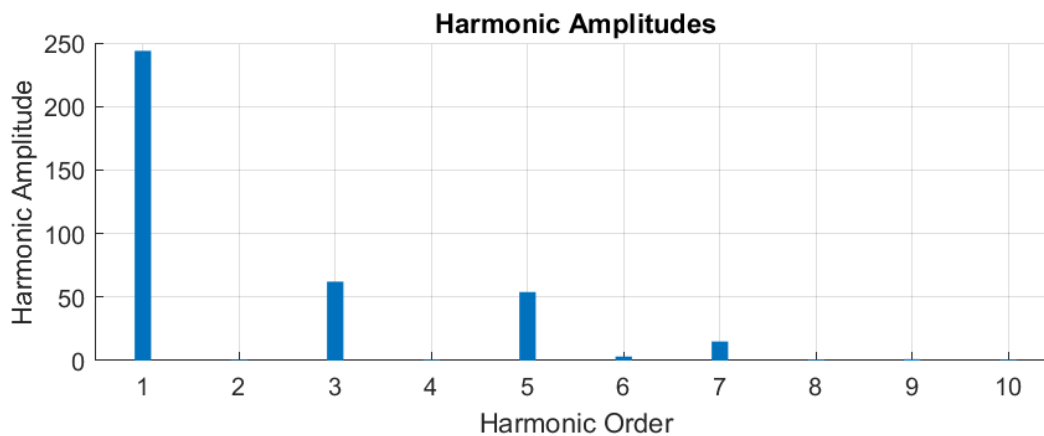
Διάγραμμα 4.12: Πεπλεγμένη Μαγνητική ροή μετασχηματισμένη στο d-q πλαίσιο

4.5.6 Υπολογισμός ΗΕΔ για $J = J_n$ και $\delta = 0^\circ$



Διάγραμμα 4.13: Επαγόμενη ΗΕΔ για $J = J_n$ και $\delta = 0^\circ$

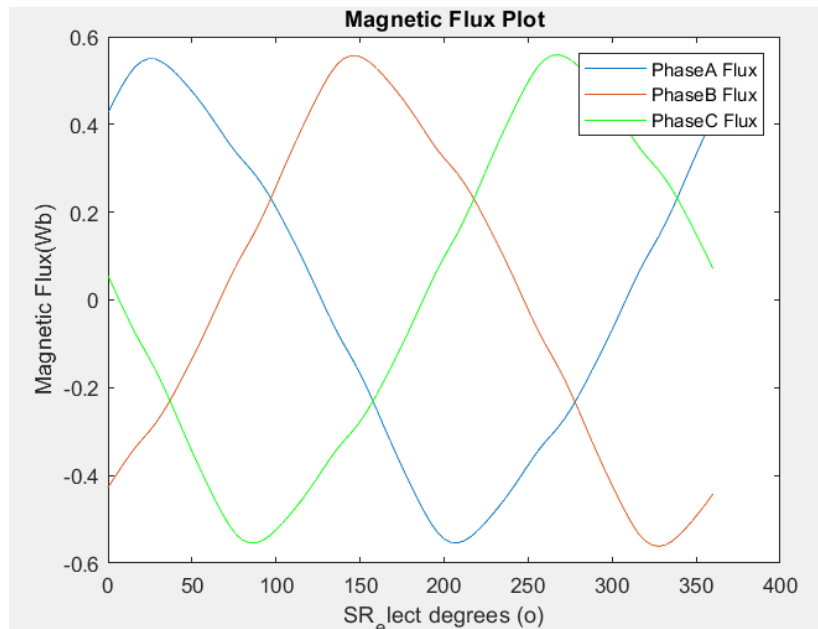
Οι «λοβοί» που παρατηρούνται στις κυματομορφές της ΗΕΔ οφείλονται στις υψηλές χωρικές αρμονικές τρίτης και πέμπτης τάξης, οι οποίες με τη σειρά τους προκαλούνται από τη γεωμετρία του διακένου καθώς τα μεγάλα ανοίγματα των αυλάκων δημιουργούν απώλεια ροής εξαιτίας της σκέδασης.



Διάγραμμα 4.14: Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου της ΗΕΔ της φάσης Α

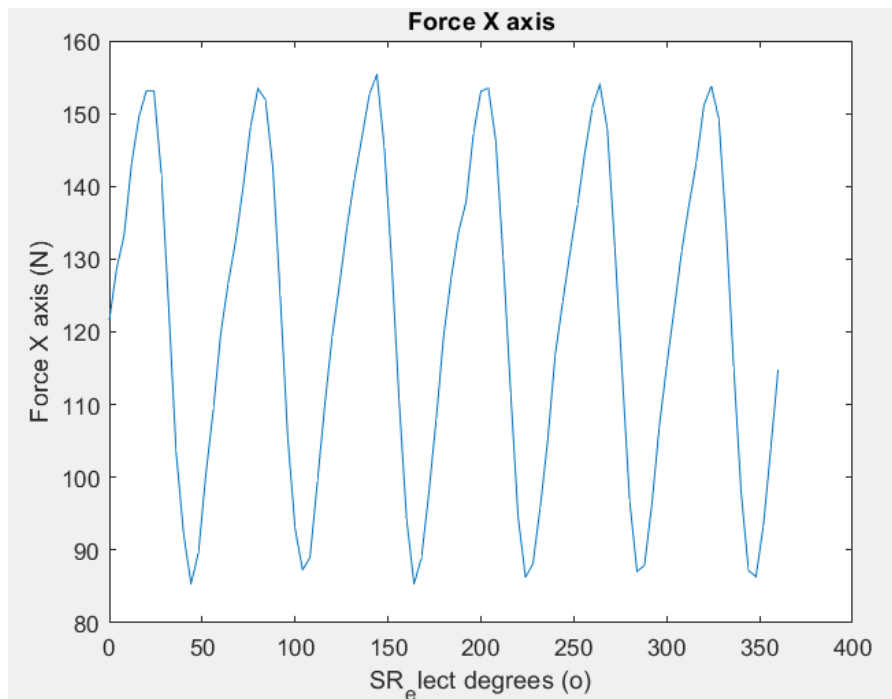
4.5.7 Υπολογισμός Μαγνητικής Ροής για $J = J_n$ και $\delta = 90^\circ$

Για τον υπολογισμό της μαγνητικής ροής σε αυτή τη λειτουργική κατάσταση και για ονομαστική ταχύτητα εκτελούμε μία σύγχρονη περιστροφή θέτοντας $J = J_n$ και $\delta = 90^\circ$.



Διάγραμμα 4.15: Πεπλεγμένη Μαγνητική Ροή (flux linkage) των τριών φάσεων στη λειτουργική κατάσταση $J = J_n$ και $\delta = 90^\circ$

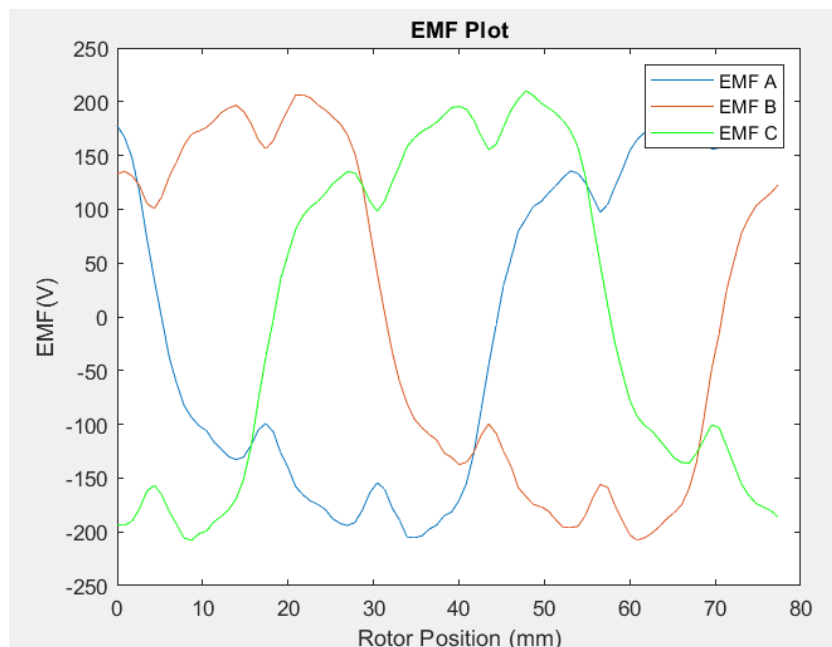
4.5.8 Υπολογισμός Οριζόντιας Δύναμης για $J = J_n$ και $\delta = 90^\circ$



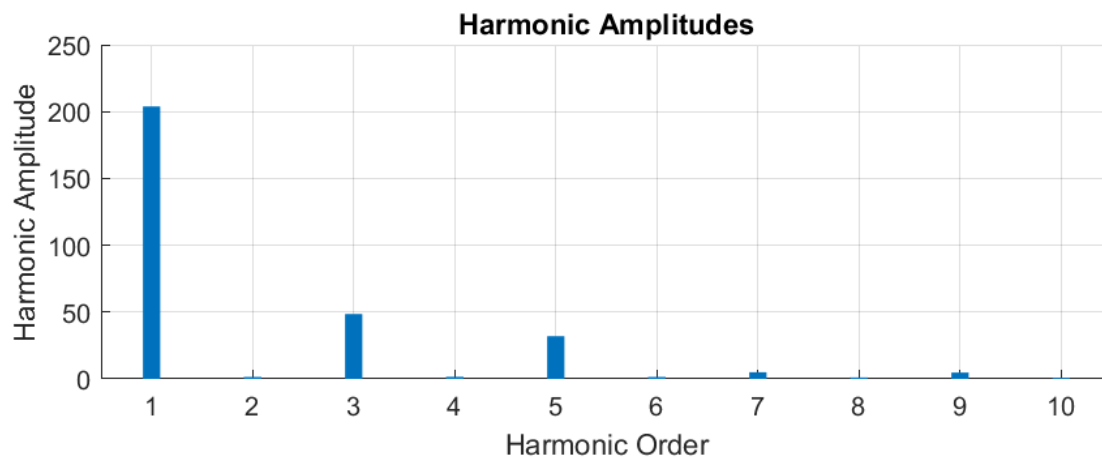
Διάγραμμα 4.16: Οριζόντια Δύναμη (Thrust) στη λειτουργική κατάσταση $J = J_n$ και $\delta = 90^\circ$

Η μέγιστη δύναμη που υπολογίστηκε για γωνία φορτίου $\delta = 90^\circ$ είναι $F_x = 154.38 \text{ N}$

4.5.9 Υπολογισμός ΗΕΔ για $J = J_n$ και $\delta = 90^\circ$

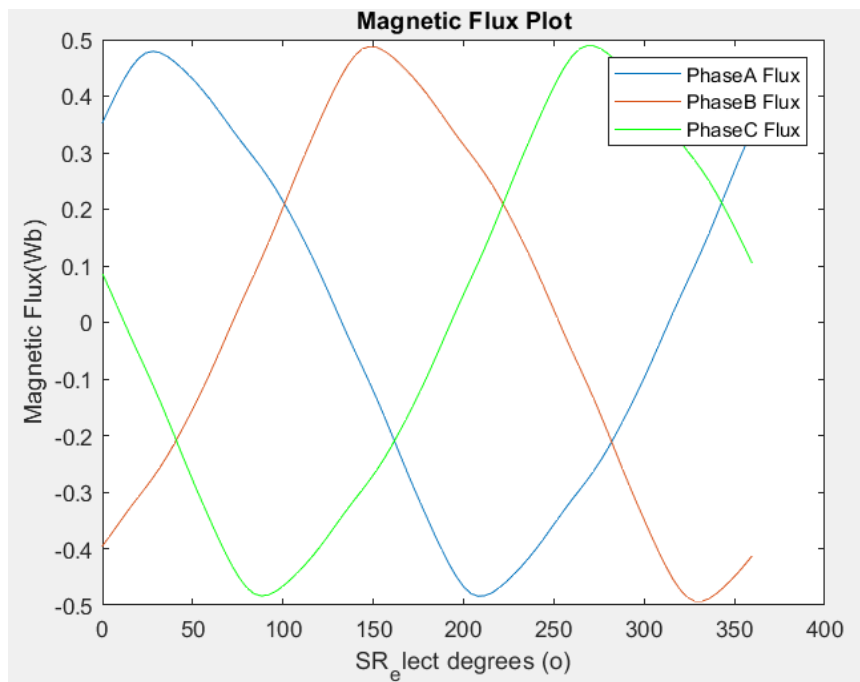


Διάγραμμα 4.17: Επαγόμενη ΗΕΔ για $J = J_n$ και $\delta = 90^\circ$



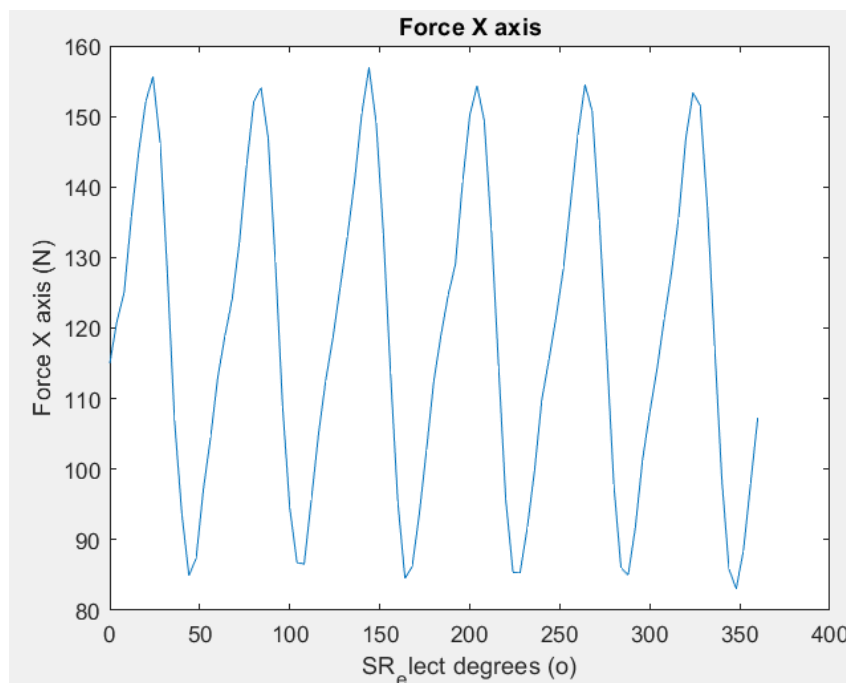
Διάγραμμα 4.18: Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου της ΗΕΔ της φάσης Α

4.5.10 Υπολογισμός Μαγνητικής Ροής για $J = J_n$ και $\delta = 110^\circ$



Διάγραμμα 4.19: Πεπλεγμένη Μαγνητική Ροή (flux linkage) των τριών φάσεων στη λειτουργική κατάσταση $J = J_n$ και $\delta = 110^\circ$

4.5.11 Υπολογισμός Οριζόντιας Δύναμης για $J = J_n$ και $\delta = 110^\circ$

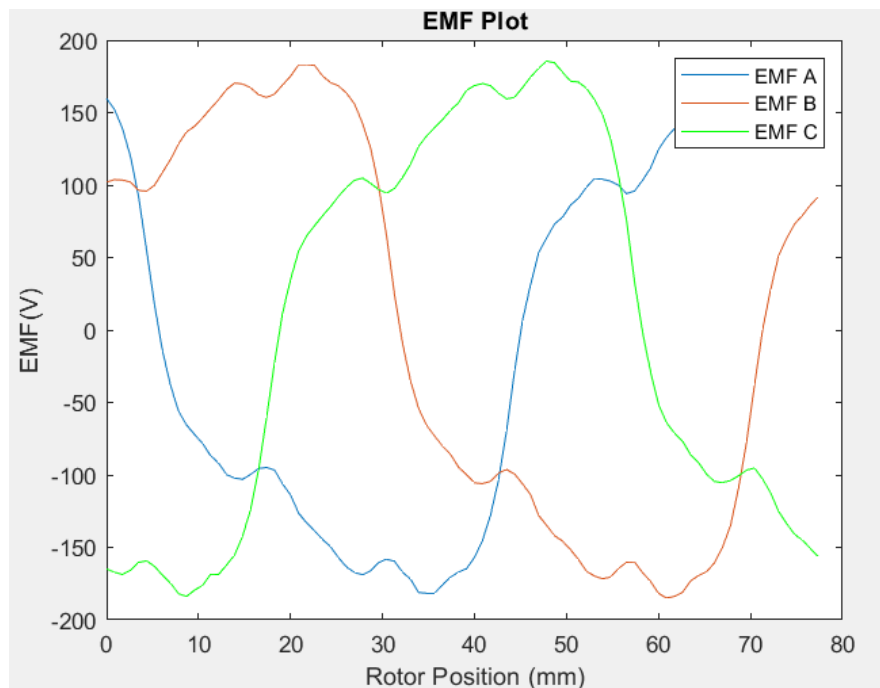


Διάγραμμα 4.20: Οριζόντια Δύναμη (Thrust) στη λειτουργική κατάσταση $J = J_n$ και $\delta = 110^\circ$

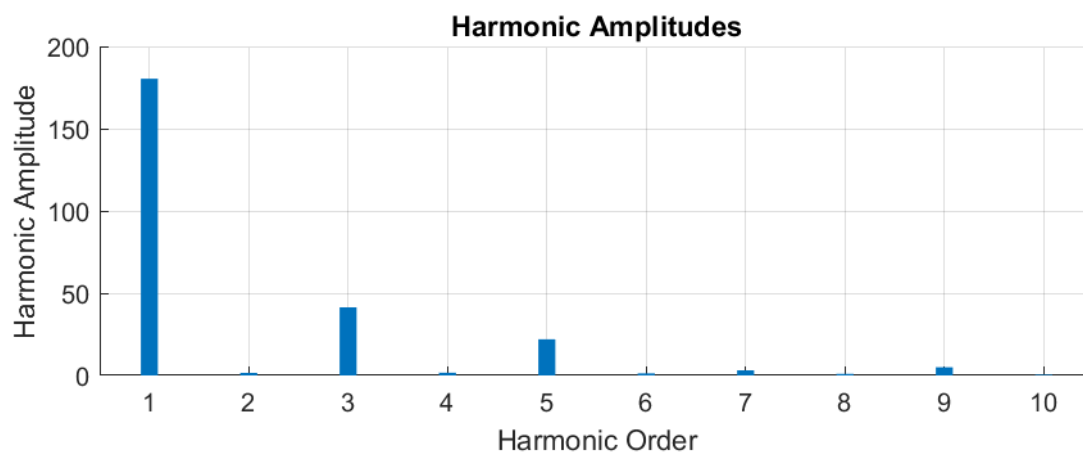
Η μέγιστη δύναμη που υπολογίστηκε για γωνία φορτίου $\delta = 110^\circ$ είναι $F_x = 155.366 \text{ N}$

Παρατηρούμε ότι συγκριτικά με την οριζόντια δύναμη που υπολογίστηκε για γωνία φορτίου $\delta = 90^\circ$ είναι μεγαλύτερη κατά 0.986 N, όπως αναμέναμε από την ανάλυση στο υποκεφάλαιο 4.5.4. Η διαφορά ανάμεσα στις δύο λειτουργικές καταστάσεις είναι σχεδόν αμελητέα καθώς οι αυτεπαγωγές L_d και L_q είναι πολύ κοντά μεταξύ τους.

4.5.12 Υπολογισμός ΗΕΔ για $J = J_n$ και $\delta = 110^\circ$



Διάγραμμα 4.21: Επαγόμενη ΗΕΔ για $J = J_n$ και $\delta = 110^\circ$



Διάγραμμα 4.22: Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου της ΗΕΔ της φάσης Α

4.5.13 Υπολογισμός Απωλειών

Οι συνολικές απώλειες της μηχανής είναι το άθροισμα των απωλειών χαλκού, πυρήνα, μόνιμων μαγνητών, μηχανικές (εξαιτίας της τριβής μεταξύ δευτερεύοντος και ρουλεμάν και ανεμισμών)[40] και απωλειών λόγω επιδερμικού φαινομένου και φαινομένου γειτνίασης.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας οι μηχανικές απώλειες θα αγνοηθούν καθώς για τον ακριβή υπολογισμό τους απαιτείται η χρήση τρισδιάστατων μοντέλων.

Απώλειες Χαλκού

Οι απώλειες χαλκού θα υπολογιστούν όπως αναλύθηκε στην ενότητα 3.6 με βάση την εξίσωση 3.10. Η αντίσταση χαλκού υπολογίζεται μέσω των 3.12 και 3.13 ως εξής:

$$R_{Cu} = \rho_{20^{\circ}\text{C}} \cdot (1 + \alpha \cdot (\theta - 20^{\circ}\text{C})) \cdot \frac{L_{\phi\acute{\alpha}\sigma\eta\varsigma}}{A_{Wire}}$$

Θεωρώντας ως θερμοκρασία λειτουργίας τους 100°C , ως ειδική αντίσταση του χαλκού στους 20°C $\rho_{20^{\circ}\text{C}} = 1.75 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ και ως συντελεστή θερμοκρασιακής μεταβολής $\alpha = 0.004^{\circ}\text{C}^{-1}$ έχουμε:

$$R_{Cu} = \rho_{20^{\circ}\text{C}} \cdot (1 + \alpha \cdot (\theta - 20^{\circ}\text{C})) \cdot \frac{L_{\phi\acute{\alpha}\sigma\eta\varsigma}}{A_{Wire}} = 2.31 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m} \cdot \frac{L_{\phi\acute{\alpha}\sigma\eta\varsigma}}{A_{Wire}}$$

Για το εμβαδόν χαλκού αύλακος έχουμε (θεωρώντας έναν σχετικά αισιόδοξο συντελεστή πληρότητας $ff=0.6$):

$$A_{Cu} = ff \cdot A_{slot} = 0.6 \cdot 329.42 = 197.652 \text{ mm}^2$$

$$A_{Wire} = \frac{A_{Cu}}{N} = 0.59895 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Τέλος με τη συνδρομή των 3.14 και 3.15 το $L_{\phi\acute{\alpha}\sigma\eta\varsigma}$ υπολογίζεται:

$$L_{\phi\acute{\alpha}\sigma\eta\varsigma} = \frac{Q}{m} \cdot N \cdot 2 \cdot (\text{depth} + \pi \cdot 0.03) = \frac{24}{3} \cdot 330 \cdot 2 \cdot (30 + \pi \cdot 0.03) = 158.897 \text{ m}$$

Άρα:

$$R_{Cu} = 6.13 \Omega$$

Το ρεύμα I υπολογίζεται από την 3.11:

$$I = \frac{J \cdot ff \cdot A_{slot}}{N} = 1.6648 \text{ A}$$

Επομένως οι απώλειες χαλκού θεωρώντας θερμοκρασία της μηχανής 100°C είναι:

$$P_{Cu} = 3 \cdot I^2 \cdot R_{Cu} \cong 50.97 \text{ W}$$

Απώλειες Πυρήνα

Οι απώλειες πυρήνα θα υπολογιστούν όπως αναλύθηκε στην ενότητα 3.6 με βάση το μοντέλο του Jordan και πιο συγκεκριμένα με την εξίσωση 3.9. Οι συντελεστές k_h και k_e προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα μέσω curve fitting. Μία καλή προσέγγισή τους για λαμαρίνες πάχους 0.35mm είναι:

$$k_h = 143 \frac{W}{\text{m}^3 \cdot T^2 \cdot \text{Hz}}$$

$$k_e = 0.53 \frac{W}{\text{m}^3 \cdot T^2 \cdot \text{Hz}^2}$$

Επομένως η σχέση 3.9 γράφεται:

$$P_{fe} = P_h + P_e = \sum_{m=1}^{\infty} 150.526 \cdot m \cdot f \cdot B_m^2 + 0.558 \cdot m^2 \cdot f^2 \cdot B_m^2$$

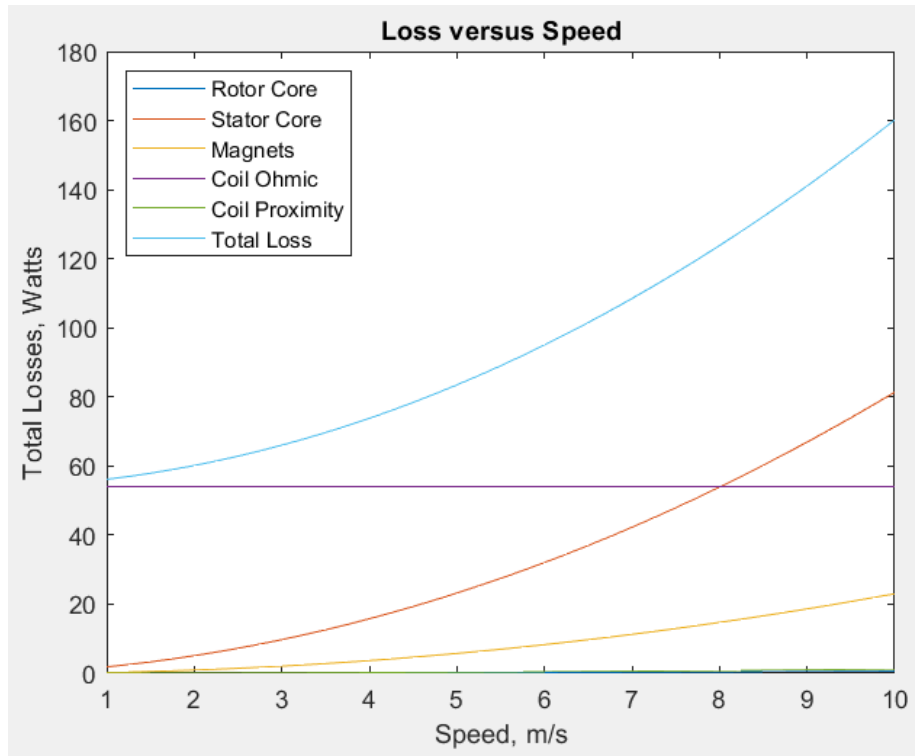
Αυτή η εξίσωση δε μπορεί να επιλυθεί εύκολα «με το χέρι», γι' αυτό θα αξιοποιήσουμε τη διεπαφή ανάμεσα σε Matlab και FEMM. Έτσι θα υπολογίσουμε το B_m στο διάκενο της μηχανής και στη συνέχεια μέσω αρμονικής ανάλυσης θα χωρίσουμε τόσο την μαγνητική επαγωγή όσο και τη συχνότητα σε αρμονικές συνιστώσες οι οποίες συγκροτούν το παραπάνω άθροισμα.

Απώλειες Μόνιμων Μαγνητών – Φαινομένων Γειτνίασης και Επιδερμικού

Οι εν λόγω απώλειες υπολογίζονται με τη βοήθεια της διεπαφής Matlab – FEMM «υλοποιώντας» τις σχέσεις 3.18 και 3.19.

Αποτελέσματα Προσομοίωσης Απωλειών

Οι απώλειες της μηχανής υπολογίστηκαν για την λειτουργική κατάσταση μέγιστης ροπής και ονομαστικού ρεύματος για ένα εύρος ταχυτήτων από 1 m/s έως 10 m/s σύμφωνα με τις παραπάνω μεθοδολογίες. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 4.36:



Διάγραμμα 4.23: Απώλειες της μηχανής συναρτήσει της ταχύτητας του δευτερεύοντος

Αξίζει να σημειωθεί ότι για ονομαστική ταχύτητα έχω αναλυτικά:

- $P_{cu} = 54 \text{ W}$
- $P_{fe} = 14.14 \text{ W}$
- $P_{mag} = 3.236 \text{ W}$
- $P_{prox} = 0.3093 \text{ W}$
- $P_{tot} = P_{cu} + P_{fe} + P_{mag} + P_{prox} = 71.6853 \text{ W}$

4.5.14 Υπολογισμός Βαθμού Απόδοσης

Η ισχύς εξόδου της LPMSM προσεγγίζεται από τη σχέση:

$$P_{out} = F_{max} \cdot u_N$$

Επομένως για ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας σε γωνία φορτίου μέγιστης δύναμης (thrust) έχουμε:

$$P_{out} = 155.366 \cdot 3.75 = 582.6225 \text{ W}$$

Ο βαθμός απόδοσης της μηχανής είναι:

$$n = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{an,tot}} = \frac{582.6225}{582.6225 + 71.6853} = 0.89 \text{ ή } 89\%$$

4.6 Πειραματικές Μετρήσεις

Για την επαλήθευση της ορθότητας του μοντέλου θα χρησιμοποιήσουμε τις πειραματικές μετρήσεις του Χριστόφορου Ποιητάρη, οι οποίες διεξήχθησαν στα πλαίσια της διπλωματικής του εργασίας. [37]

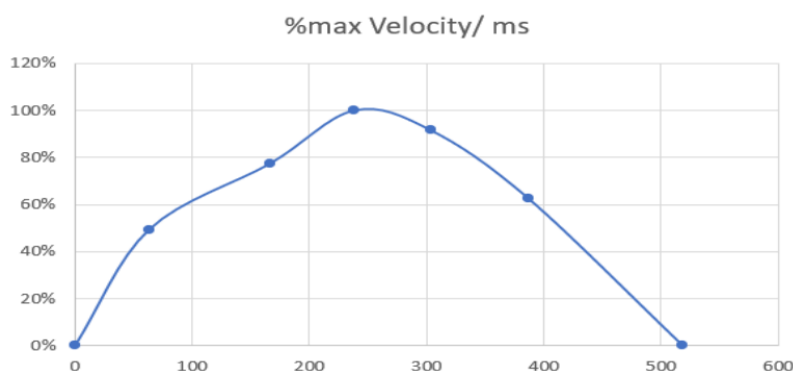
4.6.1 Πειραματική Επιβεβαίωση της ΗΕΔ

Για την μέτρηση της ηλεκτρεγερτικής δύναμης στο εργαστήριο τα τυλίγματα του πρωτεύοντος συνδέθηκαν σε συνδεσμολογία αστέρα και κατόπιν στον παλμογράφο. Στη συνέχεια ασκήθηκε χειροκίνητα μία δύναμη στο δευτερεύον της μηχανής ώστε να μεταβληθεί η μαγνητική ροή των τυλιγμάτων και να μετρηθεί η ΗΕΔ. Η εν λόγω δύναμη δεν είναι αρκετή ώστε να κινηθεί με ονομαστική ταχύτητα ενώ δεν είναι ούτε σταθερή με αποτέλεσμα τόσο η ταχύτητα όσο και η ΗΕΔ να εμφανίζουν αυξομειώσεις. Παρακάτω φαίνεται το στιγμιότυπο του παλμογράφου.



Εικόνα 4.14: Στιγμιότυπο της ΗΕΔ όπως αυτή μετρήθηκε με τη χρήση παλμογράφου [37]

Παρατηρούμε ότι η ΗΕΔ έχει παρόμοια μορφή με αυτή που προσομοιώθηκε νωρίτερα στη περίπτωση του κενού φορτίου (διπλός «λοβός») ενώ η αύξηση και η μείωση της οφείλονται στην αρχική επιτάχυνση και στη μετέπειτα επιβράδυνση του δευτερεύοντος. Προσεγγιστικά το διάγραμμα της ταχύτητας είναι:

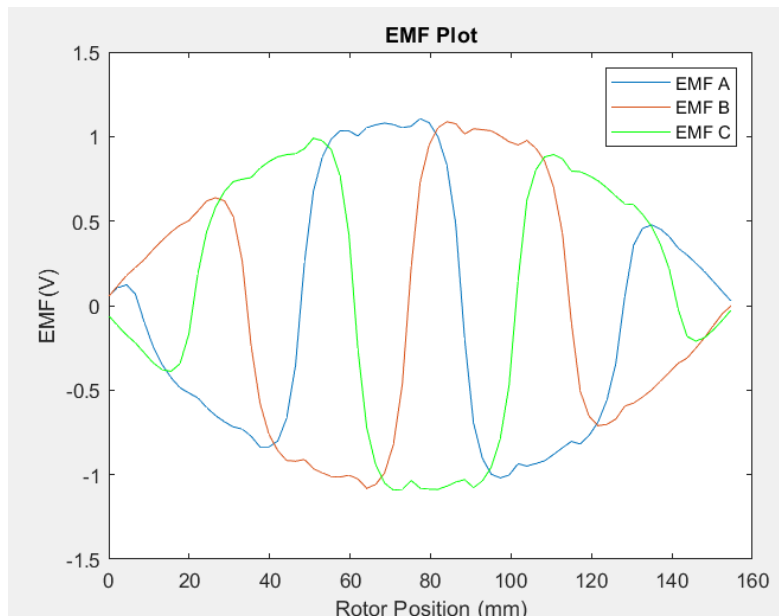


Εικόνα 4.15: Προσεγγιστικό διάγραμμα της ταχύτητας του δευτερεύοντος κατά το πείραμα [37]

Το παραπάνω διάγραμμα μπορεί να αποδοθεί προσεγγιστικά με τη συνάρτηση:

$$u(t) = -10.121 \cdot (t - 0.238)^2 + 5.733 \quad (4.3)$$

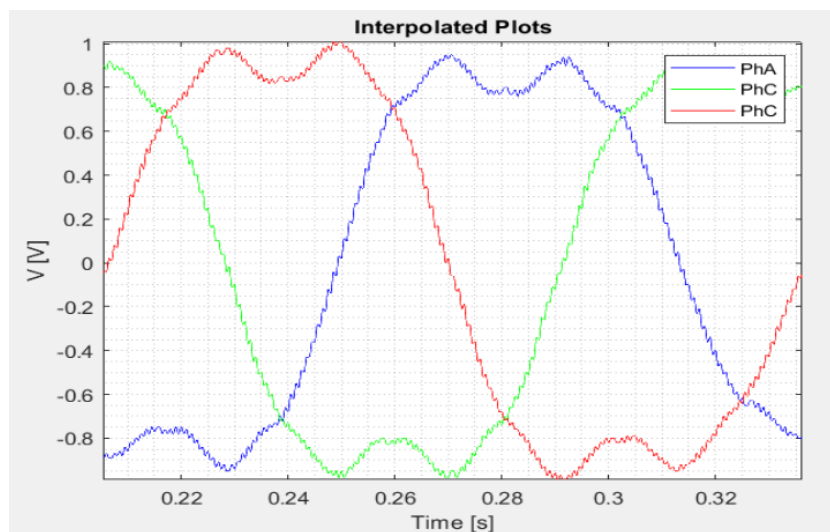
Με τη βοήθεια της διεπαφής Matlab και FEMM αντικαθιστώντας την ονομαστική ταχύτητα στη σχέση 4.2 με την εξίσωση 4.3 προκύπτει:



Διάγραμμα 4.24: Προσομοίωση της ΗΕΔ με μεταβλητή ταχύτητα

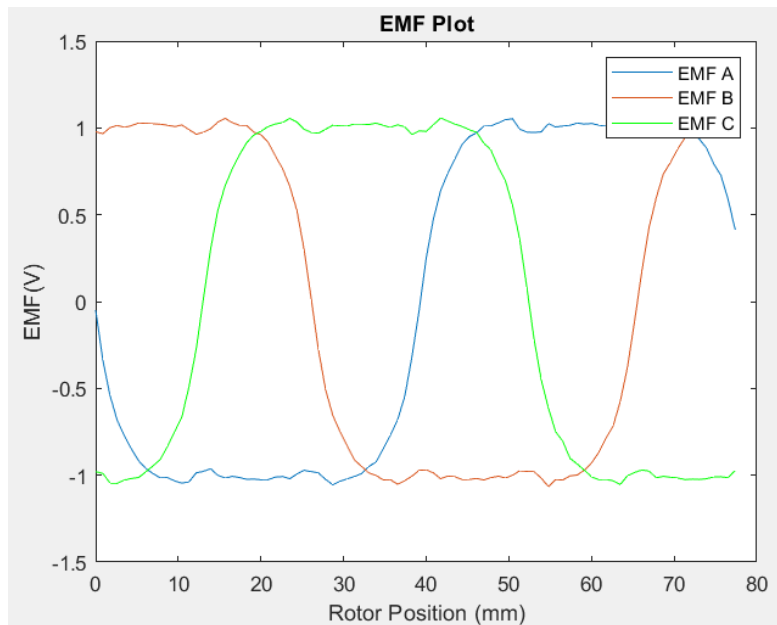
Παρατηρούμε σημαντική σύγκλιση των πειραματικών μετρήσεων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Η μέγιστη ταχύτητα που αναπτύσσει το δευτερεύον υπολογίστηκε στα 0,5733 m/sec. Θεωρώντας την εν λόγω ταχύτητα σταθερή από τις μετρήσεις του εργαστηρίου προκύπτει η κυματομορφή της ΗΕΔ (σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας):



Διάγραμμα 4.25: Κυματομορφή της ΗΕΔ για σταθερή ταχύτητα 0.5733 m/sec σε κενό φορτίο σύμφωνα με τις μετρήσεις του εργαστηρίου [37]

Προσομοιώνοντας για την ίδια σταθερή ταχύτητα στο FEMM σχεδιάζεται η ακόλουθη γραφική παράσταση.

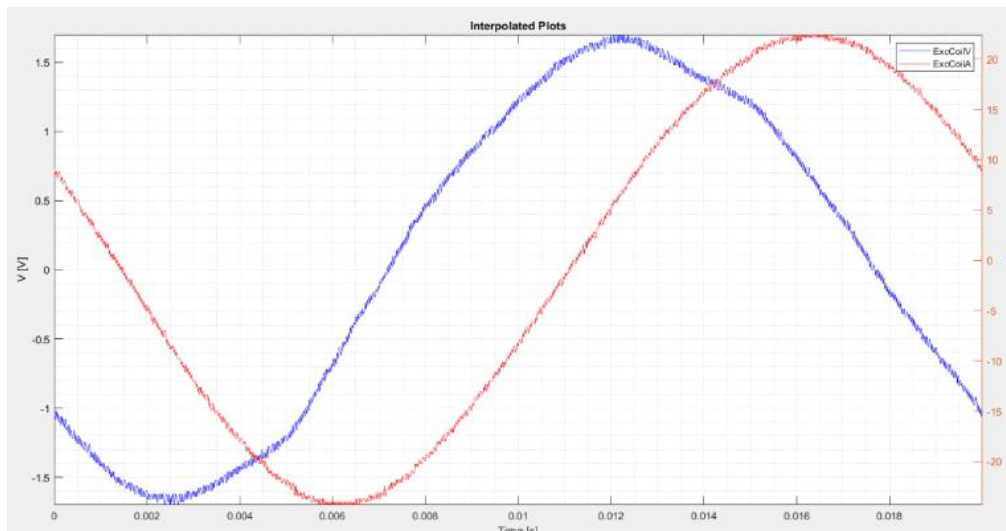


Διάγραμμα 4.26: Κυματομορφή της ΗΕΔ που προέκυψε από την προσομοίωση στο FEMM

Παρατηρούμε ότι οι δύο κυματομορφές παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Πιο συγκεκριμένα το πλάτος της θεμελιώδους της τάσης V μετρήθηκε 0,984V ενώ υπολογίστηκε από το FEMM στα 1,05V (σφάλμα 6,7%).

4.6.2 Πειραματική Επιβεβαίωση Απωλειών Χαλκού

Στο δεύτερο πείραμα υπολογίστηκαν οι απώλειες χαλκού ενός πηνίου μίας φάσης της μηχανής σε συνθήκες υψηλού και χαμηλού πλάτους ρεύματος. Πιο συγκεκριμένα απομονώθηκε ένα μόνο πηνίο μίας φάσης της μηχανής και με τη βοήθεια του παλμογράφου καταγράφηκαν το ρεύμα τροφοδοσίας και η παραγόμενη τάση τόσο με παρουσία μαγνήτη όσο και χωρίς.



Διάγραμμα 4.27: Η τάση και το ρεύμα που διαρρέουν το πηνίο όπως μετρήθηκαν στο εργαστήριο (απουσία μαγνήτη)[37]

Από τις παραπάνω γραφικές μέσω της σχέσης $P = \sum_{i=1}^N \frac{\|V_{1i}\| \cdot \|I_{1i}\|}{\sqrt{2}} \cdot \cos(\varphi_{v1i} - \varphi_{I1i})$ υπολογίζεται η πειραματική τιμή των απωλειών χαλκού (Όπου $\|V_{1i}\|$, $\|I_{1i}\|$ τα πλάτη της θεμελιώδους και των αρμονικών της τάσης και του ρεύματος εισόδου αντίστοιχα και φ_{v1i} , φ_{I1i} οι φάσεις τους) η οποία φαίνεται στο παρακάτω πίνακα.

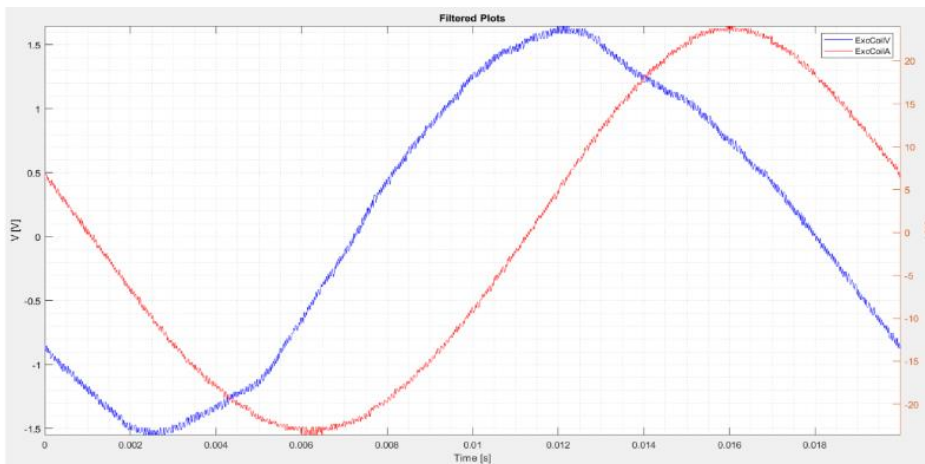
Χρησιμοποιώντας το ίδιο μοντέλο που αναλύσαμε στην υποενότητα 4.5.13 κάνοντας κατάλληλες τροποποιήσεις ώστε να έχουμε μηδενικά ρεύματα στις φάσεις A, B, 22.13A μέγιστο ρεύμα στο πηνίο C και ορίζοντας ως «αέρα» τους μαγνήτες και το δρομέα προκύπτει για τις απώλειες χαλκού η τιμή που φαίνεται στο παρακάτω πίνακα.

$V_{peak}(V)$	$I_{peak}(A)$	$P_{cu}(W)$ (πειραματική)	$P_{cu}(W)$ (προσομοίωση)	Σφάλμα (%)
1.757	22.13	7.0225	6.57	6.9

Αξίζει να σημειωθεί ότι εκτός από τις αλλαγές στα υλικά και στα ρεύματα αναγκαίος ήταν και ο εκ νέου υπολογισμός της αντίστασης καθώς πλέον δεν αναφερόμαστε σε όλα τα πηνία κάθε φάσης όπως στην υποενότητα 4.5.13 παρά μόνο σε ένα. Επιπλέον έχουμε θεωρήσει θερμοκρασία 30 °C.

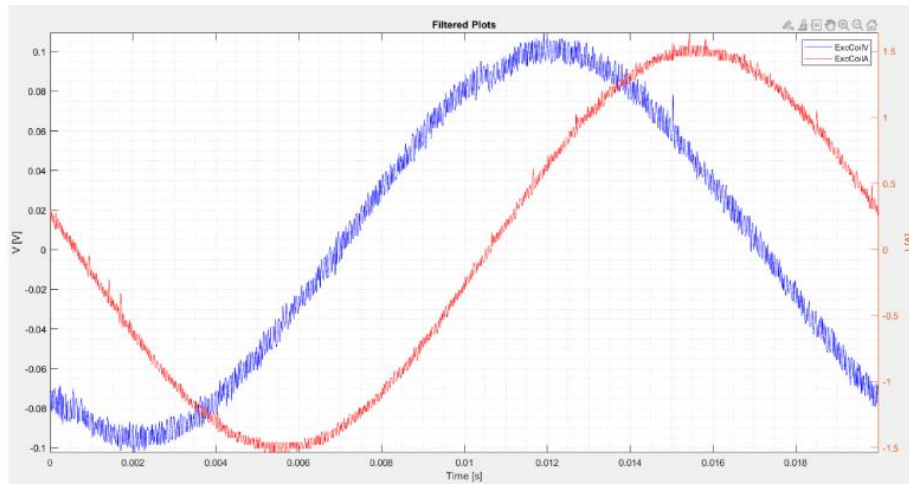
Δεδομένης της μειωμένης μαγνητικής ροής εξαιτίας της ύπαρξης ρεύματος αποκλειστικά σε ένα πηνίο μίας φάσης οι απώλειες πυρήνα μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες. Η προσομοίωση στο FEMM τις υπολογίζει στα 1.25mW.

Ακολουθώντας αντίστοιχη διαδικασία ακολουθούν οι μετρήσεις και οι πίνακες στους οποίους συνοψίζονται τα αποτελέσματα του πειράματος και του μοντέλου στο FEMM για περιπτώσεις υψηλού πλάτους ρεύματος με παρουσία μαγνήτη, χαμηλού πλάτους ρεύματος χωρίς μαγνήτη και χαμηλού πλάτους ρεύματος με μαγνήτη.



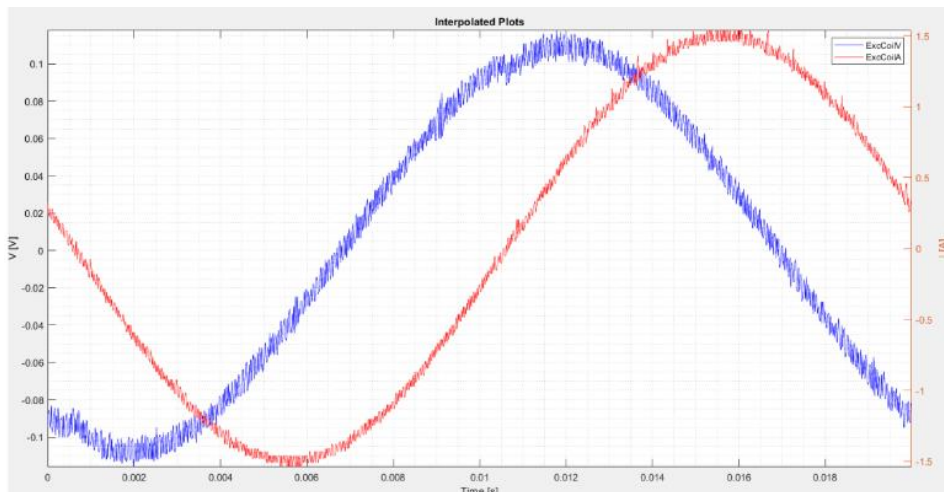
Διάγραμμα 4.28: Η τάση και το ρεύμα που διαρρέουν το πηνίο όπως μετρήθηκαν στο εργαστήριο (παρουσία μαγνήτη – υψηλό πλάτος ρεύματος)[37]

$V_{peak}(V)$	$I_{peak}(A)$	$P_{cu}(W)$ (πειραματική)	$P_{cu}(W)$ (προσομοίωση)	Σφάλμα (%)
1.648	24.07	7.3396	7.47	1.8



Διάγραμμα 4.29: Η τάση και το ρεύμα που διαρρέουν το πηνίο όπως μετρήθηκαν στο εργαστήριο (παρουσία μαγνήτη – χαμηλό πλάτος ρεύματος)[37]

$V_{peak}(V)$	$I_{peak}(A)$	$P_{CU}(W)$ (πειραματική)	$P_{CU}(W)$ (προσομοίωση)	Σφάλμα (%)
0.1096	1.641	0.0318	0.034	6.9



Διάγραμμα 4.30: Η τάση και το ρεύμα που διαρρέουν το πηνίο όπως μετρήθηκαν στο εργαστήριο (απουσία μαγνήτη – χαμηλό πλάτος ρεύματος)[37]

$V_{peak}(V)$	$I_{peak}(A)$	$P_{CU}(W)$ (πειραματική)	$P_{CU}(W)$ (προσομοίωση)	Σφάλμα (%)
0.1192	1.542	0.0304	0.031	1.9

Από τη σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρούμε μικρές αποκλίσεις οι οποίες μπορεί να οφείλονται στην ύπαρξη αρμονικών καθώς και στην εξάρτηση της αντίστασης από τη θερμοκρασία.

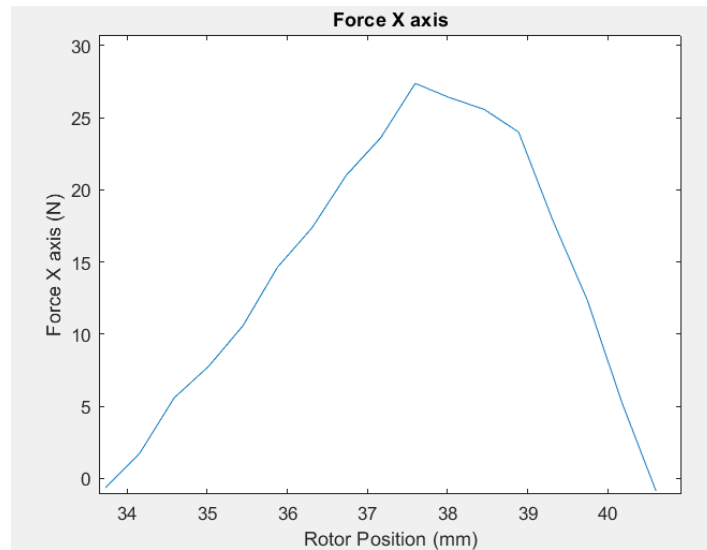
4.6.3 Μέτρηση Δύναμης Ευθυγράμμισης

Στο τελευταίο πείραμα επαληθεύτηκε η δύναμη ευθυγράμμισης με τη βοήθεια τροχαλίας και βαριδιών. Σκοπός είναι η μέτρηση της ελκτικής δύναμης που αναπτύσσεται ανάμεσα στους μόνιμους μαγνήτες του δευτερεύοντος και στη μαγνητική λαμαρίνα όταν τα τυλίγματα του πρωτεύοντος είναι αφόρτιστα. Η εν λόγω δύναμη αναλύθηκε και στο κεφάλαιο 4.5.2 ωστόσο σε αυτή την ενότητα θα την αναλύσουμε και με τη χρήση πειραματικών μετρήσεων.

Για διάκενο 1mm η μέγιστη δύναμη ευθυγράμμισης (Cogging Force) σε κενό φορτίο μετρήθηκε:

$$F_{cogging} = 24.4 \text{ N}$$

Στην υποενότητα 4.5.2 η προσομοίωση έγινε με αρκετά μικρότερο διάκενο (0.7 mm) επομένως η δύναμη ευθυγράμμισης που υπολογίστηκε ήταν σημαντικά μεγαλύτερη. Θέτοντας στο μοντέλο προσομοίωσης διάκενο 1 mm λαμβάνουμε για την δύναμη:

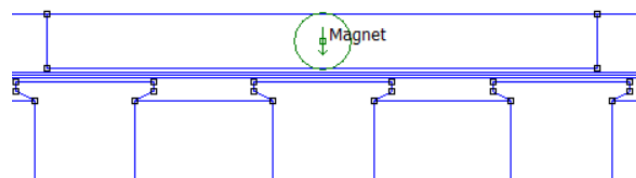


Διάγραμμα 4.31: Οριζόντια Δύναμη Ευθυγράμμισης για κενό φορτίο και με διάκενο 1mm

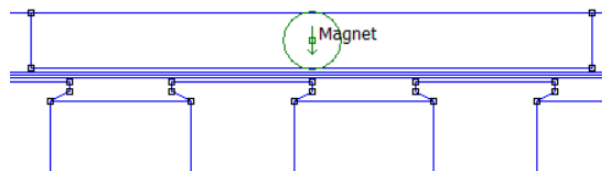
Η μέγιστη τιμή της υπολογίζεται με τη βοήθεια του FEMM:

$$F_{cogging}^{max}(simulated) = 27.37 \text{ N}$$

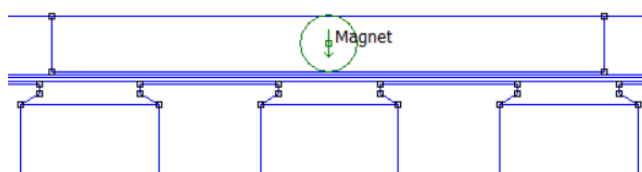
Παρατηρούμε ότι μηδενίζεται τόσο όταν το κέντρο του μαγνήτη βρίσκεται ακριβώς πάνω από το κέντρο του δοντιού όσο και όταν βρίσκεται ακριβώς πάνω από το κέντρο της αύλακας. Επιπλέον λαμβάνει μέγιστη τιμή όταν το κέντρο του μαγνήτη βρίσκεται στο «μεταίχμιο» μεταξύ δοντιού και αύλακας.



Εικόνα 4.16: Θέση Ελάχιστης Δύναμης στο κέντρο του δοντιού



Εικόνα 4.17: Θέση Μέγιστης Δύναμης στο άκρο του δοντιού



Εικόνα 4.18: Θέση Ελάχιστης Δύναμης στο κέντρο της αύλακας

Κεφάλαιο 5

Θερμικά Φαινόμενα

Στόχος της θερμικής ανάλυσης είναι η διερεύνηση της θερμικής συμπεριφοράς της μηχανής, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη σχεδίασή της και να προληφθεί πιθανή φθορά των υλικών της. Μέσα από την γνώση της κατανομής θερμοκρασίας στο εσωτερικό της μηχανής και τη μελέτη της ροής θερμότητας γίνεται κατάλληλη επιλογή υλικών και διαστασιολογείται ο μηχανισμός ψύξης της (ενώ παράλληλα επιλέγεται και ψυκτικό μέσο όπως αέρας, λάδι ή υγρό υδρογόνο).

5.1 Τρόποι Μετάδοσης Θερμότητας

Οι μηχανισμοί με τους οποίους μεταδίδεται η θερμότητα από ένα σώμα σε ένα άλλο, ή από ένα σημείο του σώματος στο υπόλοιπο χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες [41]:

- Μετάδοση με Αγωγή
- Μετάδοση με Συναγωγή
- Μετάδοση με Ακτινοβολία

5.1.1 Μετάδοση με Αγωγή

Η αγωγή θερμότητας ή αλλιώς θερμική αγωγιμότητα είναι το φαινόμενο κατά το οποίο η θερμότητα διαδίδεται στο εσωτερικό ενός στερεού υλικού ή ενός ακίνητου ρευστού, όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας μέσα στο μέσο. Το φαινόμενο αυτό προκαλείται από την αλληλεπίδραση μεταξύ των σωματιδίων, κατά την οποία τα «θερμότερα» (δηλαδή αυτά που έχουν αυξημένη κινητικότητα και επομένως βρίσκονται σε υψηλότερο επίπεδο ενέργειας) σωματίδια μεταφέρουν ενέργεια στα πιο «ψυχρά» γειτονικά τους (δηλαδή σε αυτά που βρίσκονται σε χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο), οδηγώντας έτσι σταδιακά το σύστημα σε θερμική ισορροπία. Η ενέργεια των μορίων μέσα στο υλικό προκύπτει από το άθροισμα της κινητικής και της δυναμικής τους ενέργειας, ενώ η θερμότητα μετακινείται πάντα από περιοχές υψηλότερης θερμοκρασίας προς περιοχές χαμηλότερης.

Η μεταφορά θερμότητας μέσω αγωγής γίνεται με δύο τρόπους: Αφενός, μέσω μοριακών συγκρούσεων, όπου η ενέργεια διαδίδεται από μόριο σε μόριο όπως περιγράφηκε και νωρίτερα, και αφετέρου, μέσω ελεύθερων ηλεκτρονίων. Αυτός ο μηχανισμός παίζει κυρίαρχο ρόλο κυρίως στα καθαρά μέταλλα λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης τέτοιων ηλεκτρονίων, γι' αυτό και τα καθαρά μέταλλα παρουσιάζουν μεγαλύτερη ικανότητα θερμικής αγωγής σε σύγκριση με άλλα υλικά.[42]

Η μεταφορά ενέργειας μέσω αγωγής προκύπτει από το νόμο του Fourier σύμφωνα με τον οποίο:

$$\Phi_{th} = -\lambda \cdot S \cdot \nabla T \quad (5.1)$$

Όπου:

- Φ_{th} ο ρυθμός μεταφοράς της θερμότητας
- λ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
- S η επιφάνεια μέσω της οποίας γίνεται η μεταφορά της θερμοκρασίας
- ∇T η παράγωγος της θερμοκρασίας

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\lambda = \lambda_o \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T) \quad (5.2)$$

Όπου:

- λ_o η τιμή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας σε θερμοκρασία αναφοράς T_o
- β μια σταθερά που προσδιορίζεται πειραματικά
- ΔT η διαφορά ανάμεσα στη θερμοκρασία αναφοράς T_o και στη θερμοκρασία T_a

Μονοδιάστατο Πρόβλημα

Στη περίπτωση του μονοδιάστατου προβλήματος η εξίσωση 5.1 απλοποιείται σε:

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (5.3)$$

Όπου:

- q η πυκνότητα ροής της θερμότητας (σε W/m^2)

Εφόσον έχουμε ροή θερμότητας Q (σε W) προς μία κατεύθυνση έστω x η οποία είναι κάθετη σε μια επιφάνεια έστω S τότε ισχύει:

$$Q_x = q \cdot S = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} \quad (5.4)$$

Τρισδιάστατο Πρόβλημα

Στη περίπτωση του τρισδιάστατου προβλήματος η εξίσωση 5.1 γίνεται:

$$q_n = -\lambda \cdot \frac{dT}{dn} \quad (5.5)$$

Όπου το n είναι ένα διάνυσμα κάθετο στην ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια. Ως ισοθερμοκρασιακή επιφάνεια ορίζεται ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που έχουν ίδια θερμοκρασία και δια μέσω του οποίου πραγματοποιείται η διάδοση της θερμότητας.

Καθώς το πρόβλημα πλέον είναι τρισδιάστατο η παράγωγος της σχέσης 5.5 δε μπορεί να απλοποιηθεί επομένως:

$$q_n = -\lambda \cdot \left(\hat{x} \frac{dT}{dx} + \hat{y} \cdot \frac{dT}{dy} + \hat{z} \cdot \frac{dT}{dz} \right) \quad (5.6)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η πυκνότητα της θερμότητας δεν έχει μόνο χωρική εξάρτηση αλλά και χρονική καθώς η θερμοκρασία T είναι συνάρτηση 4 μεταβλητών, συμπεριλαμβάνεται δηλαδή και ο χρόνος.

Υποθέτοντας ένα σύστημα με όγκο V στο εσωτερικό του οποίου βρίσκεται μία πηγή παραγωγής θερμότητας συνολικής ισχύος έστω Q_{in} , εάν ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας προς το εξωτερικό περιβάλλον είναι Q_{out} τότε από την αρχή διατήρησης της ενέργειας ισχύει:

$$\frac{dE}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (5.7)$$

Όπου με E συμβολίζουμε την συνολική κινητική ενέργεια των μορίων που περιλαμβάνονται στον όγκο V , δηλαδή την εσωτερική τους ενέργεια.

Ορίζουμε ένα νέο μέγεθος $\dot{q}$ (σε W/m^3) που λέγεται συνολική ισχύς των πηγών θερμότητας ανά μονάδα όγκου και ισχύει ότι:

$$Q_{in} = \int_V \dot{q} dV \quad (5.8)$$

Όμως από την εξίσωση 5.6 έχουμε ότι:

$$Q_{out} = \int_S \hat{c}_n \cdot (-\lambda \nabla T) dS \quad (5.9)$$

Το παραπάνω λόγω του θεωρήματος Gauss γράφεται:

$$Q_{out} = \int_V \nabla(\lambda \nabla T) dV \quad (5.10)$$

Τέλος ο ρυθμός μεταβολής της εσωτερικής ενέργειας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \int_V \left(\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right) dV \quad (5.11)$$

Όπου:

- ρ η πυκνότητα του υλικού (σε kg/m^3)
- c_p η ειδική θερμοχωρητικότητα του υλικού (σε $J/kg \cdot K$)

Επομένως η εξίσωση 5.7 τελικά γράφεται:

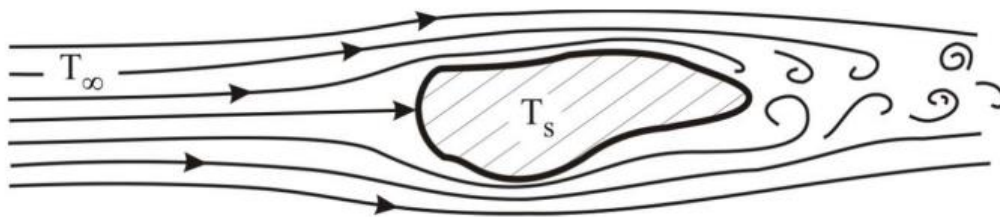
$$\int_V \left(\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right) dV = \int_V q dV + \int_V \nabla(\lambda \nabla T) dV \Leftrightarrow$$

$$\nabla(\lambda \cdot \nabla T) + q = \rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (5.12)$$

5.1.2 Μετάδοση με Συναγωγή

Κατά την αγωγή, η ενέργεια μεταφέρεται ως θερμότητα είτε λόγω ροής ελεύθερων ηλεκτρονίων είτε μέσω ταλαντώσεων του πλέγματος του υλικού. Δεν υπάρχει μετακίνηση μάζας προς την κατεύθυνση της ροής ενέργειας.

Κατά τη συναγωγή (convection), ανταλλάσσεται θερμότητα ανάμεσα σε μία επιφάνεια και σε ένα ρευστό σε κίνηση όταν αυτά βρίσκονται σε επαφή (με την προϋπόθεση ότι έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες). Η ροή ενέργειας στην επιφάνεια επαφής πραγματοποιείται αποκλειστικά μέσω αγωγής. Όμως, στα επόμενα στρώματα συμμετέχουν τόσο η αγωγή όσο και η διάχυση, δηλαδή η μεταφορά μάζας είτε σε μοριακό είτε σε μακροσκοπικό επίπεδο, εξαιτίας της κίνησης του ρευστού. Λόγω αυτής της μετακίνησης της μάζας, ο ρυθμός μεταφοράς ενέργειας είναι υψηλότερος. Όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός μετακίνησης της μάζας, τόσο μεγαλύτερος θα είναι και ο ρυθμός ροής της θερμότητας.



Εικόνα 5.1: Μετάδοση Θερμότητας με Συναγωγή

Ανάλογα με τη ροή του ρευστού η συναγωγή διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες[43]:

- **Εξαναγκασμένη Συναγωγή (Forced Convection):** Όταν η μεταφορά θερμότητας λαμβάνει χώρα μεταξύ ενός ρευστού και μιας επιφάνειας, αν η ροή προκαλείται από ανεμιστήρα, φυσητήρα ή αντλία, τότε η διαδικασία ονομάζεται εξαναγκασμένη συναγωγή.
- **Ελεύθερη Συναγωγή (Free Convection):** Όταν μια επιφάνεια βρίσκεται μέσα σε ακίνητο ρευστό και διατηρείται σε θερμοκρασία διαφορετική από εκείνη του ρευστού (είτε υψηλότερη είτε χαμηλότερη) τότε το ρευστό που έρχεται σε άμεση επαφή με την επιφάνεια θερμαίνεται ή ψύχεται αντίστοιχα. Αυτή η θερμική μεταβολή προκαλεί μεταβολή της πυκνότητας στο κοντινό στρώμα ρευστού σε σχέση με το υπόλοιπο ρευστό, το οποίο παραμένει σε ηρεμία. Η διαφορά πυκνότητας δημιουργεί ανοδική ή καθοδική κίνηση του ρευστού εξαιτίας δυνάμεων άνωσης, οδηγώντας σε ροή κοντά στην επιφάνεια. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ελεύθερη (ή φυσική) συναγωγή. Κατά τη διάρκεια του φαινομένου, δημιουργείται ένα λεπτό στρώμα ρευστού που κινείται πάνω στην επιφάνεια, ενώ το υπόλοιπο διατηρείται σχεδόν ακίνητο και βρίσκεται σε σταθερή θερμοκρασία. Η ταχύτητα της ροής είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή της εξαναγκασμένης συναγωγής γεγονός που οδηγεί σε μικρότερο συντελεστή συναγωγής (θα αναλύσουμε αυτό το μέγεθος παρακάτω).
- **Συνδυασμένη Συναγωγή:** Όταν η ταχύτητα της ροής του ρευστού εξαιτίας του ανεμιστήρα ή κάποιου άλλου εξωτερικού μέσου είναι μικρή ενώ παράλληλα εμφανίζονται μεγάλες δυνάμεις

άνωσης λόγω φυσικής συναγωγής, τότε τα δύο παραπάνω φαινόμενα ουσιαστικά συνυπάρχουν προκαλώντας τη συνδυασμένη συναγωγή.

Επιπλέον η ροή του ρευστού ανάλογα με τη γεωμετρία της επιφάνειας στην οποία κινείται μπορεί να είναι στρωτή (ομαλή, laminar) ή τυρβώδης (turbulent). Αρχικά οι γραμμές ροής, κατά μήκος των οποίων κινούνται τα σωματίδια, είναι τακτικές και η ταχύτητα σε κάθε σημείο παραμένει σταθερή, δίχως την ύπαρξη οποιασδήποτε ανάμειξης μεταξύ τους. Ωστόσο μετά από κάποια απόσταση από την παρεμβολή του αντικειμένου ποσότητες του ρευστού μετακινούνται από το ένα στρώμα στο άλλο με αποτέλεσμα η κίνηση των σωματιδίων να γίνεται απρόβλεπτη και ακανόνιστη. Αυτή η ροή ονομάζεται τυρβώδης και η μελέτη της είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη. [43]

Υπό τη προϋπόθεση ότι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας παραμένει σταθερός ή επηρεάζεται ελάχιστα από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ενός σώματος και του περιβάλλοντός του, για να περιγραφεί μαθηματικά ο μηχανισμός της συναγωγής μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο νόμος του Νεύτωνα για την ψύξη. Σύμφωνα με αυτόν, ο ρυθμός απώλειας θερμότητας από ένα σώμα είναι ανάλογος της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του σώματος και του περιβάλλοντος. Στη «γλώσσα» των μαθηματικών αυτό γράφεται [41]:

$$q = \frac{dQ}{dt} = h \cdot (T_s - T_{fluid}) \quad (5.13)$$

Όπου:

- q η πυκνότητα θερμορροής (σε W/m^2)
- h ο συντελεστής συναγωγής ($W/m^2 \cdot K$)
- T_s η θερμοκρασία της επιφάνειας
- T_{fluid} η θερμοκρασία του ρευστού

Ο συντελεστής h εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του ρευστού καθώς και από τις συνθήκες υπό τις οποίες λαμβάνει χώρα η συναγωγή, δηλαδή από τη ροή, τη ταχύτητά του και τη γεωμετρία του υπό μελέτη συστήματος. Επομένως, δεν υπάρχει ένας καθολικός ή σταθερός συντελεστής που να περιγράφει επαρκώς τη μεταφορά θερμότητας μέσω συναγωγής σε όλες τις περιπτώσεις. Αντίθετα, η τιμή του πρέπει να προσδιορίζεται είτε μέσω εμπειρικών σχέσεων είτε πειραματικά, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε συστήματος που εξετάζεται στο πλαίσιο της θερμικής ανάλυσης. Στο πίνακα 5.1 φαίνονται μερικά παραδείγματα γνωστών συντελεστών συναγωγής σε ορισμένα ρευστά. [44]

Ρευστό συναγωγής	Συντελεστής συναγωγής (W/m^2K)
Αέρας	5 - 25
Εξαναγκασμένη ροή αέρα	10-200
Νερό	20-100
Εξαναγκασμένη ροή νερού	50-10000
Λάδι	50-2000

Πίνακας 5.1: Τιμές συναγωγής για ορισμένα ρευστά.

Τρισδιάστατο Πρόβλημα

Για να επιλύσουμε το τρισδιάστατο πρόβλημα αρχικά υποθέτουμε δύο υλικά, ένα στερεό (έστω υλικό 1) όγκου V και ένα ρευστό (έστω υλικό 2), τα οποία έρχονται σε επαφή δια μέσου επιφάνειας (έστω S) όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2. Με $E1$ συμβολίζεται η εσωτερική ενέργεια των μορίων του υλικού 1 και αντίστοιχα με $E2$ του υλικού 2. Υποθέτουμε επιπλέον ότι στο εσωτερικό του υλικού 1 υπάρχουν πηγές

θερμότητας συνολικής ισχύος Q_g και $Q_{s,out}$ η θερμορροή εξόδου από το υλικό 1 στο 2. Επομένως από την αρχή διατήρησης ενέργειας (5.7) έχουμε:

$$\frac{dE_1}{dt} = Q_g - Q_{s,out} \quad (5.14)$$

Όπως και στη περίπτωση του φαινομένου της αγωγής θεωρούμε ως $\dot{q}$ (σε W/m^3) τη συνολική ισχύς των πηγών θερμότητας ανά μονάδα όγκου του υλικού 1, οπότε ομοίως ισχύει:

$$Q_g = \int_V \dot{q} dV$$

Για τη θερμορροή εξόδου ισχύει ο νόμος του Νεύτωνα για την ψύξη, επομένως ολοκληρώνοντας τη σχέση 5.13 έχουμε:

$$Q_{s,out} = \int_S h \cdot [T(x, y, z, t)_s - T(x, y, z, t)_{\text{ρευστου, επιφανειας}}] dS \quad (5.15)$$

Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του στερεού μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με την εξίσωση 5.11 ως συνάρτηση των ρ_1 και c_{p1} . Έτσι έχουμε:

$$\frac{dE_1}{dt} = \int_V (\rho_1 \cdot c_{p1} \cdot dT(x, y, z, t)_s / dt) dV \quad (5.16)$$

Άρα από τη 5.14 προκύπτει:

$$\int_V (\rho_1 \cdot c_{p1} \cdot dT(x, y, z, t)_s / dt) dV = \int_V \dot{q} dV + \int_S h \cdot [T(x, y, z, t)_s - T(x, y, z, t)_{\text{ρευστου, επιφ. νειας}}] dS \quad (5.17)$$

Ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία και με βάση τις αντίστοιχες εξισώσεις για το ενεργειακό ισοζύγιο του υλικού 2 προκύπτει η σχέση 5.18. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μοναδική πηγή θερμότητας εντός του υλικού 2 είναι η επιφάνεια επαφής της με το υλικό 1, επομένως σε αυτή τη περίπτωση έχουμε ότι:

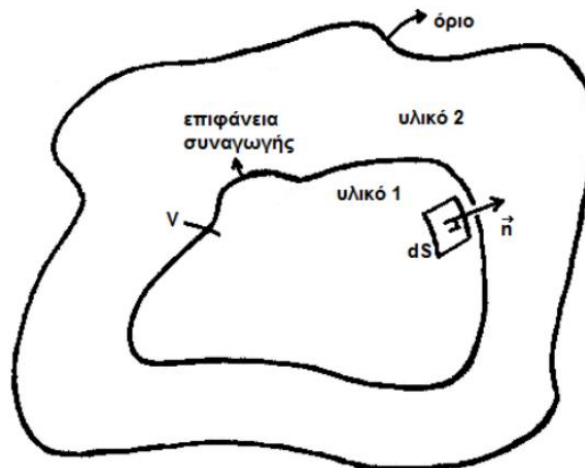
$$Q_{in} = Q_{s,out} = \int_S h \cdot [T(x, y, z, t)_s - T(x, y, z, t)_{\text{ρευστου, επιφ. νειας}}] dS$$

Άρα:

$$\int_V (\rho_2 \cdot c_{p2} \cdot dT(x, y, z, t)_{\text{ρευστου, επιφ. νειας}} / dt) dV = \int_S h \cdot [T(x, y, z, t)_s - T(x, y, z, t)_{\text{ρευστου}}] dS - Q_{out} \quad (5.18)$$

Όπου:

- ρ_2 η πυκνότητα του ρευστού
- c_{p2} η ειδική θερμοχωρητικότητα του ρευστού
- Q_{out} η ροή θερμότητας από το ρευστό στο εξωτερικό περιβάλλον



Εικόνα 5.2: Μετάδοση θερμότητας με το μηχανισμό της συναγωγής [41]

5.1.3 Μετάδοση με Ακτινοβολία

Η μετάδοση της θερμότητας μέσω ακτινοβολίας διαθέτει ορισμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που τη διακρίνουν από την αγωγή και τη συναγωγή. Καταρχάς, για να πραγματοποιηθεί δεν απαιτείται η ύπαρξη υλικού μέσου. Αντιθέτως, η παρουσία ύλης μπορεί να περιορίσει τη ροή ακτινοβολίας ανάμεσα σε επιφάνειες. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα σύννεφα, τα οποία περιορίζουν την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη Γη κατά τη διάρκεια της ημέρας, μειώνοντας έτσι τη μέγιστη θερμοκρασία, ενώ τη νύχτα περιορίζουν την απώλεια θερμότητας προς το διάστημα, αυξάνοντας τις ελάχιστες θερμοκρασίες. Αυτά τα φαινόμενα συνδέονται άμεσα με την ανταλλαγή ενέργειας μέσω ακτινοβολίας μεταξύ της επιφάνειας της Γης και του διαστήματος.

Ένα ακόμη ξεχωριστό χαρακτηριστικό της μετάδοσης θερμότητας μέσω ακτινοβολίας είναι ότι τόσο η ποσότητα όσο και η φύση της εξαρτώνται άμεσα από τη θερμοκρασία του σώματος. Σε αντίθεση με την αγωγή και τη συναγωγή, όπου η μεταφερόμενη θερμότητα σχετίζεται κυρίως με τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα δύο σώματα, στην ακτινοβολία η μεταφερόμενη ενέργεια εξαρτάται τόσο από τη διαφορά όσο και από τις απόλυτες θερμοκρασίες των σωμάτων. Επιπλέον, η ίδια η «ποιότητα» της ακτινοβολίας (δηλαδή τα χαρακτηριστικά της όπως το φάσμα και το μήκος κύματός της) μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Για παράδειγμα, παρατηρείται ότι το χρώμα ενός πυρακτωμένου σώματος αλλάζει όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του. Η ακτινοβολία ταξινομείται με την ταχύτητα του φωτός και παρουσιάζει τόσο κυματικές όσο και σωματιδιακές ιδιότητες, ενώ δεν είναι μονοχρωματική δηλαδή δεν αποτελείται από μία μόνο συχνότητα αλλά περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. [42]

Η μέγιστη πυκνότητα θερμορροής (σε W/m^2) για ένα ιδεατό σώμα («μέλαν» σώμα) δίνεται από το νόμο Stefan-Boltzmann σύμφωνα με τον οποίο:

$$q = \sigma \cdot T^4 \quad (5.19)$$

Όπου:

- σ η σταθερά Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5.6704 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$
- T η απόλυτη θερμοκρασία του σώματος

Άρα η μέγιστη θερμική ισχύς που εκπέμπεται από σώμα επιφάνειας S είναι:

$$q = S \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (5.20)$$

Το «μέλαν» σώμα είναι ένας ιδανικός πομπός ακτινοβολίας, ο οποίος εκπέμπει τη μέγιστη δυνατή ποσότητα ακτινοβολίας σε οποιοδήποτε μήκος κύματος και σε οποιαδήποτε θερμοκρασία. Ένα τέτοιο σώμα επίσης απορροφά όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό, ανεξάρτητα από το μήκος κύματος ή τη θερμοκρασία.

Δεδομένου ότι το «μέλαν» σώμα είναι θεωρητικό – ιδανικό, για τα περισσότερα σώματα στο νόμο Stefan-Boltzmann προστίθεται μία ακόμα παράμετρος, ο συντελεστής εκπομπής ε . Αυτός λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1 ανάλογα με την ικανότητα του σώματος να εκπέμπει ακτινοβολία. Έτσι η εξίσωση 5.19 γράφεται:

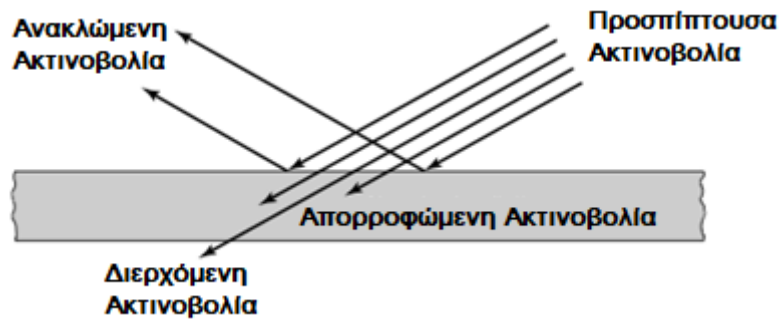
$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (5.21)$$

Επιπλέον η ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα πραγματικό σώμα δεν απορροφάται πλήρως, αλλά ένα μέρος της ανακλάται και ένα άλλο μέρος της διέρχεται από μέσα του (Εικόνα 5.3). Για το απορροφώμενο μέρος της ακτινοβολίας έχουμε:

$$q_{\text{απορ}} = \alpha \cdot q_{\text{προσπ}} \quad (5.22)$$

Όπου:

- α ο συντελεστής απορρόφησης
- $q_{\text{προσπ}}$ η προσπίπτουσα θερμική ισχύς



Εικόνα 5.3: Μετάδοση θερμότητας μέσω ακτινοβολίας. Διακρίνεται το ανακλώμενο, το απορροφώμενο και το διερχόμενο μέρος της

Στην ειδική περίπτωση που έχουμε $\alpha = \varepsilon$ η «καθαρή» μεταφορά θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας που ακτινοβολεί και του περιβάλλοντος είναι:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_{env}^4) \quad (5.23)$$

Η θερμική ακτινοβολία επηρεάζει σημαντικά τη μεταφορά θερμότητας μόνο σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό που μας ενδιαφέρει στη μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας είναι ο καθαρός ρυθμός ανταλλαγής θερμότητας, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της θερμικής ενέργειας που ένα σώμα εκπέμπει και αυτής που απορροφά. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η θερμική ακτινοβολία θα θεωρηθεί αμελητέα καθώς αφενός η θερμική ακτινοβολία με μικρό μήκος κύματος δεν απορροφάται ουσιαστικά από τον αέρα και αφετέρου οι θερμοκρασίες που εξετάζονται είναι σχετικά χαμηλές.

5.2 Θερμικά Φαινόμενα και Απώλειες Μηχανής

Η θερμική ανάλυση μιας ηλεκτρικής μηχανής αποσκοπεί στην κατανόηση της θερμικής της συμπεριφοράς και στην πρόβλεψη των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στα επιμέρους εξαρτήματά της, με σκοπό την αποφυγή προβλημάτων υπερθέρμανσης. Οι ενεργειακές απώλειες που εμφανίζονται σε διάφορα σημεία της μηχανής λειτουργούν ως πηγές θερμότητας και αποτελούν τον βασικό παράγοντα που οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας της. Όπως είδαμε και στην ενότητα 3.6 οι κυριότερες απώλειες μίας μηχανής είναι οι απώλειες χαλκού, πυρήνα, μόνιμων μαγνητών, λόγω επιδερμικού και φαινομένου γειτνίασης και οι μηχανικές (εξαιτίας τριβών και ανεμισμού).

Επιπλέον σε μία μηχανή η μετάδοση της θερμότητας από τις παραπάνω πηγές στο υπόλοιπο σώμα της γίνεται μέσω των μηχανισμών που περιγράφηκαν στην ενότητα 5.1, δηλαδή μέσω της αγωγής, της συναγωγής και της ακτινοβολίας. Αναλυτικότερα στα στερεά μέρη της έχουμε μετάδοση με το μηχανισμό της αγωγής, ενώ στα μέρη της που έρχονται σε επαφή με τον αέρα με το μηχανισμό της συναγωγής.

5.3 Ψύξη Μηχανών

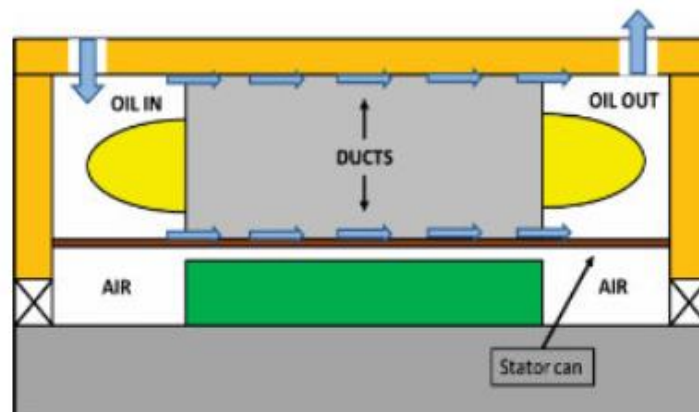
Για την αποφυγή υπερθέρμανσης και την εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών, είναι απαραίτητη η εφαρμογή τεχνικών ψύξης. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται κυρίως από την ονομαστική ισχύ και το μέγεθος της μηχανής, καθώς αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν καθοριστικά την ποσότητα της παραγόμενης θερμότητας. Για μικρούς κινητήρες ή κινητήρες με ελαφρύ θερμικό φορτίο, η επιφάνεια του περιβλήματος είναι αρκετή. Με την αύξηση του μεγέθους ή/και του θερμικού φορτίου, συχνά προστίθενται επιπλέον πτερύγια για να βελτιωθεί η αποδοτικότητα της απαγωγής της θερμότητας.

Για αυτούς τους κινητήρες, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να περιοριστούν οι εσωτερικές διαφορές θερμοκρασίας, ενώ ταυτόχρονα να επιτυγχάνεται η υψηλότερη δυνατή θερμοκρασία στην εξωτερική επιφάνεια του περιβλήματος. Για να επιτευχθεί αυτό, σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται αλουμινένιο περίβλημα (εξαιτίας της υψηλής του θερμικής αγωγιμότητας) το οποίο «χτυτεύεται» κατευθείαν γύρω από τον πυρήνα του στάτη προκειμένου να αφαιρεθεί το κενό αέρα μεταξύ τους. [45]

Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι ψύξης είναι [46]:

- **Φυσική Ψύξη:** Σε μηχανές μικρών διαστάσεων και ισχύος (έως 300 Watt) αρκεί η ψύξη με ελεύθερη συναγωγή, δηλαδή χωρίς κάποιον μηχανισμό απαγωγής θερμότητας παρά μόνο με τον αέρα του περιβάλλοντος σε φυσική ροή.
- **Ψύξη με Εξαναγκασμένη Ροή Αέρα:** Η εξαναγκασμένη ψύξη με συναγωγή είναι απαραίτητη σε όλες τις περιπτώσεις, εκτός από τις μικρότερες και ελαφρύτερα φορτισμένες μηχανές. Αυτές οι ηλεκτρικές μηχανές ψύχονται μέσω σύνθετων διατάξεων που περιλαμβάνουν αγωγούς, περσίδες και ανεμιστήρες ενσωματωμένους στο εσωτερικό τους. Ο αέρας, αν και κακός αγωγός της θερμότητας, γίνεται αποδοτικό μέσο μεταφοράς της όταν κινείται με υψηλή ταχύτητα και ειδικά όταν η ροή είναι τυρβώδης.
- **Υδρόψυξη:** Για μηχανές μεγαλύτερης ισχύος (από 1 MWatt έως 100 MWatt) η ροή του αέρα που απαιτείται ώστε να γίνεται επαρκής ψύξη είναι ιδιαίτερα μεγάλη γεγονός που προκαλεί έντονους στροβιλισμούς και φαινόμενα σπηλαίωσης, επηρεάζοντας έτσι την ομαλή της λειτουργία. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο αέρας αντικαθίσταται ως ψυκτικό μέσο (ή ως μέσο απαγωγής θερμότητας) από νερό (ή πολύ συχνότερα μείγμα νερού – γλυκόλης) το οποίο διαθέτει υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα. Αυτό αντλείται προς τα εξαρτήματα που πρόκειται να ψυχθούν, ενώ στη συνέχεια το υγρό ψύχεται με τη σειρά του μέσω εναλλάκτη θερμότητας υγρού-αέρα και ανεμιστήρων.
- **Ψύξη με υγρό υδρογόνο:** Για την ψύξη των μηχανών υψηλής ισχύος (πάνω από 100 MWatt) απαιτείται ψυκτικό μέσο με «καλύτερες» ιδιότητες από τον αέρα και το νερό. Συνήθως χρησιμοποιείται υγρό υδρογόνο καθώς διαθέτει μικρή πυκνότητα και μεγάλη ειδική θερμοχωρητικότητα. Για την αξιοποίηση του όμως απαιτείται στεγανοποίηση της μηχανής ενώ υπάρχει και μία εξαιρετικά μικρή πιθανότητα ανάφλεξης.

Εκτός από αυτές τις βασικές μεθόδους ψύξης έχουν προταθεί και κατασκευαστεί αρκετά διαφορετικά μοντέλα μηχανών με ειδικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά ώστε να απάγεται η απαιτούμενη θερμότητα. Αυτά τα συστήματα περιλαμβάνουν ψεκασμό ειδικών λαδιών στους μαγνήτες του δευτερεύοντος της μηχανής, τα οποία σχηματίζουν ένα λεπτό «φίλμ» που μειώνει την θερμοκρασία. Άλλα ιδιαίτερα συστήματα έχουν προταθεί και αναλυθεί εδώ [47].



Εικόνα 5.4: Σύστημα ψύξης στάτη σε κυλινδρική μηχανή με εξαναγκασμένη ροή λαδιού. Ο στάτης περιβάλλεται από ένα «κλουβί» ώστε το λάδι να μην δυσκολεύει τη κίνηση του δρομέα [48]

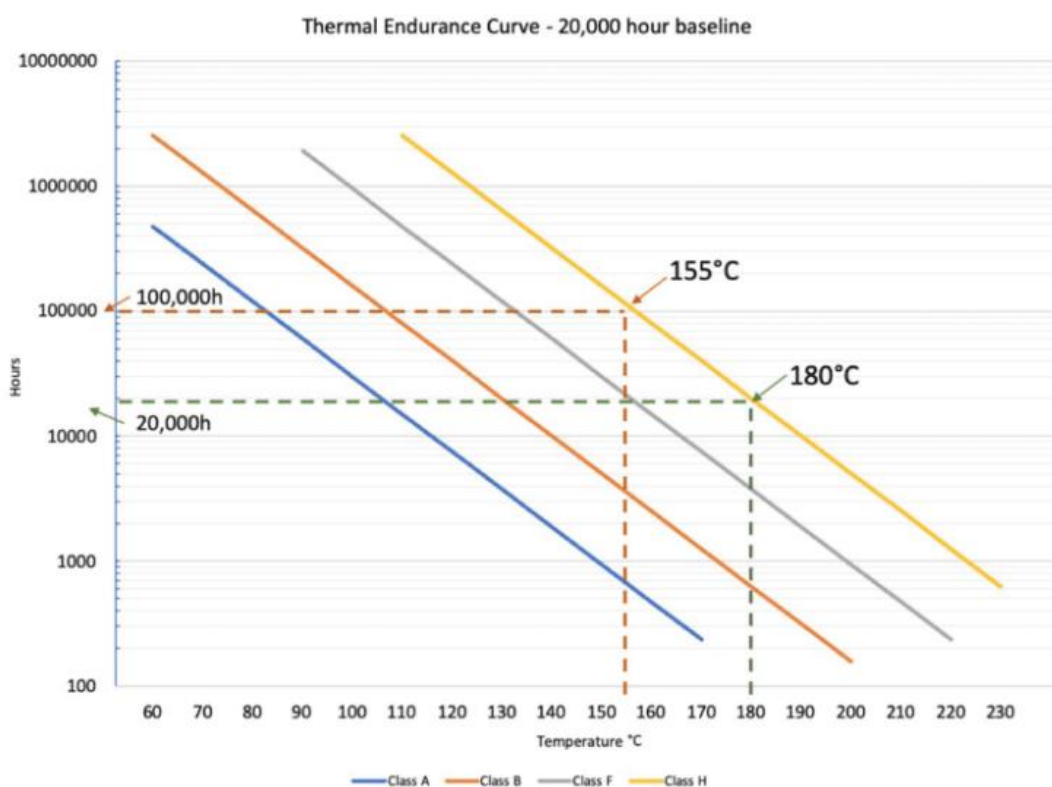
5.4 Θερμοκρασιακοί Περιορισμοί Μηχανών

Οι θερμοκρασιακοί περιορισμοί επιβάλλονται από τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένη η μηχανή αλλά και από την αντοχή των μόνιμων μαγνητών. Πιο συγκεκριμένα η μηχανή που μελετάμε στη παρούσα διπλωματική είναι κατασκευασμένη από σίδηρο ο οποίος έχει σημείο τήξης 1535°C και έχει τυλίγματα χαλκού με σημείο τήξης 1084.6°C. Η σημαντικότερη παράμετρος όμως είναι η αντοχή των μονώσεων στα τυλίγματα του πρωτεύοντος στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας της μηχανής. Συνήθως αυτές οι μονώσεις αποτελούνται από βερνίκι, πολυεστέρα, πολυουρεθάνη ή πολυβινύλιο και ανάλογα με την αντοχή τους χωρίζονται στις κλάσεις που φαίνονται στο πίνακα 5.2.

Κλάση μόνωσης	Μέγιστη θερμοκρασίας	αύξηση μέση μόνωσης	θερμοκρασία Οριακή θερμότερου σημείου	θερμοκρασία
A	60	90	100	
E	70	115	120	
B	80	120	130	
F	100	140	155	
H	125	165	180	

Εικόνα 5.5: Οι κλάσεις των μονώσεων των τυλιγμάτων και οι μέγιστες θερμοκρασίες αντοχής τους

Γενικά τα παραπάνω όρια μπορούν να ξεπεραστούν ωστόσο έτσι μειώνεται η «διάρκεια ζωής» των μονώσεων ενώ ρισκούνται βραχυκυκλώματα και διαρροές ρεύματος. Δεδομένου ότι το κόστος επανατοποθέτησης του βερνικιού είναι ιδιαίτερα υψηλό συνήθως προτιμάται η μόνωση κλάσης H.



Εικόνα 5.6: Η καμπύλη αυτή δείχνει τη σχέση ανάμεσα στη μόνωση και στη χρονική διάρκεια λειτουργίας της μηχανής. [58]

Τέλος, σε μία μηχανή μόνιμων μαγνητών όπως αυτή που μελετάμε σημαντικό ρόλο παίζει η θερμοκρασία απομαγνήτισής τους. Παρόλο που συνήθως χρησιμοποιούνται μαγνήτες NdFeB λόγω της τιμής τους, στην εν λόγω LPMSM τοποθετήθηκαν μαγνήτες SmCo17 οι οποίοι αν και ακριβότεροι είναι πιο ανθεκτικοί στις υψηλές θερμοκρασίες (έχουν μέγιστη θερμοκρασία από 700°C έως 800°C).

Κεφάλαιο 6

Μοντέλο Συγκεντρωμένων Παραμέτρων

Το μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων συνιστά μία προσεγγιστική μέθοδο ανάλυσης ενός φαινομένου με ολοκληρωμένο και σχετικά ακριβή τρόπο. Απλοποιεί την αρχική πολυπλοκότητα του προβλήματος αντιστοιχίζοντας τα μεγέθη που το χαρακτηρίζουν με ηλεκτρικά και στη συνέχεια σχεδιάζει και επιλύει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο εκφράζει το υπό μελέτη φαινόμενο. Πιο συγκεκριμένα μέσω της ανάλυσης ενός θερμικού προβλήματος μας επιτρέπει να μελετήσουμε τη μεταβατική συμπεριφορά της μηχανής αλλά και την τελική της κατάσταση. Για την εφαρμογή της μεθοδολογίας η μηχανή χωρίζεται σε συγκεντρωμένα στοιχεία, τα οποία μπορεί να είναι θερμικές αντιστάσεις, χωρητικότητες ή πηγές ρεύματος ώστε να σχηματιστεί το ισοδύναμό της κύκλωμα, όπως θα δούμε αναλυτικά στην ενότητα 6.2.

6.1 Αντιστοίχιση Θερμικών και Ηλεκτρικών Μεγεθών

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα για το σχεδιασμό του ισοδύναμου κυκλώματος απαραίτητη είναι η αντιστοίχιση των θερμικών μεγεθών με ηλεκτρικά. Αίτιο της ροής θερμότητας είναι η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα σε δύο σημεία της μηχανής, ενώ αντίστοιχα σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα αιτία για τη ροή ρεύματος αποτελεί η διαφορά τάσης δύο σημείων. Επομένως τα μεγέθη αντιστοιχίζονται:

$$\begin{aligned} \Delta T(K) &\leftrightarrow \Delta V(V) \\ Q(W) &\leftrightarrow I(A) \end{aligned}$$

Η ηλεκτρική αντίσταση ορίζεται όπως και η θερμική δηλαδή:

$$R(K/W) = R(\Omega)$$

Από τον ορισμό της η θερμική αντίσταση είναι ίση με το πηλίκο της διαφοράς θερμοκρασίας προς τη ροή θερμότητας, όμως ο τρόπος υπολογισμού της εξαρτάται από το μηχανισμό με τον οποίο μεταδίδεται η θερμότητας επομένως έχουμε δύο υποκατηγορίες (δεν θα μελετήσουμε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας την επίδραση της ακτινοβολίας στο θερμικό μοντέλο της μηχανής για τους λόγους που εξηγήθηκαν στο 5.1.3):

- Υπολογισμός αντίστασης λόγω αγωγής

$$R_{th}(K/W) = \frac{\Delta T}{\Delta Q} = \frac{L}{\lambda \cdot S} \quad (6.1)$$

Όπου L το μήκος του υλικού, λ ο συντελεστής αγωγιμότητας του υλικού και S η επιφάνεια μέσω της οποίας μεταδίδεται η θερμότητα Q .

- Υπολογισμός αντίστασης λόγω συναγωγής

$$R_{th}(K/W) = \frac{\Delta T}{\Delta Q} = \frac{1}{h \cdot S} \quad (6.2)$$

Όπου h ο συντελεστής συναγωγής

Οι θερμοχωρητικότητα ενός υλικού εκφράζει την ικανότητά του να απορροφά και να αποθηκεύει θερμική ενέργεια όπως ακριβώς συμβαίνει με έναν πυκνωτή σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, ο οποίος αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια. Επομένως για το κύκλωμα των συγκεντρωμένων παραμέτρων η τιμή του πυκνωτή δίνεται από τη σχέση:

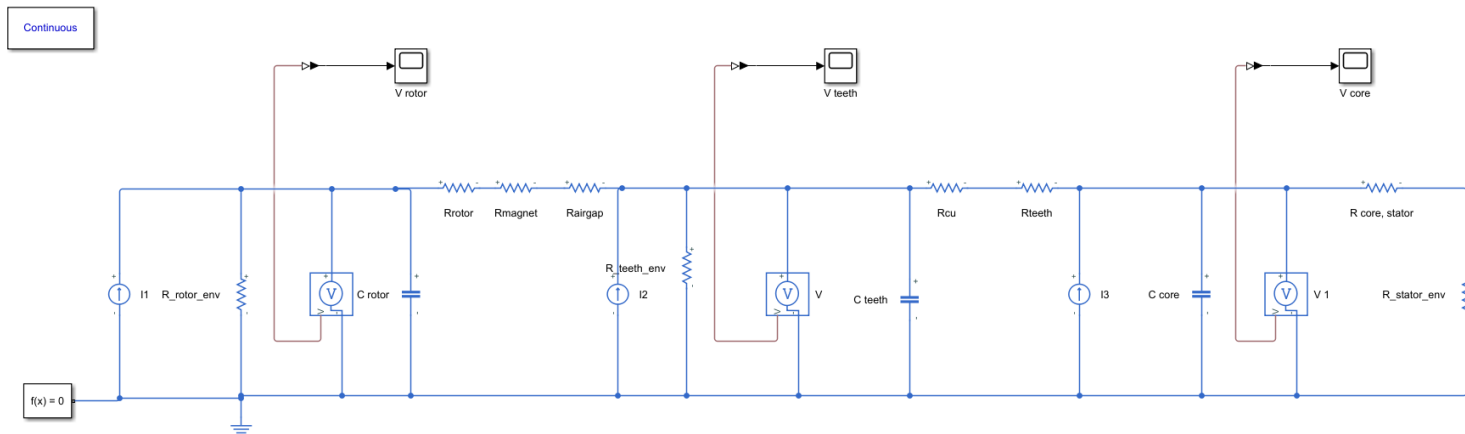
$$C(J/K) = \rho \cdot c_p \cdot V \quad (6.3)$$

Όπου ρ η πυκνότητα του υλικού, c_p η ειδική θερμοχωρητικότητά του και V ο όγκος του.

6.2 Προτεινόμενο Κύκλωμα Συγκεντρωμένων Παραμέτρων

Για τον ορθό σχεδιασμό του κυκλώματος συγκεντρωμένων παραμέτρων της μηχανής απαραίτητη είναι η κατανόηση της γεωμετρίας της [49], την οποία αναλύσαμε στην ενότητα 4.4. Στην εικόνα 6.1 φαίνεται το προτεινόμενο κύκλωμα.

Οι πηγές ρεύματος I_1 , I_2 , I_3 εκφράζουν τις απώλειες δρομέα, χαλκού και πυρήνα αντίστοιχα όπως αυτές υπολογίστηκαν στην ενότητα 4.5.13. Όπως εξηγήσαμε νωρίτερα η τάση V_{rotor} αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του δευτερεύοντος, η τάση V_{teeth} στη θερμοκρασία των δοντιών του πρωτεύοντος και τέλος η τάση V_{core} στη θερμοκρασία του πρωτεύοντος. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μηχανή δεν βρίσκεται κλεισμένη με κάποιου είδους περίβλημα.



Εικόνα 6.1: Προτεινόμενο Κύκλωμα συγκεντρωμένων παραμέτρων

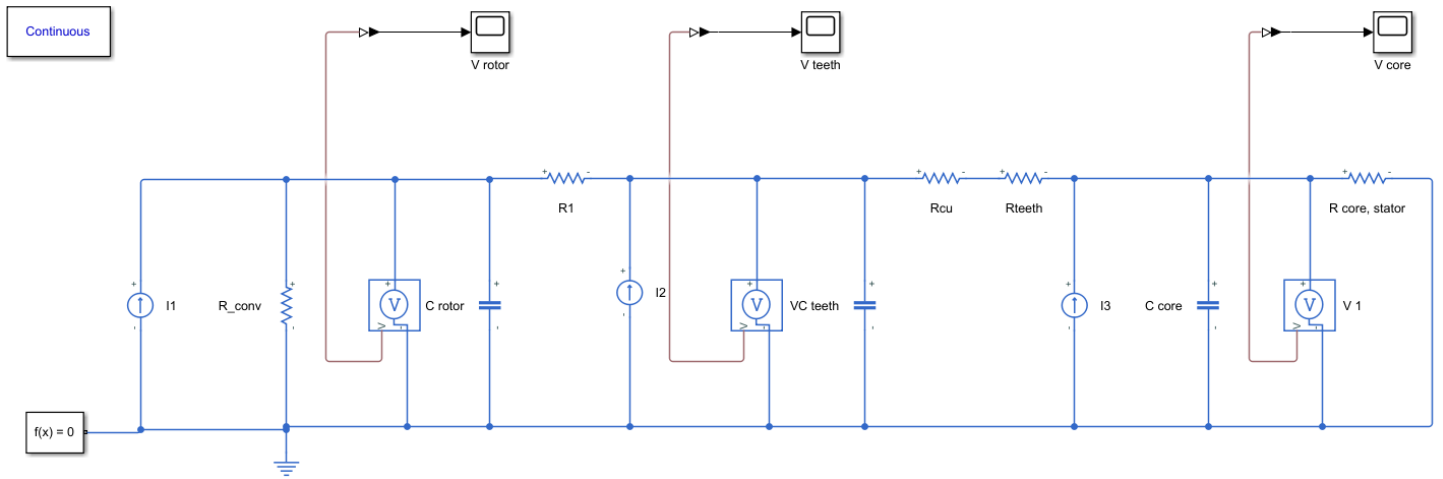
Η γείωση του παραπάνω κυκλώματος αντιπροσωπεύει τη θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα του περιβάλλοντος.

Οι αντιστάσεις που συνδέουν τις πηγές θερμότητας και βρίσκονται «σε σειρά» αποτελούν θερμικές αντιστάσεις αγωγής και η διαδοχή τους είναι σύμφωνη με τη γεωμετρία της μηχανής. Ομοίως οι αντιστάσεις που συνδέονται παράλληλα στις πηγές ρεύματος αποτελούν θερμικές αντιστάσεις συναγωγής. Οι τιμές αυτών των αντιστάσεων καθώς και των πηγών ρεύματος καθορίζουν την συμπεριφορά της μηχανής στη μόνιμη κατάσταση.

Οι πυκνωτές όπως αναφέρθηκε νωρίτερα αντιπροσωπεύουν την ικανότητα των υλικών να αποθηκεύουν θερμότητα και να την επανεκπέμπουν και συνδέονται παράλληλα με τις πηγές ρεύματος. Οι τιμές τους επηρεάζουν τη χρονική διάρκεια του θερμικού μεταβατικού φαινομένου.

Επειδή το κύκλωμα της εικόνας 6.1 είναι λίγο περίπλοκο θα πραγματοποιήσουμε ορισμένες παραδοχές ώστε να το απλουστεύσουμε. Θεωρώντας ότι η μηχανή είναι ένα και μόνο σώμα το οποίο περιβάλλεται από αέρα μπορούμε να αντικαταστήσουμε όλες τις αντιστάσεις συναγωγής με μία συνολική.

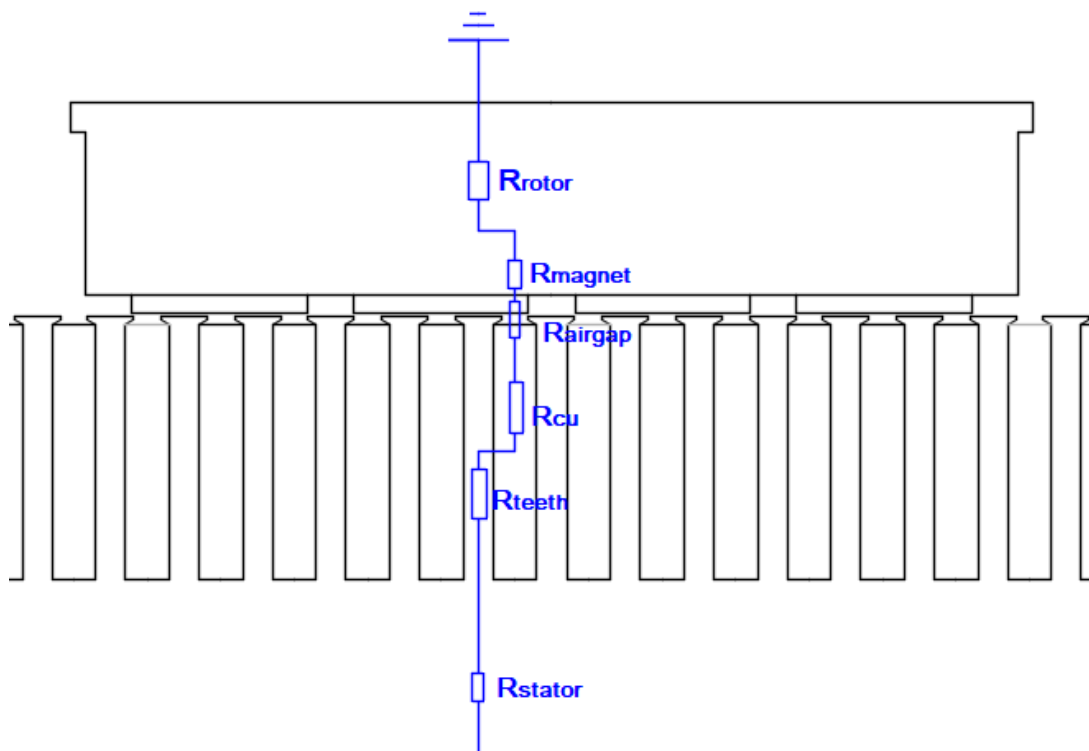
Επομένως το απλοποιημένο κύκλωμα συγκεντρωμένων παραμέτρων γράφεται ως εξής:



Εικόνα 6.2: Απλοποιημένο Κύκλωμα Συγκεντρωμένων Παραμέτρων

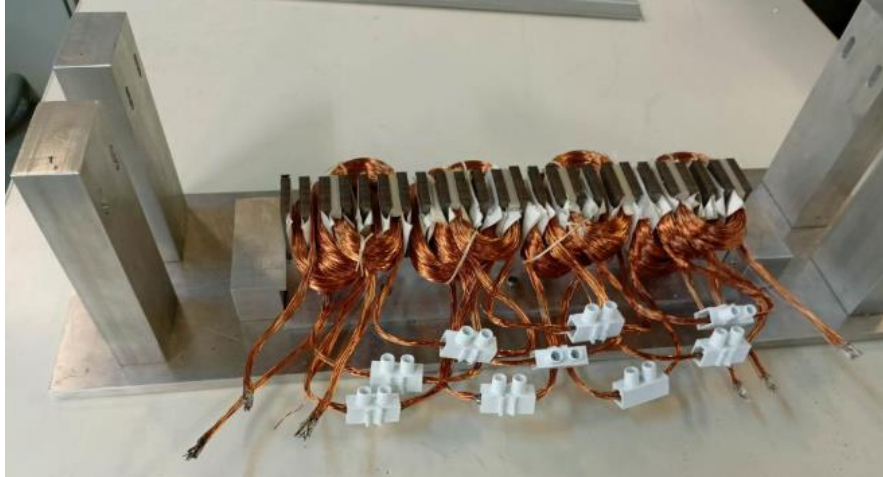
Όπου:

- I_1 οι απώλειες του δευτερεύοντος
- I_2 οι απώλειες του χαλκού
- I_3 οι απώλειες πυρήνα
- R_{conv} η συνολική θερμική αντίσταση συναγωγής
- $R_1 = R_{rotor} + R_{magnet} + R_{airgap}$
- R_{Cu} η θερμική αντίσταση των τυλιγμάτων του πρωτεύοντος
- R_{teeth} η θερμική αντίσταση των δοντιών του πρωτεύοντος
- $R_{core, stator}$ η θερμική αντίσταση του σώματος του πρωτεύοντος
- C_{rotor} η θερμοχωρητικότητα του δευτερεύοντος
- C_{teeth} η θερμοχωρητικότητα των δοντιών του πρωτεύοντος
- C_{core} η θερμοχωρητικότητα του σώματος του πρωτεύοντος

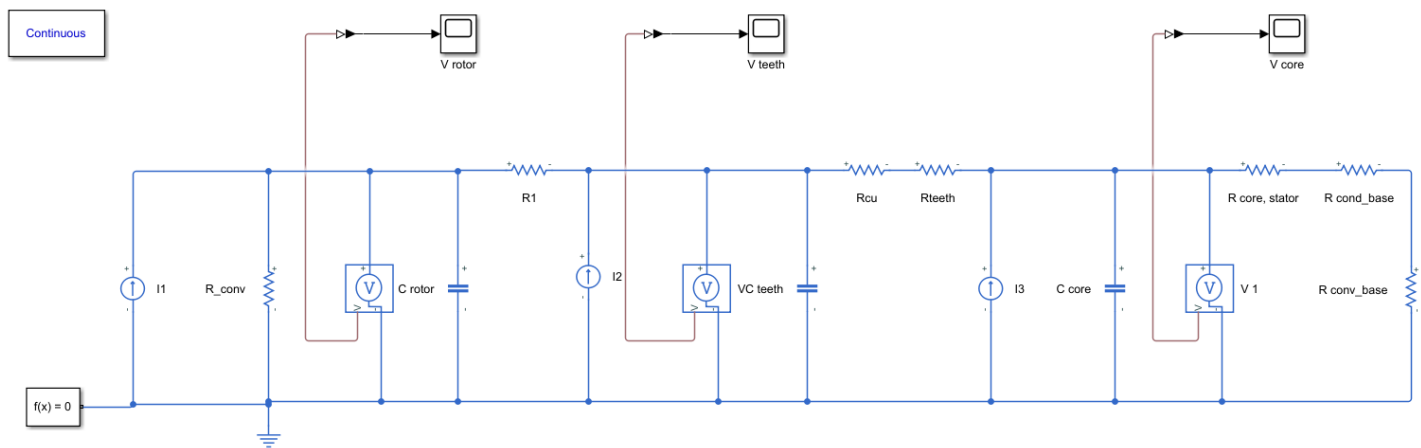


Εικόνα 6.3: Η ροή θερμότητας που μελετάει το κύκλωμα συγκεντρωμένων παραμέτρων

Η βάση της κατασκευής είναι μία πλάκα αλουμινίου πάχους 10mm και διαστάσεων 185mm * 600mm. Χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τη μηχανική στήριξη του πρωτεύοντος, επομένως δεν επηρεάζει την ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά της μηχανής όμως λειτουργεί και ως απαγωγός θερμότητας μέσω αγωγής από το πρωτεύον. Το ίδιο ισχύει και για τις τέσσερις αλουμινένιες «κολώνες» διαστάσεων 60mm*40mm*165mm που τοποθετούν και συγκρατούν το δευτερεύον στη θέση του.



Εικόνα 6.4: Η βάση της κατασκευής και οι τέσσερις κολώνες της μαζί με το πρωτεύον και τα τυλίγματα του



Εικόνα 6.5: Το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα συγκεντρωμένων παραμέτρων που θα μελετηθεί

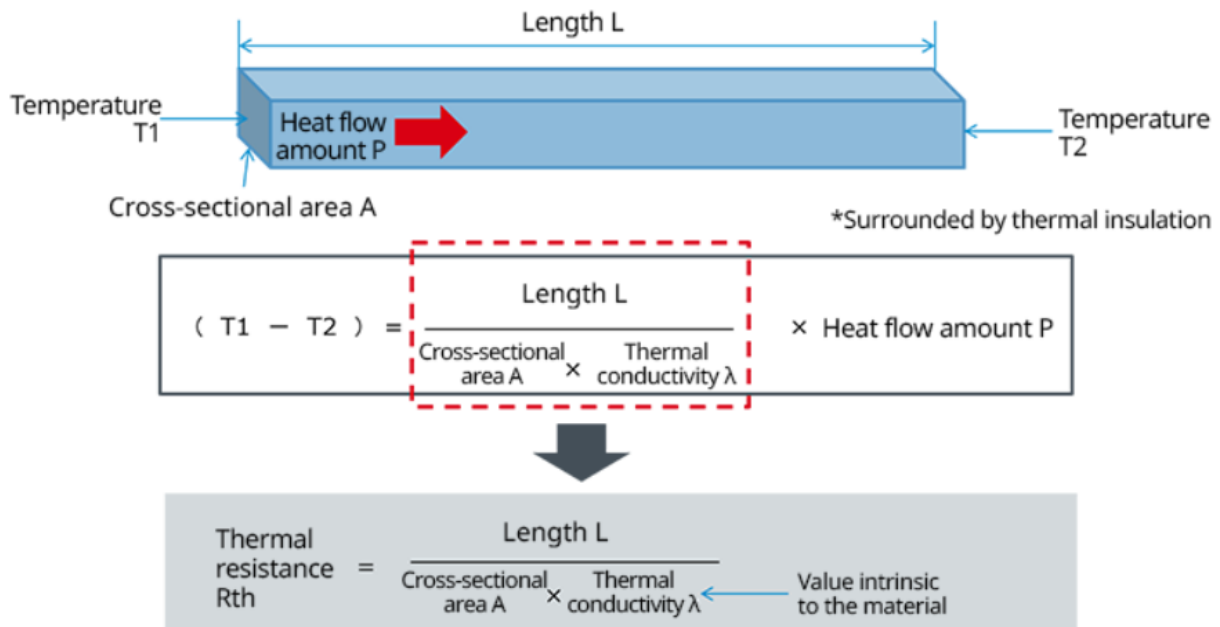
6.3 Υπολογισμός Τιμών Κυκλώματος Συγκεντρωμένων Παραμέτρων

6.3.1 Θερμικές Αντιστάσεις Αγωγής

Για τον υπολογισμό των αντιστάσεων, εξαιτίας της μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγής, που θα τοποθετηθούν στο ισοδύναμο θερμικό κύκλωμα θα χρησιμοποιήσω τη σχέση 6.1 δηλαδή:

$$R = \frac{\chi}{\lambda \cdot S}$$

Όπου χ το πάχος του υλικού, λ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού και S η επιφάνεια μέσω της οποίας μεταδίδεται η θερμότητα Q .



Εικόνα 6.6: Υπολογισμός της θερμικής αντίστασης αγωγής. [59]

Θερμική Αντίσταση Δευτερεύοντος

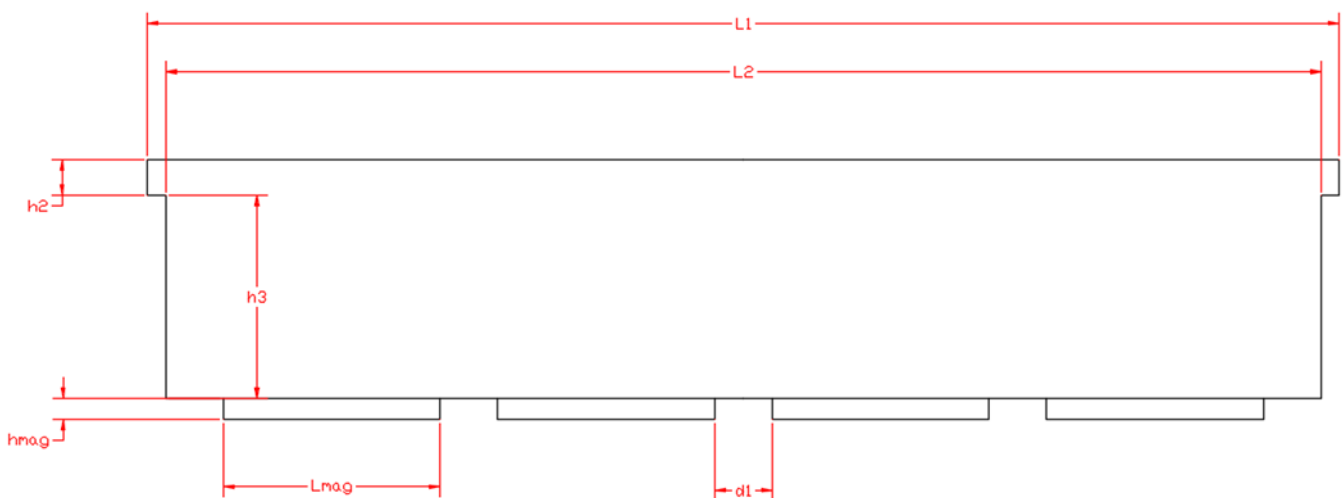
Με βάση όσα γράφτηκαν παραπάνω, δεδομένου ότι το πάχος του δευτερεύοντος είναι $\chi = 30\text{mm}$ και θεωρώντας συντελεστή αγωγιμότητας του σιδήρου του δρομέα $\lambda = 19 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$, η αντίσταση του δευτερεύοντος υπολογίζεται:

$$R_{rotor} = \frac{\chi}{\lambda \cdot S} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{19 \cdot 4800 \cdot 10^{-6}} = 0.3289 \Omega$$

Η επιφάνεια επαφής του δευτερεύοντος υπολογίστηκε βάσει της εικόνας 6.6 ως εξής:

$$S = \text{depth} * L_2$$

Όπου depth το ενεργό μήκος της μηχανής το οποίο είναι 30mm.



Εικόνα 6.6: Το δευτερεύον της υπό μελέτη μηχανής

Θερμική Αντίσταση Μαγνητών

Οι μόνιμοι μαγνήτες του δευτερεύοντος έχουν πάχος $\chi = 3\text{mm}$ και συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $\lambda = 8.40737 \frac{W}{m \cdot K}$.

$$R_{mag} = \frac{\chi}{\lambda \cdot S} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{8,40737 \cdot 3600 \cdot 10^{-6}} = 0.1 \Omega$$

Αυτή τη φορά η επιφάνεια επαφής των μαγνητών υπολογίζεται:

$$S = 4 * depth * L_{mag}$$

Θερμική Αντίσταση Διακένου

Το διάκενο έχουμε επιλέξει να έχει πάχος $\chi = 0.7\text{mm}$, ενώ ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητάς του είναι $\lambda = 0.025 \frac{W}{m \cdot K}$. Επομένως:

$$R_{airgap} = \frac{\chi}{\lambda \cdot S} = \frac{0.7 \cdot 10^{-3}}{0.025 \cdot 4800 \cdot 10^{-6}} = 5.84 \Omega$$

Παρατηρούμε ότι η εν λόγω αντίσταση είναι σημαντικά μεγαλύτερη από όλες τις υπόλοιπες που υπολογίσαμε σε αυτή την ενότητα. Η τιμή αυτή είναι προσέγγιση της πραγματικής, η εύρεση της οποίας απαιτεί αναλυτικούς υπολογισμούς καθώς εξαρτάται από πληθώρα παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, η πίεση και η ταχύτητα του αέρα καθώς και του δευτερεύοντος και των μαγνητών.

Θερμική Αντίσταση Τυλιγμάτων Πρωτεύοντος

Για τον υπολογισμό της αντίστασης των τυλιγμάτων θεωρούμε, για λόγους ευκολίας, ότι κάθε αύλακα είναι πλήρης χαλκού και επομένως έχει πάχος $\chi = 43.9226\text{mm}$. Επιπλέον η επιφάνεια S είναι: $S = 5400 \text{mm}^2$, άρα για συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $\lambda = 400 \frac{W}{m \cdot K}$ έχουμε:

$$R_{cu} = \frac{\chi}{\lambda \cdot S} = \frac{43.9226 \cdot 10^{-3}}{400 \cdot 24 \cdot 30 \cdot 7.5 \cdot 10^{-6}} = 0.02 \Omega$$

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι στον παραπάνω υπολογισμό δεν λαμβάνεται υπόψη η ακτινική καμπυλότητα των αγωγών των πηνίων εξαιτίας του κατανεμημένου τυλίγματος στα άκρα του πρωτεύοντος.

Θερμική Αντίσταση Δοντιών Πρωτεύοντος

Για τον υπολογισμό της αντίστασης των δοντιών του πρωτεύοντος θεωρούμε ότι όλα τα δόντια είναι όμοια μεταξύ τους και επομένως η επιφάνειά τους δια μέσου της οποίας διέρχεται η θερμότητα είναι ίση. Με τη βοήθεια του AutoCad υπολογίζουμε ότι $S = 5925\text{mm}^2$. Για $\chi = 45\text{mm}$ και $\lambda = 19 \frac{W}{m \cdot K}$ έχουμε:

$$R_{teeth} = \frac{\chi}{\lambda \cdot S} = \frac{45 \cdot 10^{-3}}{19 \cdot 5925 \cdot 10^{-6}} = 0.4 \Omega$$

Θερμική Αντίσταση Σώματος Πρωτεύοντος

Το σώμα του πρωτεύοντος έχει πάχος $\chi = 30\text{mm}$ και επιφάνεια επαφής $S = 9750 \text{mm}^2$ επομένως:

$$R_{core} = \frac{\chi}{\lambda \cdot S} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{19 \cdot 30 \cdot 325 \cdot 10^{-6}} = 0.162 \Omega$$

Θερμική Αντίσταση Αλουμινένιας Βάσης

Η βάση της μηχανής έχει πάχος $\chi = 10\text{mm}$ και επιφάνεια $S = 185 \cdot 600 = 111000\text{mm}^2$ επομένως:

$$R_{cond_base} = \frac{x}{\lambda \cdot S} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{237 \cdot 111000 \cdot 10^{-6}} = 0.038 \Omega$$

6.3.2 Θερμικές Αντιστάσεις Συναγωγής

Ο υπολογισμός της θερμικής αντίστασης εξαιτίας του μηχανισμού της συναγωγής γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση 6.2 επιλέγοντας κατάλληλο συντελεστή h , δηλαδή:

$$R = \frac{1}{h \cdot S}$$

Δεδομένης της απουσίας περιβλήματος (housing) ολόκληρη η LPMSM βρίσκεται σε επαφή με τον αέρα ενώ ο μοναδικός μηχανισμός ψύξης της είναι η φυσική ροή.

Η επιφάνεια του δευτερεύοντος που βρίσκεται σε επαφή με τον αέρα αγνοώντας την επιφάνεια του διακένου είναι: $S_r = depth * (L_1 + 2 * (h_2 + h_3)) + 2 * (h_2 + h_3) * L_1 = 16350 \text{ mm}^2$

Η επιφάνεια του πρωτεύοντος που βρίσκεται σε επαφή με τον αέρα αγνοώντας την επιφάνεια του διακένου είναι: $S_s = depth * (2 * (R_x + R_t) + 2 * 325 - L_2) + 2 * (R_x + R_t) * 325 = 65850 \text{ mm}^2$

Επομένως η συνολική επιφάνεια είναι: $S = S_r + S_s = 82200 \text{ mm}^2$

Όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 5.1.2 ο συντελεστής h εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του ρευστού καθώς και από τις συνθήκες υπό τις οποίες λαμβάνει χώρα η συναγωγή, δηλαδή από τη ροή, τη ταχύτητά του και τη γεωμετρία του υπό μελέτη συστήματος. Επομένως ο προσδιορισμός του αν και αποφασιστικής σημασίας είναι ιδιαίτερα δύσκολος. Για ελεύθερη ροή αέρα όπως συμβαίνει σε αυτή τη περίπτωση ο εν λόγω συντελεστής κυμαίνεται από 2 έως 25. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θεωρούμε ότι $h = 10 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, επομένως η αντίσταση συναγωγής είναι:

$$R_{conv} = \frac{1}{10 \cdot 82200 \cdot 10^{-6}} = 1.22 \Omega$$

Ομοίως για τη βάση της μηχανής η οποία περιβάλλεται από αέρα υπολογίζουμε την αντίσταση συναγωγής:

$$R_{conv_base} = \frac{1}{10 \cdot (2 \cdot 10 \cdot 185 + 2 \cdot 10 \cdot 600 + 185 \cdot 600 - 325 \cdot 30) \cdot 10^{-6}} = 0.86 \Omega$$

6.3.3 Θερμοχωρητικότητες

Οι τιμές των θερμοχωρητικοτήτων υπολογίζονται από τη σχέση 6.3, δηλαδή:

$$C(J/K) = \rho \cdot c_p \cdot V$$

Καθώς οι όγκοι ήταν δύσκολο να υπολογιστούν με απλούς μαθηματικούς τύπους, για την εύρεσή τους χρησιμοποιήθηκε το AutoCad.

Έτσι για την θερμοχωρητικότητα του δευτερεύοντος, θεωρώντας ειδική θερμοχωρητικότητα του σιδήρου $c_p = 450 \frac{J}{kg \cdot K}$ και πυκνότητα $\rho = 7600 \text{ kg/m}^3$ έχουμε:

$$C_{rotor1} = 7600 \cdot 450 \cdot 0.00015915 = 544.293$$

Ομοίως για τους μαγνήτες με $c_p = 370 \frac{J}{kg \cdot K}$ και $\rho = 8200 \text{ kg/m}^3$ έχουμε:

$$C_{magnet} = 8200 \cdot 370 \cdot 1.08 \cdot 10^{-5} = 32.7672$$

Έτσι ο πρώτος πυκνωτής του απλοποιημένου κυκλώματος της εικόνας 6.2 είναι:

$$C_{rotor} = C_{rotor1} + C_{magnet} = 577.0602$$

Για τα τυλίγματα έχουμε $c_p = 390 \frac{J}{kg \cdot K}$ και $\rho = 8940 \text{ kg/m}^3$ επομένως:

$$C_{teeth} = 8940 \cdot 390 \cdot 0.000237182 = 826.959$$

Τέλος για το πρωτεύον με $c_p = 450 \frac{J}{kg \cdot K}$ και $\rho = 7600 \text{ kg/m}^3$ έχουμε:

$$C_{core} = 7600 * 450 * 0.000479261 = 1639.07$$

6.3.4 Πηγές Ρεύματος

Οι κυριότερες απώλειες της μηχανής όπως αναλύθηκαν στην ενότητα 4.4.6 είναι οι απώλειες χαλκού, πυρήνα και των μόνιμων μαγνητών. Πιο συγκεκριμένα έχουμε:

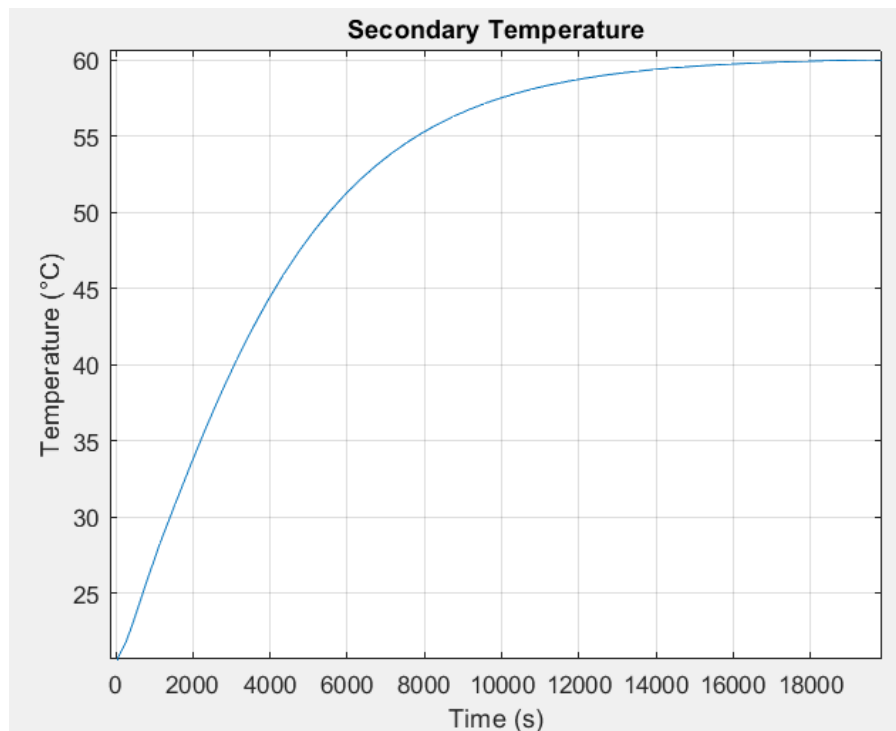
- $P_{cu} = 54 \text{ W}$
- $P_{fe} = 14.14 \text{ W}$
- $P_{mag} = 3.236 \text{ W}$

Επομένως για τις πηγές ρεύματος ισχύουν:

- $I_1 = P_{mag} = 3.236 \text{ A}$
- $I_2 = P_{cu} = 54 \text{ A}$
- $I_3 = P_{fe} = 14.14 \text{ A}$

6.4 Αποτελέσματα Μεθόδου Συγκεντρωμένων Παραμέτρων

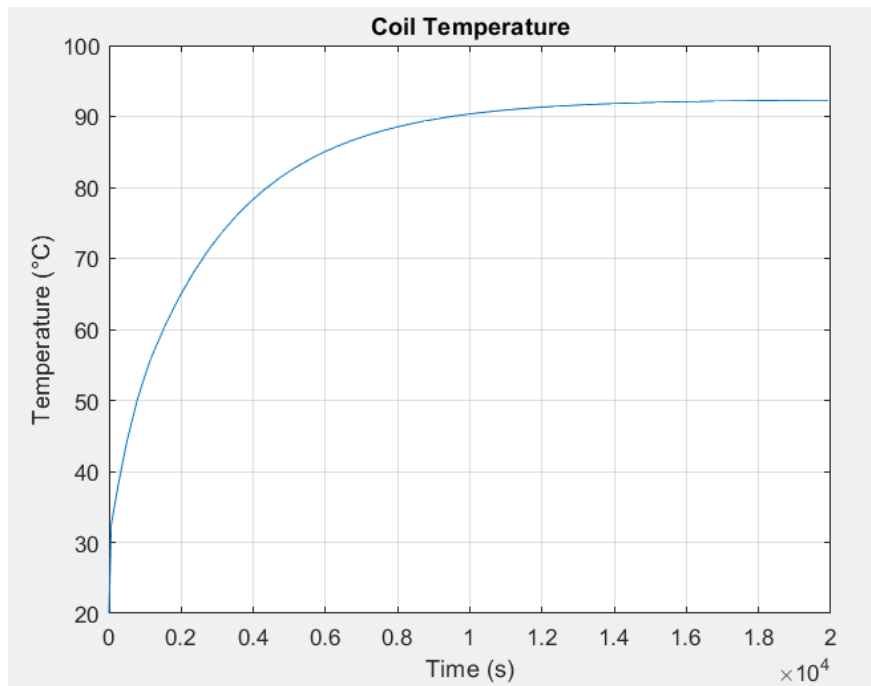
Θερμοκρασία Δευτερεύοντος σε συνάρτηση με το χρόνο



Διάγραμμα 6.1: Θερμοκρασία Δευτερεύοντος σε συνάρτηση με τον χρόνο

Στο διάγραμμα παρατηρείται ότι η τελική τιμή της θερμοκρασίας του δευτερεύοντος είναι 60.03°C , ενώ η σταθερά χρόνου του θερμικού αυτού φαινομένου (δηλαδή η χρονική διάρκεια που απαιτείται ώστε να φτάσει το δευτερεύον στο 63% της τελικής του θερμοκρασίας) είναι $\tau_{63\%} = 1.54 \text{ h} = 92.4 \text{ min}$.

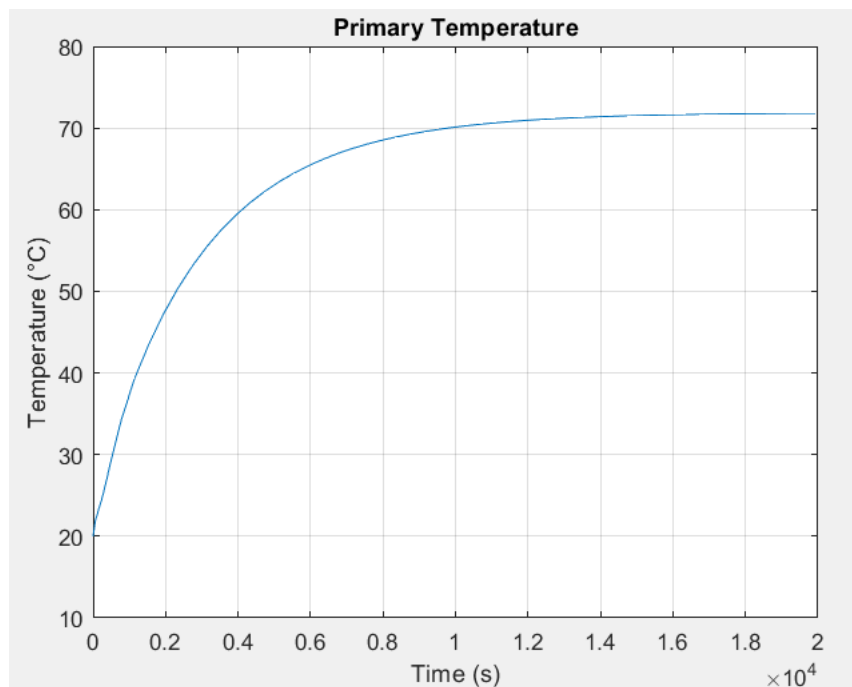
Θερμοκρασία Τυλιγμάτων Πρωτεύοντος σε συνάρτηση με το χρόνο



Διάγραμμα 6.2: Θερμοκρασία Τυλιγμάτων σε συνάρτηση με τον χρόνο

Στο διάγραμμα παρατηρείται ότι η τελική τιμή της θερμοκρασίας των τυλιγμάτων χαλκού του πρωτεύοντος είναι 92.29°C , ενώ η σταθερά χρόνου του θερμικού αυτού φαινομένου είναι $\tau_{63\%} = 0.76 \text{ h} = 45.7 \text{ min}$.

Θερμοκρασία Πρωτεύοντος σε συνάρτηση με το χρόνο



Διάγραμμα 6.3: Θερμοκρασία Πρωτεύοντος σε συνάρτηση με τον χρόνο

Στο διάγραμμα παρατηρείται ότι η τελική τιμή της του σώματος του πρωτεύοντος είναι 71.8°C , ενώ η σταθερά χρόνου του θερμικού αυτού φαινομένου είναι $\tau_{63\%} = 0.98 \text{ h} = 59 \text{ min}$.

6.5 Συμπεράσματα της Προσομοίωσης

Εξετάζοντας με προσοχή τα παραπάνω διαγράμματα εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματά τους είναι λογικώς ορθά. Οι μετρούμενες θερμοκρασίες είναι εντός των καθορισμένων ορίων ενώ οι γραφικές παραστάσεις έχουν την αναμενόμενη μορφή μιας καμπύλης με τα «κοίλα» προς τα κάτω, μέχρι να λάβουν την τελική και μόνιμη τιμή τους μετά από ένα χρονικό διάστημα αρκετών λεπτών.

Γενικά η θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στα τυλίγματα του πρωτεύοντος και στο σώμα του δεν αναμένεται να είναι τόσο μεγάλη (σχεδόν 21 °C) διότι τα τυλίγματα των αγωγών δεν απάγουν αποδοτικά θερμότητα.

Τέλος μεγάλη διαφορά παρατηρείται και ανάμεσα στη θερμοκρασία του δευτερεύοντος. Αυτό είναι λογικό καθώς σε αντίθεση με το πρωτεύον και τα τυλίγματα των φάσεων, στο δευτερεύον δεν συναντάται κάποια «ισχυρή» πηγή θερμότητας. Οι σημαντικότερες απώλειές του είναι εξαιτίας των μόνιμων μαγνητών οι οποίες είναι σημαντικά μικρότερες τόσο από τις απώλειες πυρήνα όσο και από τις απώλειες χαλκού οι οποίες σε χαμηλές ταχύτητες (όπως στη συγκεκριμένη μηχανή) κυριαρχούν. Στη πραγματικότητα αυτή η «κυριαρχία» των απωλειών χαλκού ευθύνεται για τις θερμοκρασιακές διαφορές ανάμεσα στα τυλίγματα του πρωτεύοντος και όλα τα υπόλοιπα μέρη της μηχανής

Τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου θα συγκριθούν για την εξαγωγή πιο ασφαλών συμπερασμάτων με τα αποτελέσματα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων.

Κεφάλαιο 7

Θερμική Ανάλυση Μηχανής με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μέθοδος των συγκεντρωμένων παραμέτρων μπορεί να δίνει λογικά αποτελέσματα, παρόλα αυτά είναι μία απλή μέθοδος η οποία όπως είδαμε είναι αρκετά προσεγγιστική. Για να αυξήσουμε την ακρίβεια και να ελέγξουμε την ορθότητα όσων υπολογίστηκαν από το ισοδύναμο θερμικό κύκλωμα, θα αναλύσουμε την ίδια μηχανή με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η δισδιάστατη ανάλυση της LPMSM μπορεί να εμφανίζει πιο ακριβή αποτελέσματα όμως απαιτεί επίσης μεγάλη υπολογιστική ισχύ και είναι σημαντικά πιο πολύπλοκη και χρονοβόρα. Επιπλέον όπως συμβαίνει και στη περίπτωση των ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων το FEMM δεν δύναται να λύσει χρονομεταβλητά προβλήματα επομένως δεν μπορεί να μας δώσει πληροφορίες για τα μεταβατικά φαινόμενα που μελετήσαμε νωρίτερα παρά μόνο για τη τελική κατάσταση.

7.1 Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων στην Επίλυση Θερμικού Προβλήματος

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και η επίλυση προβλημάτων στο FEMM αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.1. Στη περίπτωση των θερμικών προβλημάτων δεν διαφοροποιείται ούτε η διαδικασία ούτε η χρήση του λογισμικού. Αυτή τη φορά όμως λύνονται οι εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας που αναλύθηκαν στη ενότητα 5.1

Όπως νωρίτερα αφού σχεδιαστεί η γεωμετρία ορίζονται κατάλληλα υλικά και συνοριακές συνθήκες. Επιπλέον απαιτείται η προσθήκη πηγών θερμότητας. Στη συνέχεια γίνεται η πλεγμάτωση της σχεδιασμένης γεωμετρίας και επιλύεται το πρόβλημα με τη χρήση επαναληπτικών μεθόδων (συνήθως με τη μέθοδο Newton – Raphson). Η διαδικασία δηλαδή διαφέρει ελάχιστα από ότι περιγράψαμε στην ηλεκτρομαγνητική μελέτη της μηχανής (ενότητα 5) και βρίσκεται αναλυτικά εδώ [50]

Όπως και στη περίπτωση της μεθόδου συγκεντρωμένων παραμέτρων έτσι και εδώ αγνοείται η συνεισφορά της ακτινοβολίας στη θερμική συμπεριφορά της μηχανής. Μελετάμε δηλαδή μόνο τη διάδοση της θερμότητας με αγωγή και με συναγωγή.[51]

7.2 Το φαινόμενο της Αγωγής

Ο γενικός τύπος για την επίλυση των προβλημάτων αγωγής αναλύθηκε στην ενότητα 5.1.1 και είναι:

$$\nabla(\lambda \cdot \nabla T) + q = \rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt}$$

Θεωρώντας ότι το υλικό είναι ομογενές και συνεπώς πως ο συντελεστής θερμική αγωγιμότητας λ είναι ανεξάρτητος από την περιοχή του υλικού που εξετάζεται, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί:

$$\lambda \cdot \nabla^2 \cdot T + q = \rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} \Leftrightarrow \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{d^2 T}{dz^2} + \frac{q}{\lambda} = \frac{\rho \cdot c_p}{\lambda} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (7.1)$$

Ορίζουμε ένα νέο συντελεστή ο οποίος ονομάζεται συντελεστής θερμικής διάχυσης του υλικού και για τον οποίο ισχύει:

$$\alpha (m^2/s) = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$$

Έτσι η εξίσωση 7.1 γράφεται:

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} + \frac{q}{\lambda} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (7.2)$$

Ανάλογα με τις συνθήκες του προβλήματος η σχέση 7.2 μπορεί να πάρει τις ακόλουθες μορφές:

- Εξίσωση Poisson στη περίπτωση που αναλύουμε θερμικά τη μόνιμη κατάσταση της μηχανής. Καθώς η θερμοκρασία δεν μεταβάλλεται με τη πάροδο του χρόνου ισχύει ότι $\frac{dT}{dt} = 0$ και επομένως η 7.2 γίνεται:

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} + \frac{q}{\lambda} = 0 \quad (7.3)$$

- Εξίσωση Fourier στη περίπτωση που απουσιάζουν πηγές θερμότητας στο σύστημα, δηλαδή έχουμε $q=0$. Η εξίσωση 7.2 γράφεται:

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (7.4)$$

- Εξίσωση Laplace στη περίπτωση που απουσιάζουν πηγές θερμότητας από το σύστημα ($q=0$) και αναλύουμε τη μόνιμη κατάσταση της μηχανής ($\frac{dT}{dt} = 0$). Η εξίσωση 7.2 γράφεται:

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} + \frac{d^2T}{dz^2} = 0 \quad (7.5)$$

7.3 Το φαινόμενο της Συναγωγής

Ο γενικός τύπος για την επίλυση των προβλημάτων αγωγής αναλύθηκε στην ενότητα 5.1.2 και είναι:

$$q = \frac{dQ}{dt} = h \cdot (T_s - T_{fluid})$$

Θεωρώντας ότι η μετάδοση της θερμότητας πραγματοποιείται μονοδιάστατα και κάθετα στην επιφάνεια του ρευστού η παραπάνω σχέση με τη συμβολή της εξίσωσης 5.3 δηλαδή $q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx}$ γίνεται:

$$-\lambda \cdot \frac{dT}{dx} = h \cdot (T_s - T_{fluid})$$

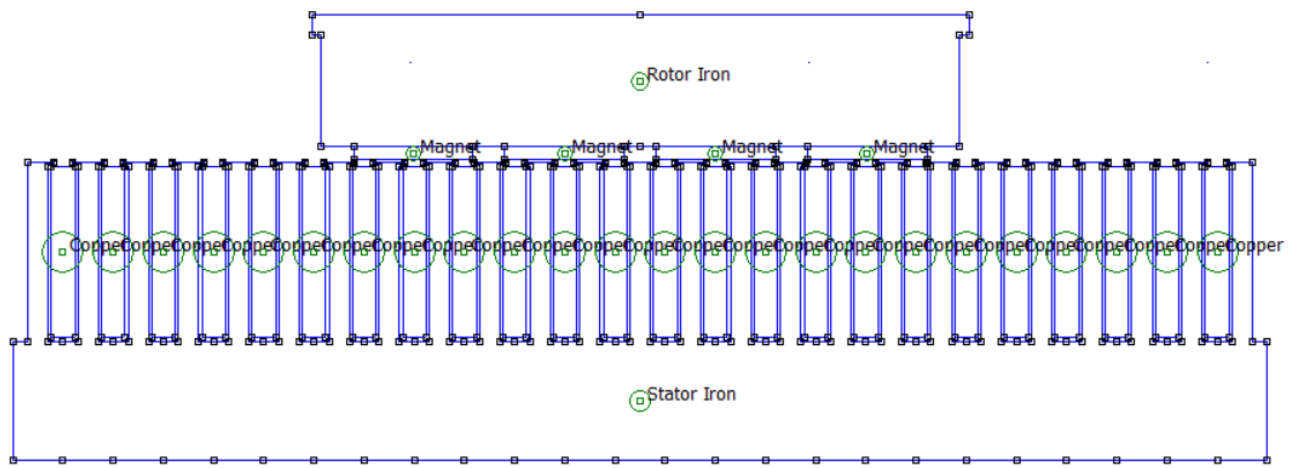
7.4 Οριακές Συνθήκες για Θερμικό Πρόβλημα

Η σημασία προσδιορισμού των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών για την επίλυση ενός προβλήματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων εξηγήθηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.3. Για την επίλυση ενός θερμικού και όχι ενός ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος στο περιβάλλον του FEMM υπάρχουν οι εξής διαφοροποιήσεις των συνθηκών που αναφέρθηκαν νωρίτερα [34]:

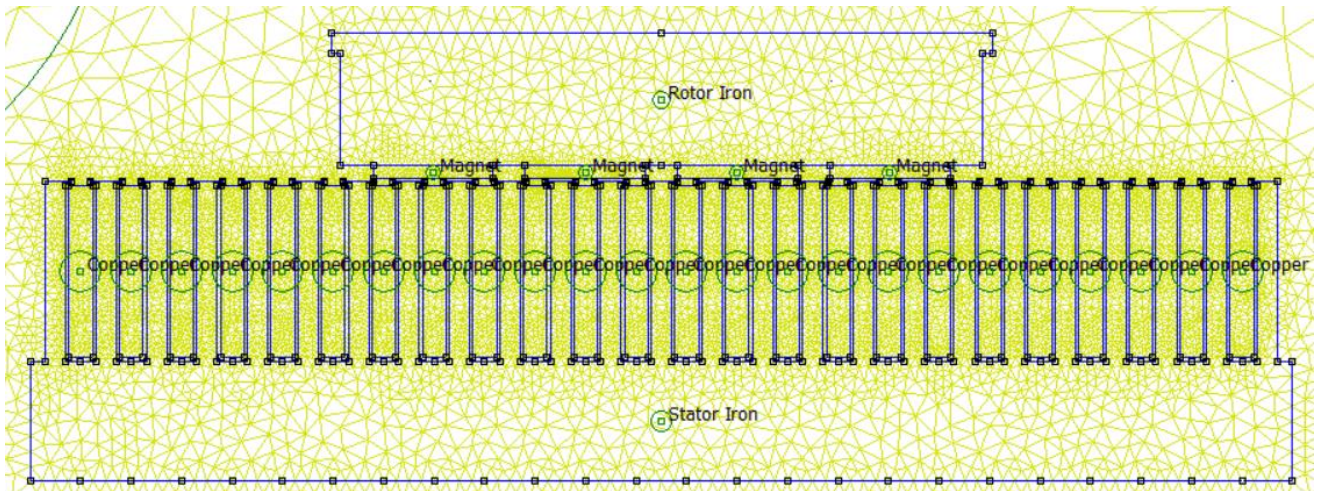
- Σταθερής θερμοκρασίας επιφάνειας: $T(0, t) = T_s$
- Σταθερής πυκνότητας θερμορροής: $\left[-\lambda \cdot \frac{dT}{dx}\right]_{x=0} = q$
- Συναγωγής: $\left[-\lambda \cdot \frac{dT}{dx}\right]_{x=0} = h \cdot (T(0, t) - T_{fluid})$
- Εκπομπής ακτινοβολίας: $\left[-\lambda \cdot \frac{dT}{dx}\right]_{x=0} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T(0, t)^4 - T_{env}^4)$
- Περιοδική και Αντιπεριοδική όπως ορίστηκαν στο κεφάλαιο 4.3

7.5 Ανάλυση Κάθετης Τομής της Μηχανής

Το σχέδιο της κάθετης τομής της LPMSM φαίνεται στην εικόνα 7.1 και το πλέγμα που δημιουργεί το FEMM για την επίλυση του θερμικού προβλήματος στην εικόνα 7.2.



Εικόνα 7.1: Κάθετη τομή στον άξονα της μηχανής



Εικόνα 7.2: Το πλέγμα που σχεδιάστηκε μέσω FEMM για την επίλυση του προβλήματος

7.5.1 Ιδιότητες Υλικών και Πηγές Θερμότητας

Για την εξαγωγή ορθών συμπερασμάτων απαραίτητος είναι ο κατάλληλος ορισμός των υλικών κατασκευής της μηχανής και πιο συγκεκριμένα ο ορθός προσδιορισμός των θερμικών τους ιδιοτήτων. Αγνοώντας τις μονώσεις το σύστημα αποτελείται από τέσσερα υλικά των οποίων οι θερμικές ιδιότητες φαίνονται στο παρακάτω πίνακα.

Υλικό	Πυκνότητα $\rho(kg/m^3)$	Θερμική Αγωγιμότητα $\lambda(\frac{W}{m \cdot K})$	Ειδική Θερμοχωρητικότητα $c_p(J/kg \cdot K)$
Αέρας	1.161	0.025	1050
Τυλίγματα (Χαλκός)	8940	400	390
Μόνιμοι Μαγνήτες	8200	8.40737	370
Μαγνητική Λαμαρίνα	7600	19	450

Πίνακας 7.1: Θερμικές ιδιότητες των υλικών κατασκευής της μηχανής

Στο FEMM κατά τον προσδιορισμό των υλικών ορίζεται και η θερμοχωρητικότητα ανά μονάδα όγκου η οποία υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την πρώτη στήλη του πίνακα με τη τελευταία.

Τέλος απαιτείται και ο υπολογισμός των πηγών θερμότητας οι οποίες προκύπτουν εξαιτίας των απωλειών χαλκού, πυρήνα και μόνιμων μαγνητών. Υπενθυμίζεται ότι:

- $P_{cu} = 54 \text{ W}$
- $P_{fe} = 14.14 \text{ W}$
- $P_{mag} = 3.236 \text{ W}$

Στο FEMM στις ιδιότητες των υλικών ορίζεται και η ισχύς θερμότητας που παράγουν ανά μονάδα όγκου (σε W/m^3), επομένως κατά τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του χαλκού το αντίστοιχο πεδίο συμπληρώνεται ως εξής:

$$Volume_Heat_Generation = \frac{54}{2.372 \cdot 10^{-4}} = 227656 \text{ W/m}^3$$

Όπου $V = 2.372 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ ο συνολικός όγκος των τυλιγμάτων του χαλκού του πρωτεύοντος. Ομοίως κατά τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων του πρωτεύοντος έχουμε:

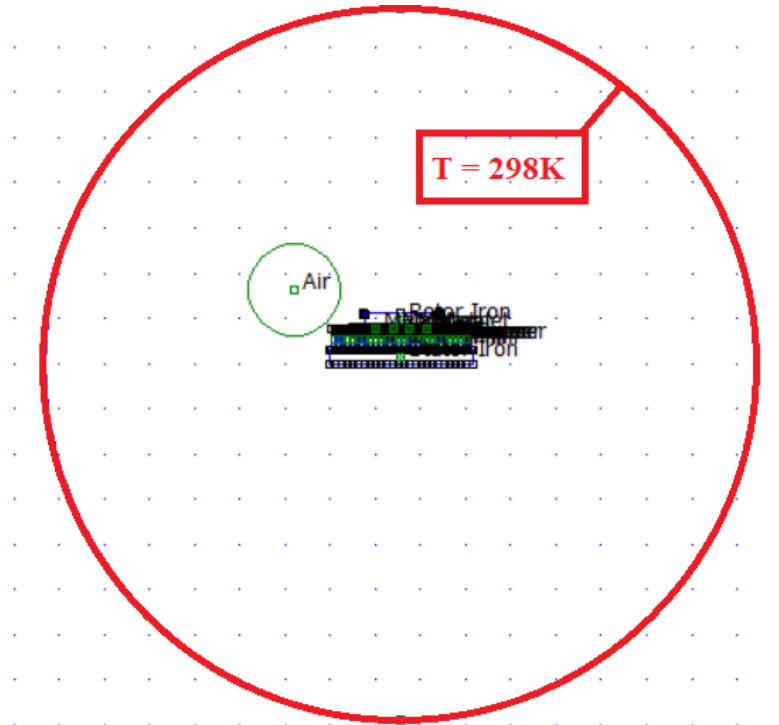
$$Volume_Heat_Generation = \frac{14.14}{0.000479261} = 29504 \text{ W/m}^3$$

Τέλος για τους μόνιμους μαγνήτες SmCo:

$$Volume_Heat_Generation = \frac{3.236}{1.08 \cdot 10^{-5}} = 299629 \text{ W/m}^3$$

7.5.2 Ορισμός Οριακών Συνθηκών

Εκτός από τη γεωμετρία της μηχανής απαραίτητος είναι και ο σχεδιασμός μίας κυκλικής επιφάνειας η οποία αποτελεί το θερμικό σύνορο της μελέτης μας. Ο κύκλος αυτός έχει ακτίνα πέντε φορές μεγαλύτερη από το πρωτεύον της μηχανής και αποτελεί τον γεωμετρικό τόπο των σημείων αναφοράς της θερμοκρασίας, όπως αποτελούσε η συνθήκη Dirichlet στο μαγνητοστατικό πρόβλημα. Εκεί ορίζεται η θερμοκρασία περιβάλλοντος ίση με 25°C ή 298°K .



Boundary Property

Name: AmbientTemp

BC Type: Fixed Temperature

Fixed Temperature, K: 298

Heat Flux, W/m²: 0

Convection

$K \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_0) = 0$

h, W/(m²·K): 0

To, K: 0

Radiation

$K \frac{\partial T}{\partial n} + \beta k_{\text{rad}}(T^4 - T_0^4) = 0$

Beta: 0

To, K: 0

Εικόνα 7.3: Ο ορισμός της συνοριακής συνθήκης σταθερής θερμοκρασίας επιφάνειας στο FEMM

Επιπλέον ορίζεται και η συνθήκη απαγωγής θερμότητας μέσω συναγωγής εξαιτίας της επαφής των τυλιγμάτων, του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος με τον αέρα. Όπως και στη μέθοδο συγκεντρωμένων παραμέτρων επιλέγουμε το συντελεστή συναγωγής h του αέρα να είναι $h = 10 \frac{W}{m^2 \cdot K}$.

Boundary Property

Name: Stator-Air

BC Type: Convection

Fixed Temperature, K: 0

Heat Flux, W/m²: 0

Convection

$K \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_0) = 0$

h, W/(m²·K): 10

To, K: 298

Radiation

$K \frac{\partial T}{\partial n} + \beta k_{\text{rad}}(T^4 - T_0^4) = 0$

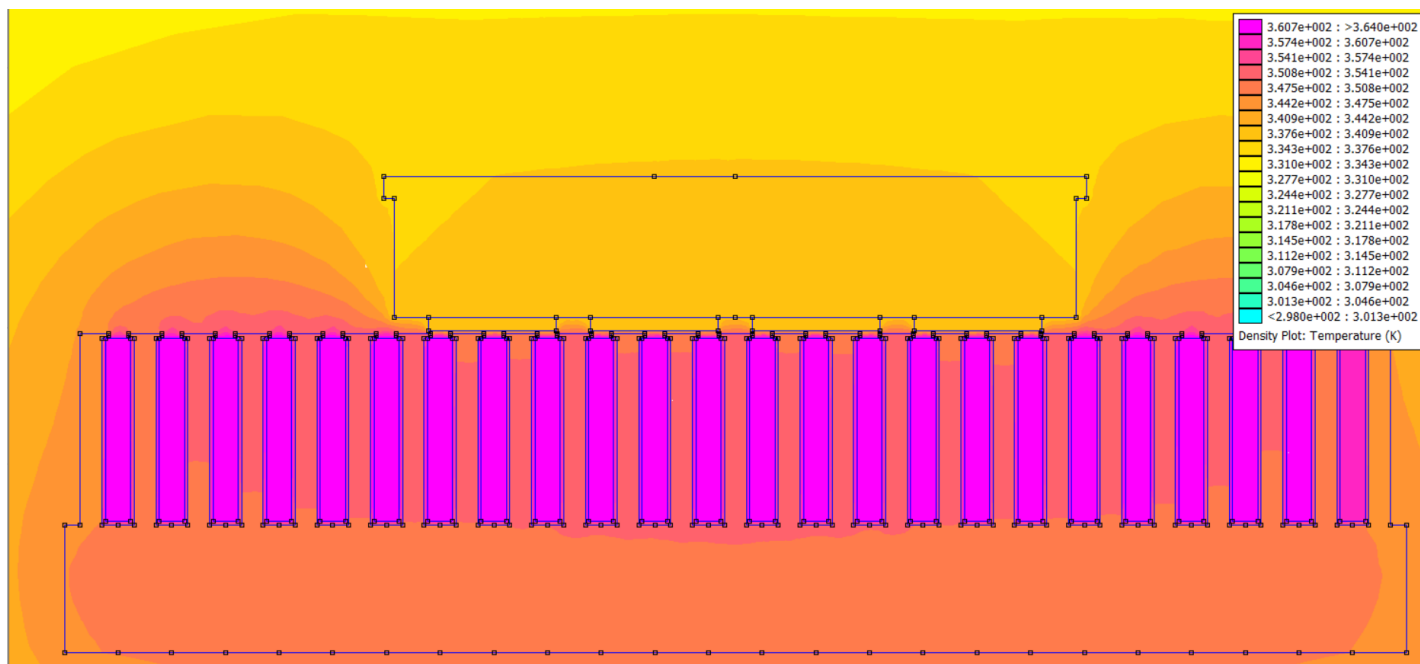
Beta: 0

To, K: 298

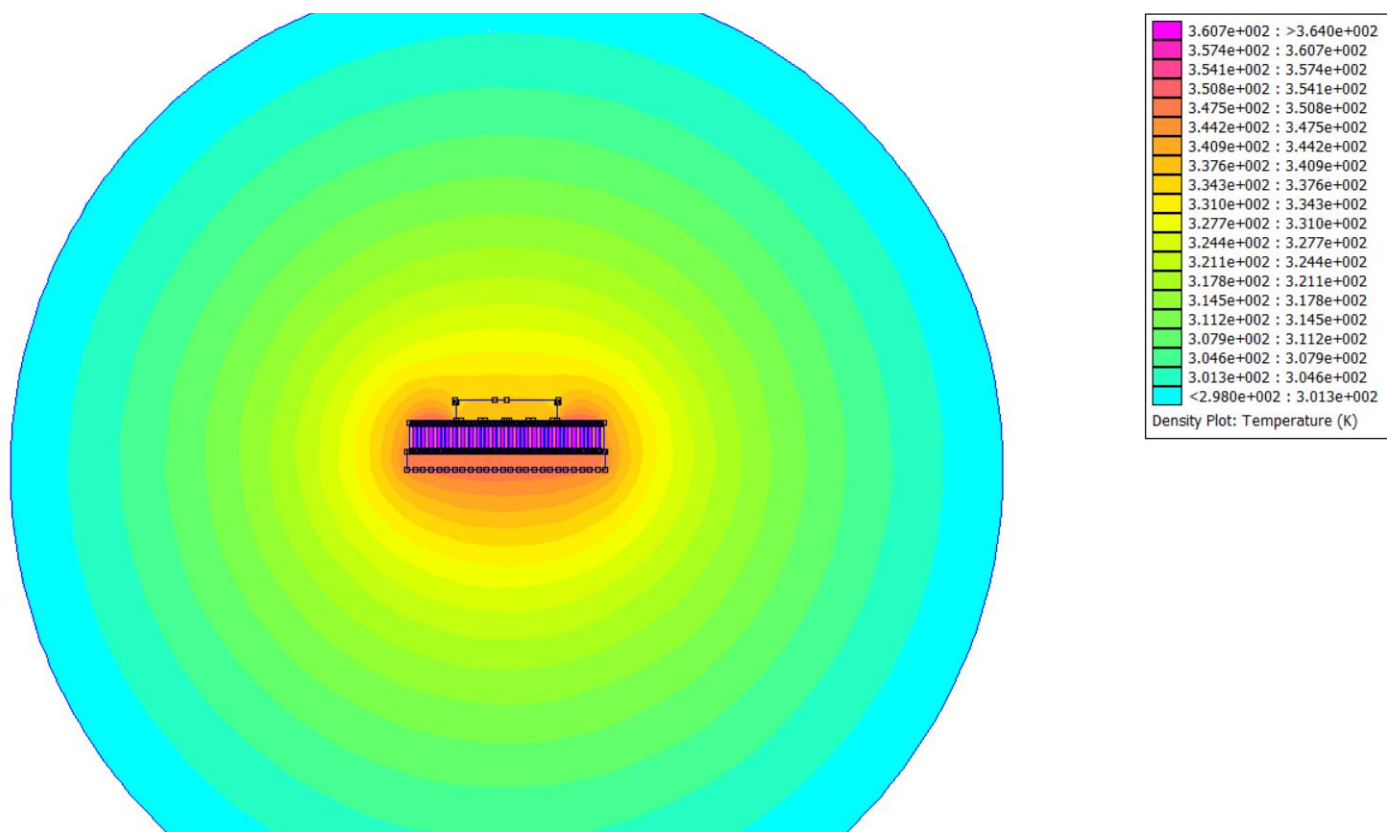
Εικόνα 7.4: Ο ορισμός της συνοριακής συνθήκης συναγωγής του αέρα

7.5.3 Αποτελέσματα Δισδιάστατης Προσομοίωσης

Στην εικόνα 7.5 φαίνεται η θερμοκρασιακή κατανομή σε μία «φέτα» της μηχανής κάθετη στον άξονα της. Δεδομένου ότι το δευτερεύον δεν καλύπτει εξ ολοκλήρου το πρωτεύον (όπως συμβαίνει σε μία κυλινδρική μηχανή) παρατηρούμε ότι τα δύο ακριανά δόντια έχουν ελαφρώς μικρότερη θερμοκρασία (της τάξεως του 1°C) από τα υπόλοιπα.



Εικόνα 7.5: Θερμοκρασιακή Κατανομή σε μία τομή της μηχανής κάθετη ως προς τον άξονά της. Το υπόμνημα φαίνεται στην πάνω δεξιά γωνία



Εικόνα 7.6: Η κατανομή της θερμοκρασίας στο χώρο

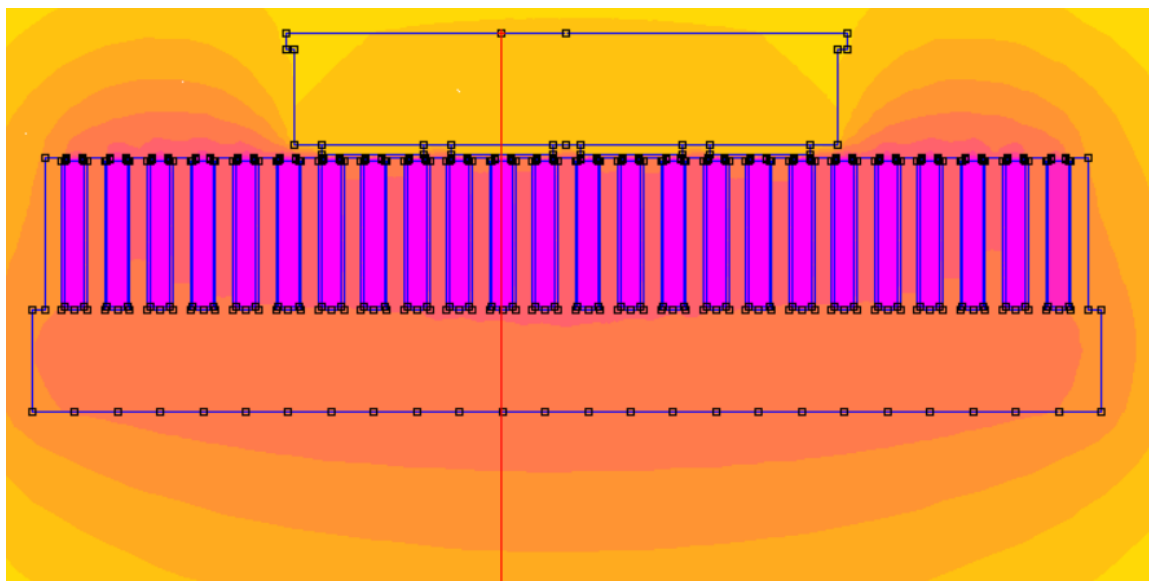
Οι θερμοκρασίες των κρίσιμων περιοχών της μηχανής καταγράφονται στον παρακάτω πίνακα:

Περιοχή της Μηχανής	Θερμοκρασία (°C)
Σώμα Πρωτεύοντος	77.34
Τυλίγματα Πρωτεύοντος	90.63
Δευτερεύον	65.3

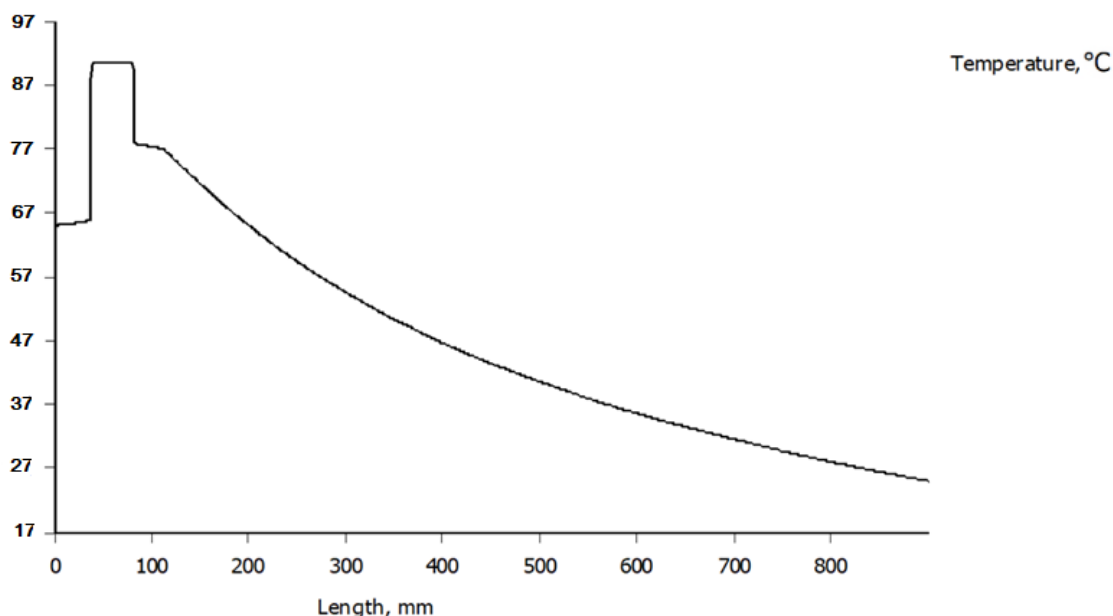
Πίνακας 7.2: Θερμοκρασίες Κρίσιμων Περιοχών της Μηχανής

Παρατηρούμε ότι το θερμότερο μέρος της μηχανής είναι τα τυλίγματα του πρωτεύοντος, εξαιτίας των υψηλών απωλειών χαλκού οι οποίες σε εφαρμογές χαμηλών ταχυτήτων κυριαρχούν έναντι των απωλειών πυρήνα. Λίγο λιγότερο θερμό είναι το σώμα του πρωτεύοντος καθώς αφενός βρίσκεται σε επαφή με τα τυλίγματα χαλκού και αφετέρου εκεί εντοπίζονται οι απώλειες πυρήνα που υπολογίσαμε νωρίτερα. Όσο απομακρυνόμαστε από τη γεωμετρία της μηχανής προς τον περιβάλλοντα χώρο (ατμοσφαιρικός αέρας) η θερμοκρασία σταδιακά μειώνεται μέχρι να φτάσει την τιμή των 25°C εξαιτίας της συντομικής συνθήκης σταθερής θερμοκρασίας επιφάνειας που ορίσαμε (Εικόνα 7.3).

Η μεταβολή αυτή της θερμοκρασίας φαίνεται και στο διάγραμμα 7.1. Ορίζουμε ένα ευθύγραμμο τμήμα (Εικόνα 7.7) το οποίο εκκινεί από το δευτερεύον και καταλήγει στο σύνορο της γεωμετρίας, ενώ διέρχεται από όλα τα μέρη της μηχανής (δευτερεύον, μαγνήτες, διάκενο, τυλίγματα χαλκού, σώμα πρωτεύοντος). Στη συνέχεια μετράμε την θερμοκρασία σε όλο το μήκος του με τη βοήθεια του FEMM με αποτέλεσμα την γραφική παράσταση της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την απόσταση από το πάνω μέρος του δευτερεύοντος.



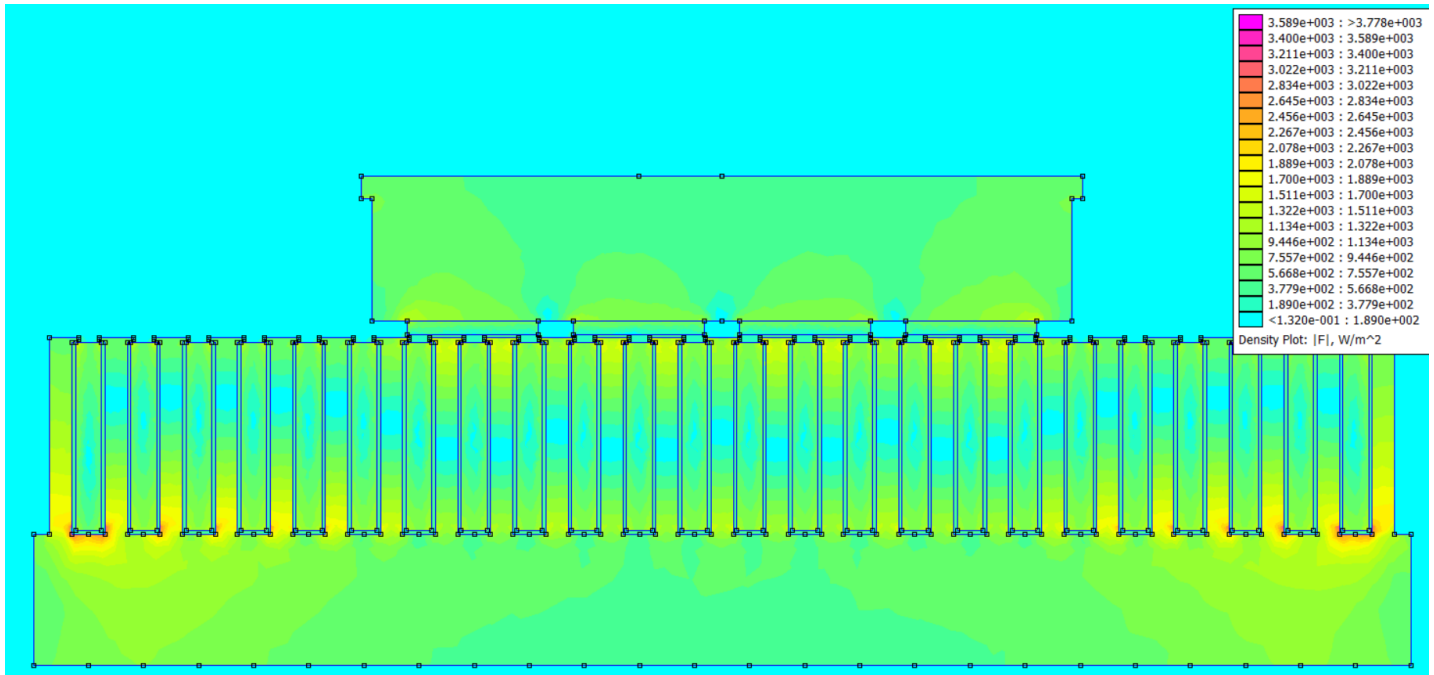
Εικόνα 7.7: Το ευθύγραμμο τμήμα (κόκκινο) κατά μήκος του οποίου γίνονται οι υπολογισμοί στα διαγράμματα 7.1, 7.2 και 7.3



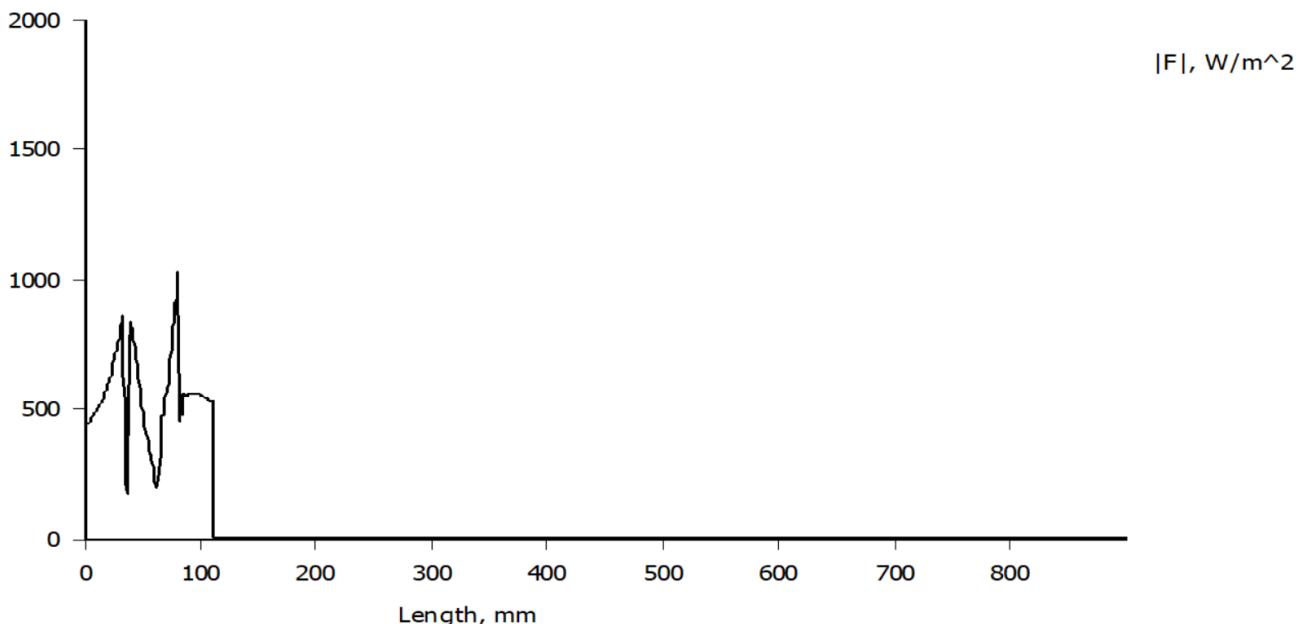
Διάγραμμα 7.1: Η θερμοκρασία του συστήματος σε συνάρτηση με την απόσταση από το πάνω μέρος του δευτερεύοντος.

Παρατηρούμε ότι η αρχική θερμοκρασία είναι αυτή του δευτερεύοντος ενώ στη συνέχεια αυξάνεται ελαφρώς εξαιτίας των μαγνητών. Στο διάκενο και κατόπιν στα τυλίγματα λαμβάνει μέγιστη τιμή ενώ στη συνέχεια με την έναρξη του πρωτεύοντος και μετά την έξοδο από τη γεωμετρία της μηχανής μειώνεται σταδιακά μέχρι να φτάσει την προκαθορισμένη τιμή των 25°C.

Ένα ακόμα σημαντικό μέγεθος για μία πλήρη θερμική ανάλυση είναι η πυκνότητα της ροής της θερμότητας, δηλαδή ο ρυθμός μετάδοσης της θερμότητας ανά μονάδα επιφανείας από μία περιοχή μεγαλύτερης θερμοκρασίας σε μία περιοχή χαμηλότερης. Η κατανομή της φαίνεται στην εικόνα 7.8 ενώ εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία με πριν (ορίζοντας δηλαδή το ίδιο ευθύγραμμο τμήμα) σχεδιάζεται το διάγραμμα 7.2.



Εικόνα 7.8: Η κατανομή της πυκνότητας θερμοροής

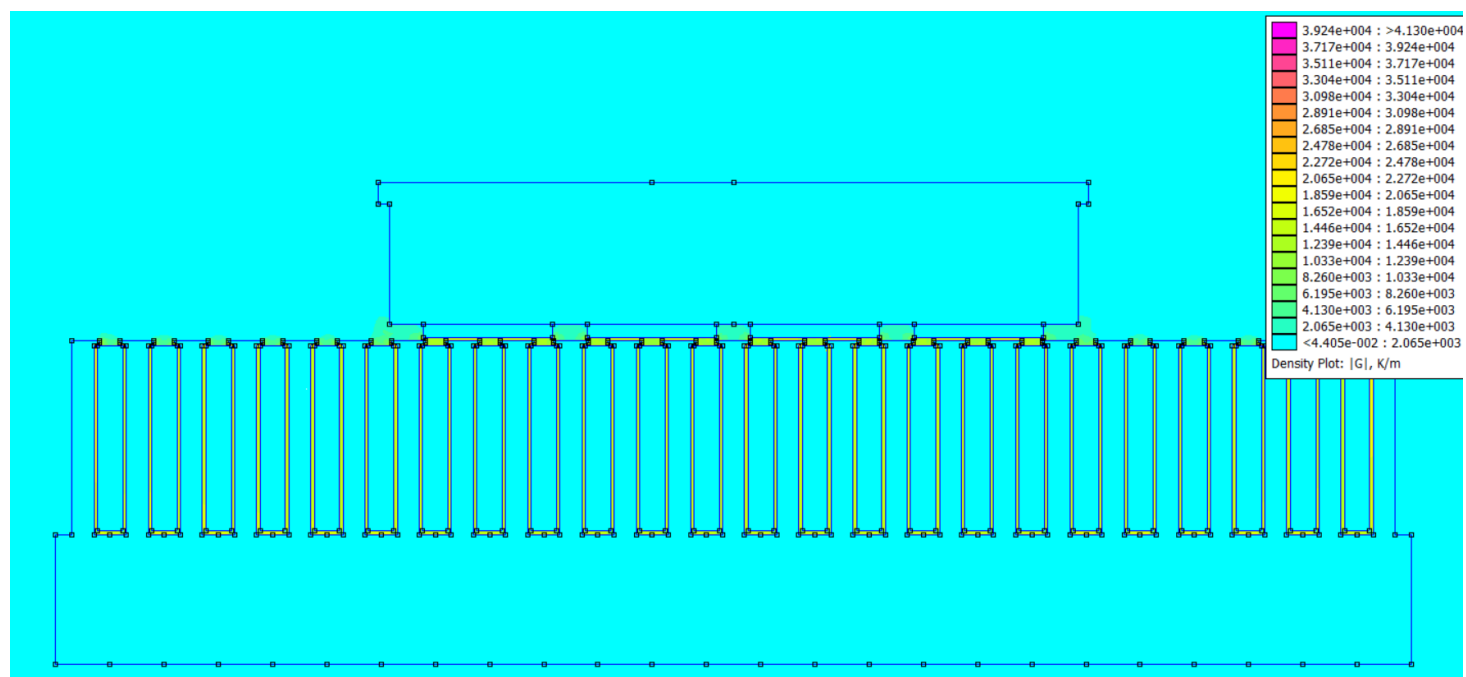


Διάγραμμα 7.2: Η θερμοροή σε συνάρτηση με την απόσταση από το πάνω μέρος της μηχανής

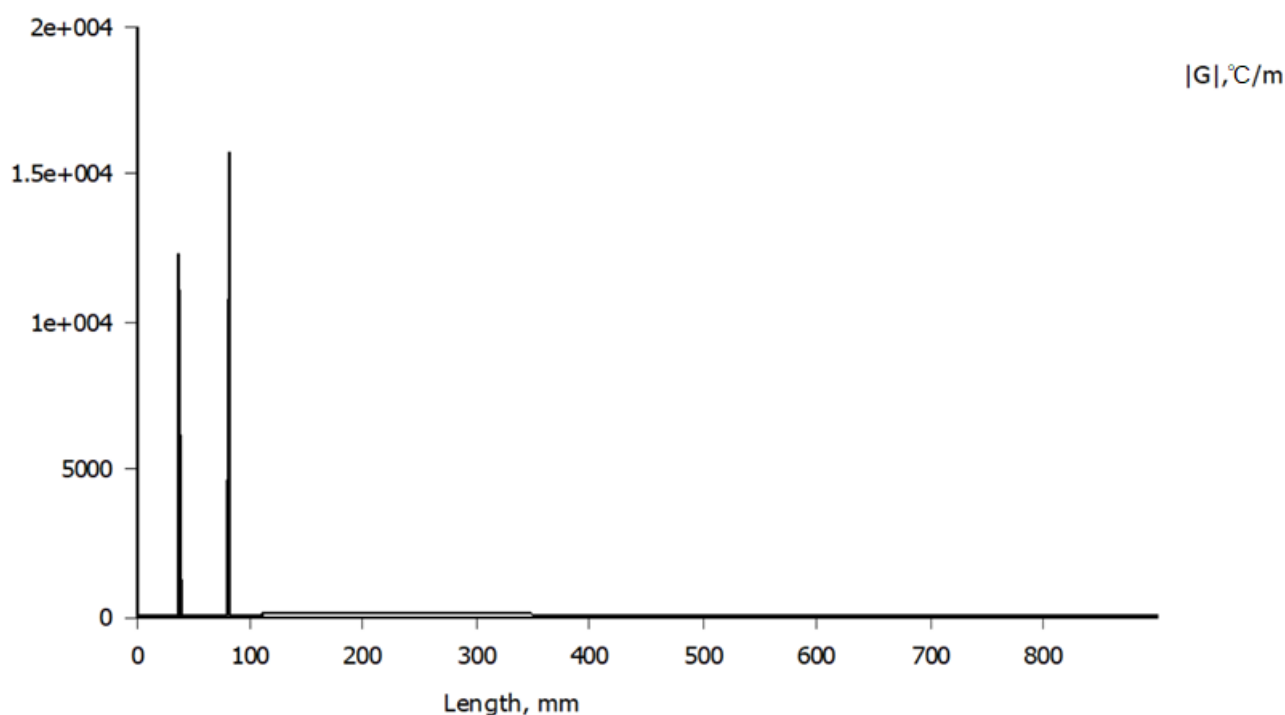
Παρατηρούμε ότι η γραφική παράσταση δεν ξεκινάει από το μηδέν καθώς το θερμότερο δευτερεύον ανταλλάσει θερμότητα με το εξωτερικό περιβάλλον (στο σημείο όπου length = 0mm) ενώ στη συνέχεια η πυκνότητα αυξάνεται εξαιτίας της αλληλεπίδρασης με τους μόνιμους μαγνήτες. Κατόπιν παρουσιάζει μία βύθιση εξαιτίας του διακένου και μία εκ νέου αύξηση λόγω των τυλιγμάτων του πρωτεύοντος. Η ακόλουθη

πτώση οφείλεται σε ένα λεπτό στρώμα αέρα που παρεμβάλλεται ανάμεσα στους χάλκινους αγωγούς και στο σώμα του πρωτεύοντος, ενώ αμέσως μετά η πυκνότητα θερμορροής αυξάνεται ξανά λόγω της αλληλεπίδρασης των τυλιγμάτων με το πρωτεύον. Παρατηρούμε ότι οι μέγιστες τιμές λαμβάνονται στα σημεία ανταλλαγής θερμότητας του χαλκού γεγονός που οφείλεται στην υψηλότερη θερμοκρασία του τόσο συγκριτικά με τα υπόλοιπα μέρη της μηχανής όσο και σε σχέση με το εξωτερικό περιβάλλον.

Τέλος, στην εικόνα 7.9 φαίνεται η παράγωγος της θερμοκρασίας. Με τη βοήθεια της μπορούμε να προσδιορίσουμε σε ποια κατεύθυνση και με ποιο ρυθμό μεταβάλλεται γρηγορότερα η θερμοκρασία γύρω από μια συγκεκριμένη θέση.



Εικόνα 7.9: Η κατανομή της παραγώγου της θερμοκρασίας



Διάγραμμα 7.3: Η παράγωγος της θερμοκρασίας σε συνάρτηση με την απόσταση από το πάνω μέρος της μηχανής

Παρατηρούμε ότι η έντονη μεταβολή της θερμοκρασίας εντοπίζεται στις περιοχές όπου αλληλεπιδρά ο αέρας με τα τυλίγματα του πρωτεύοντος. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας του χαλκού και της μονωτικής ικανότητας του αέρα. Στις υπόλοιπες περιοχές της μηχανής η θερμοκρασία μεταβάλλεται πιο ομαλά δηλαδή έχει μία σχετικά ομοιογενή κατανομή.

7.6 Σύγκριση με τα αποτελέσματα της μεθόδου των συγκεντρωμένων παραμέτρων

Στον παρακάτω πίνακα βρίσκονται συγκεντρωμένα όλα τα στοιχεία για τα σημαντικότερα μέρη της μηχανής που αναλύθηκαν στα κεφάλαια 6 και 7. Τα αποτελέσματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων αναφέρονται στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της μηχανής καθώς μόνο σε αυτή τη περίπτωση μπορεί να γίνει οποιαδήποτε σύγκριση με τα αποτελέσματα των πεπερασμένων στοιχείων.

Περιοχή της Μηχανής	Συγκεντρωμένων Παραμέτρων (°C)	Κάθετη Τομή (°C)
Σώμα Πρωτεύοντος	71.8	77.34
Τυλίγματα Πρωτεύοντος	92.29	90.63
Δευτερεύον	60.03	65.3

Πίνακας 7.4: Θερμοκρασίες Κρίσιμων Περιοχών της Μηχανής για κάθε μοντέλο υπολογισμού

Με τη βοήθεια του Πίνακα 7.4 παρατηρούμε ότι οι θερμοκρασίες που υπολογίστηκαν είναι αρκετά κοντινές μεταξύ τους. Υψηλότερες τιμές φαίνεται να παρουσιάζει η κάθετη τομή με εξαίρεση τα τυλίγματα της μηχανής.

Στο πίνακα 7.5 συγκεντρώσαμε όλες τις ποσοστιαίες αποκλίσεις ανάμεσα στις δύο μεθόδους.

Αποκλίσεις	Σώμα Πρωτεύοντος (%)	Τυλίγματα Πρωτεύοντος (%)	Δευτερεύον (%)
Κάθετη Τομή με Συγκεντρωμένες Παραμέτρους	7.43	1.81	8.41

Πίνακας 7.5: Ποσοστιαίες θερμοκρασιακές αποκλίσεις μεταξύ των τριών μοντέλων

Γενικά παρόλο που οι αποκλίσεις των μοντέλων δεν είναι μεγάλες, σίγουρα δεν είναι αμελητέες. Πιθανές αιτίες για αυτές είναι οι αναγκαίες παραδοχές που έγιναν για το σχεδιασμό τους.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων επιλύει ένα δισδιάστατο πρόβλημα θεωρώντας τη τρίτη διάσταση πεπερασμένη, αποκλειστικά για τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της μηχανής. Επιπλέον ορισμένες ιδιαιτερότητες της κάθετης τομής της μηχανής δε μπορούν να μεταφερθούν με ακρίβεια και στο κύκλωμα των συγκεντρωμένων παραμέτρων ενώ τα δόντια του πρωτεύοντος ανάλογα με τη θέση τους εμφάνιζαν μικρές μεταβολές στη θερμοκρασία οι οποίες επίσης δε μπορούν να αποτυπωθούν στο κύκλωμα.

Τέλος η μέθοδος των συγκεντρωμένων παραμέτρων βασίζεται στη σχεδίαση και επίλυση ενός ιδιαίτερα απλοποιημένου κυκλώματος για το οποίο έχουν γίνει σημαντικές παραδοχές. Δεδομένου ότι στη πραγματικότητα ένα θερμικό πρόβλημα είναι τρισδιάστατο και εξαρτάται επίσης από τον χρόνο (συνολικά δηλαδή απαιτούνται για την επίλυση του τέσσερις μεταβλητές) μία πιο ορθή προσέγγιση είναι η ανάλυσή του με τρισδιάστατη προσομοίωση, σε ένα περιβάλλον όπως αυτό του ANSYS.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι θερμοκρασία των τυλιγμάτων του πρωτεύοντος προσεγγίζει τους 92°C , είναι επομένως εντός των ορίων της μόνωσης. Για την σχετικά υψηλή τιμή της ευθύνεται η απουσία ενός συστήματος ψύξης με εξαναγκασμένη ροή αέρα, καθώς η υπό εξέταση μηχανή ψύχεται με φυσική ροή.

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής παρουσιάστηκε η ηλεκτρομαγνητική ανάλυση μίας γραμμικής σύγχρονης μηχανής μόνιμων μαγνητών (Linear Permanent Magnet Synchronous Motor – LPMSM) με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (διεπαφή FEMM-Matlab) καθώς και η διερεύνηση της θερμικής της συμπεριφοράς με τη μέθοδο των συγκεντρωμένων παραμέτρων (στο περιβάλλον του Simulink) και την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για μία κάθετη τομή της.

8.1 Κύρια Συμπεράσματα

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εν λόγω εργασίας χρειάστηκε να αντιμετωπιστεί μία πληθώρα προβλημάτων κατά τη δημιουργία των μοντέλων των προσομοιώσεων. Η επίλυση τους μας οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα.

Όσον αφορά την ηλεκτρομαγνητική ανάλυση της μηχανής:

- Υπολογίστηκε με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια η Ηλεκτρεγερτική Δύναμη της μηχανής για ονομαστική ταχύτητα, σε τρεις λειτουργικές καταστάσεις. Πιο συγκεκριμένα σε πείραμα κενού φορτίου και για ονομαστικό ρεύμα και γωνίες φορτίου $\delta_1=0^\circ$, $\delta_2=90^\circ$, $\delta_3=110^\circ$, ενώ με τη χρήση της εντολής fft του Matlab έγινε ανάλυση του αρμονικού τους περιεχομένου. Παρατηρήσαμε σχετικά μεγάλο πλάτος στη τρίτη αρμονική της ΗΕΔ γεγονός που εξηγεί και το διπλό «λόβο» των κυματομορφών της. Αυτές οι αρμονικές οφείλονται στη γεωμετρία της μηχανής στο διάκενο (είναι δηλαδή χωρικές) και πιο συγκεκριμένα στα μεγάλα ανοίγματα των αυλάκων του πρωτεύοντος.
- Στις παραπάνω λειτουργικές καταστάσεις υπολογίστηκε η μέγιστη δύναμη καθώς και η δύναμη ευθυγράμμισης της μηχανής. Διαπιστώσαμε ότι εξαιτίας της μικρής διαφοράς ανάμεσα στις αυτεπαγωγές L_d και L_q του ορθού και του καθέτου άξονα αντίστοιχα η γωνία παραγωγής μέγιστης δύναμης είναι μεγαλύτερη από την θεωρητικά αναμενόμενη $\delta=90^\circ$ καθώς σε αυτή συνεισφέρει και η δύναμη εκτυπότητας. Μέσω της ανάλυσης με σταθερό δευτερεύον υπολογίσαμε την εν λόγω γωνία στις 110° .
- Διαπιστώσαμε σημαντικές δυσκολίες κατά τον υπολογισμό των απωλειών της μηχανής και ιδιαίτερα αυτών του πυρήνα. Η επιλογή κατάλληλου μοντέλου είναι αποφασιστικής σημασίας για την ορθότητα και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων όλων των υπόλοιπων προσομοιώσεων της παρούσας εργασίας και οφείλει να λαμβάνει υπόψη του τόσο τις αρμονικές συνιστώσες χώρου εξαιτίας της γεωμετρίας της μηχανής όσο και τις μη γραμμικές ιδιότητες των υλικών κατασκευής της.
- Κατά τη μελέτη των απωλειών έγινε εμφανής η κυριαρχία των απωλειών χαλκού σε εφαρμογές χαμηλών ταχυτήτων, όπως η υπό μελέτη μηχανή. Στη πραγματικότητα οι απώλειες τόσο του πυρήνα όσο και των μόνιμων μαγνητών αυξήθηκαν σημαντικά μόνο με την αύξηση της συχνότητας η οποία οδηγεί παράλληλα και σε αύξηση της ταχύτητας του δευτερεύοντος.
- Ο βαθμός απόδοσης της συγκεκριμένης μηχανής είναι σχετικά μικρός σε σύγκριση με άλλες μηχανές παρόμοιου μεγέθους και ισχύος, ειδικά αν λάβουμε υπόψη ότι στον υπολογισμό των απωλειών αγνοήθηκαν τόσο οι μηχανικές όσο και οι ανώμαλες (οι οποίες συγκροτούν γύρω στο 1% των απωλειών ενός ηλεκτρικού κινητήρα).
- Έγινε πειραματική επαλήθευση των μετρήσεων του μοντέλου για την ΗΕΔ που παράγει, για τις απώλειες χαλκού και την δύναμη ευθυγράμμισης με ικανοποιητική σύγκλιση αποτελεσμάτων.

Όσον αφορά την θερμική ανάλυση της μηχανής:

- Το ισοδύναμο κύκλωμα συγκεντρωμένων παραμέτρων παρ' όλες τις απλοποιήσεις και τις παραδοχές που απαιτεί μπορεί να δώσει λογικά ορθά αποτελέσματα για τη θερμοκρασία των σημαντικότερων σημείων της μηχανής. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η δυνατότητα που μας προσφέρει να μελετήσουμε και τη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας της μηχανής.
- Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων υπολογίζει αξιόπιστες τελικές τιμές για την θερμοκρασία της μηχανής, με τίμημα την μεγάλη υπολογιστική ισχύ, ειδικά σε περιπτώσεις πολύπλοκης γεωμετρίας και την έλλειψη αποτελεσμάτων για την μεταβατική κατάσταση.
- Οι υψηλότερες θερμοκρασίες όλων των μοντέλων εντοπίστηκαν στα τυλίγματα του πρωτεύοντος, ενώ οι χαμηλότερες στο δευτερεύον. Αυτό εξηγείται από το μέγεθος των απωλειών χαλκού οι οποίες στην ονομαστική ταχύτητα της μηχανής είναι σχεδόν 4 φορές μεγαλύτερες από τις αμέσως μετά σημαντικότερες απώλειες (αυτές του πυρήνα του πρωτεύοντος).
- Τα αποτελέσματα του κυκλώματος συγκεντρωμένων παραμέτρων έχουν πολλή μικρή απόκλιση αυτά της κάθετης τομής της μηχανής. Αυτό εξηγείται εξαιτίας των παραδοχών που έχουν γίνει για το σχεδιασμό του κυκλώματος συγκεντρωμένων παραμέτρων και την αδυναμία απεικόνισης σημαντικών χαρακτηριστικών της κάθετης τομής. Επιπλέον εξαιτίας των περιορισμών της δισδιάστατης γεωμετρίας του FEMM, δεν είμαστε σε θέση να επιλέξουμε οποιαδήποτε «φέτα» της LPMSM επιθυμούμε να μελετήσουμε. Όπως είναι προφανές μία τομή στο κέντρο της μηχανής θα έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερες θερμοκρασίες από μία τομή στην άκρη της από την οποία απάγεται θερμότητα μέσω συναγωγής.
- Με βάση τα αποτελέσματα των μεθόδων κρίνεται σημαντική η τρισδιάστατη μελέτη της εν λόγω μηχανής, με ένα λογισμικό όπως αυτό του ANSYS, ώστε να υπάρξει ακόμα μεγαλύτερη κατανόηση για τη θερμική της συμπεριφορά.
- Τέλος δεδομένου ότι ο κινητήρας αυτός ούτε θα κινείται διαρκώς ούτε θα πλησιάσει ποτέ ιδιαίτερα την ονομαστική του ταχύτητα (διαθέτει αρκετά υψηλή ταχύτητα για τη μικρή διαδρομή που μπορεί να πραγματοποιήσει) και καθώς οι θερμοκρασίες που υπολογίστηκαν είναι εντός των ορίων τόσο των μονώσεων όσο και των μόνιμων μαγνητών κρίνουμε ότι δεν απαιτείται κάποιο σύστημα ψύξης αλλά αρκεί η φυσική ροή αέρα.

8.2 Συνεισφορά στην Επιστήμη

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας παρατίθενται και τα κυριότερα σημεία συνεισφοράς της στην επιστήμη:

- Συγκέντρωση βιβλιογραφίας σχετικά με τις γραμμικές μηχανές και τις ιδιαιτερότητές τους κατά την ανάλυση της συμπεριφοράς τους.
- Ανάπτυξη γενικευμένων μοντέλων μελέτης των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων μιας γραμμικής μηχανής μόνιμων μαγνητών με την αξιοποίηση της διεπαφής FEMM-Matlab.
- Υλοποίηση μοντέλου υπολογισμού απωλειών μιας γραμμικής μηχανής μόνιμων μαγνητών και εύρεση του βαθμού απόδοσής της.
- Πειραματική επαλήθευση των υπολογισμών του μοντέλου.

- Ανάπτυξη ενός απλοποιημένου κυκλώματος συγκεντρωμένων παραμέτρων για την διερεύνηση της θερμικής συμπεριφοράς της μηχανής τόσο σε μόνιμη όσο και μεταβατική κατάσταση.
- Προσομοίωση μιας κάθετης τομής μιας γραμμικής μηχανής μόνιμων μαγνητών για τον ακριβή προσδιορισμό των θερμοκρασιών και των μεταβολών θερμότητας κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της.

8.3 Προτάσεις για περαιτέρω Διερεύνηση

Κατά την μελέτη και τη συγγραφή της παρούσας εργασίας αναδείχθηκαν τα εξής σημεία τα οποία χρήζουν επιστημονικού ενδιαφέροντος και μπορούν να διερευνηθούν περαιτέρω:

- Ανάπτυξη μοντέλου για την βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης της γραμμικής μηχανής μόνιμων μαγνητών.
- Τρισδιάστατη προσομοίωση με τη βοήθεια ενός λογισμικού όπως το ANSYS για τον ακριβή προσδιορισμό της θερμικής συμπεριφοράς της μηχανής.
- Πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων των μοντέλων προσδιορισμού της θερμικής συμπεριφοράς της μηχανής.

Βιβλιογραφία

- [1] J. F. Gieras, Z. J. Piech, και B. Tomczuk, '*Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems, Second Edition*', 2ο έκδ. Boca Raton: CRC Press, 2018. doi: 10.1201/b11105.
- [2] H.-W. Lee, K.-C. Kim, και J. Lee, '*Review of maglev train technologies*', IEEE Trans. Magn., τ. 42, τχ. 7, σελ. 1917–1925, Ιουλίου 2006, doi: 10.1109/TMAG.2006.875842.
- [3] J. F. Hoburg, '*Modeling Maglev Passenger Compartment Static Magnetic Fields From Linear Halbach Permanent-Magnet Arrays*', IEEE Trans. Magn., τ. 40, τχ. 1, σελ. 59–64, Ιανουαρίου 2004, doi: 10.1109/TMAG.2003.821559.
- [4] I. Boldea, '*Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs Handbook*', 2ο έκδ. Boca Raton: CRC Press, 2023. doi: 10.1201/9781003227670.
- [5] Laithwaite, Eric R. '*A history of linear electric motors*', 1987.
- [6] N. Naoe και A. Imazawa, '*Research of a core-less linear machine with applied Halbach array for low speed application*', COMPEL - Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng., τ. 37, τχ. 5, σελ. 1795–1804, Οκτωβρίου 2018, doi: 10.1108/compel-01-2018-0021.
- [7] M.-T. Duong, Y.-D. Chun, και D.-J. Bang, '*Improvement of Tubular Permanent Magnet Machine Performance Using Dual-Segment Halbach Array*', *Energies*, τ. 11, τχ. 11, Art. τχ. 11, Νοεμβρίου 2018, doi: 10.3390/en11113132.
- [8] '*Emetor - An educational web-based design tool for permanent-magnet synchronous machines*', στο ResearchGate, doi: 10.1109/ICELMACH.2008.4800232.
- [9] S. J. Chapman, '*ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ*' 5η Έκδοση, ΤΖΙΟΛΑ.
- [10] Μ. Μπενιακάρ, '*Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κινητήρων με θεώρηση των απωλειών των μόνιμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης*', Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών. Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος. Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος, 2014.
- [11] Δημήτριος Γ. Γκίτσος, '*ΕΥΡΩΣΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΟΧΗΜΑ*', Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2020
- [12] Scoggins, R., and D. Matuseski, '*Alternator winding pitch and power system design*' Cummins Power Generation White Paper-Power Topic# 5981, 2014.
- [13] '*Emetor - Glossary - Winding factor*'. Διαθέσιμο στο: <https://www.emetor.com/glossary/winding-factor/>
- [14] J. Zhao, Y. Liu, και X. Xu, '*Comparisons of Concentrated and Distributed Winding PMSM in MV Power Generation*', στο 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli: IEEE, Σεπτεμβρίου 2018, σελ. 2437–2443. doi: 10.1109/icelmach.2018.8507199.
- [15] T. Gundogdu και G. Komurgoz, '*Development of large salient-pole synchronous machines by using fractional-slot concentrated windings*', J. Vibroengineering, τ. 16, τχ. 3, Art. τχ. 3, Μαΐου 2014.

- [16] L. Chong και M. F. Rahman, ‘*Saliency ratio derivation and optimisation for an interior permanent magnet machine with concentrated windings using finite-element analysis*’, IET Electr. Power Appl., τ. 4, τχ. 4, σελ. 249–258, Απριλίου 2010, doi: 10.1049/iet-epa.2009.0119.
- [17] Oikonomou, Christos, ‘*On surface characteristics and microstructural development of soft magnetic composite powder and components*’, Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden), 2015.
- [18] Π. Ροβολής, ‘*Μοντελοποίηση μαγνητικών υλικών για βελτιστοποίηση κατασκευής και λειτουργίας ηλεκτρικών μηχανών*’, PhD Thesis. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ), Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος, 2010. doi: 10.12681/eadd/22430.
- [19] C. Donaghy-Spargo και A. Horsfall, ‘*Transient skin effect in power electronic applications*’, J. Eng., τ. 2019, τχ. 17, σελ. 3696–3700, 2019, doi: 10.1049/joe.2018.8132.
- [20] Payne, Alan, ‘*PROXIMITY EFFECT IN CIRCULAR CONDUCTORS*’, ResearchGate (2022).
- [21] E. E. Kriezis, T. D. Tsiboukis, S. M. Panas, και J. A. Tegopoulos, ‘*Eddy currents: theory and applications*’, Proc. IEEE, τ. 80, τχ. 10, σελ. 1559–1589, 1992, doi: 10.1109/5.168666.
- [22] Καλοκύρης Γεώργιος, ‘*Καινοτομικά υλικά για συστήματα κίνησης μηδενικής εκπομπής ρύπων*’. 2006. PhD Thesis. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών. Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος. Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών.
- [23] D. C. Meeker, ‘*An improved continuum skin and proximity effect model for hexagonally packed wires*’, J. Comput. Appl. Math., τ. 236, τχ. 18, σελ. 4635–4644, Δεκεμβρίου 2012, doi: 10.1016/j.cam.2012.04.009.
- [24] Chas. P. Steinmetz, ‘*On the law of hysteresis*’, Proc. IEEE, τ. 72, τχ. 2, σελ. 197–221, 1984, doi: 10.1109/proc.1984.12842.
- [25] A. Krings, M. Cossale, J. Souldard, A. Boglietti, και A. Cavagnino, ‘*Manufacturing influence on the magnetic properties and iron losses in cobalt-iron stator cores for electrical machines*’, στο 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pittsburgh, PA, USA: IEEE, Σεπτεμβρίου 2014, σελ. 5595–5601. doi: 10.1109/ecce.2014.6954167.
- [26] Jordan Heinz, “*Die ferromagnetischen Konstanten für schwache Wechselfelder.*” Elektr. Nach. Techn 1.8 (1924).
- [27] R. H. Pry και C. P. Bean, ‘*Calculation of the Energy Loss in Magnetic Sheet Materials Using a Domain Model*’, J. Appl. Phys., τ. 29, τχ. 3, σελ. 532–533, Μαρτίου 1958, doi: 10.1063/1.1723212.
- [28] G. Bertotti, ‘*Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials. I. Theoretical considerations*’, J. Appl. Phys., τ. 57, τχ. 6, σελ. 2110–2117, Μαρτίου 1985, doi: 10.1063/1.334404.
- [29] L. T. Ergene και Y. Donmezer, ‘*A study of end turn inductance calculation of BLDC motors*’, στο SPEEDAM 2010, Pisa, Italy: IEEE, Ιουνίου 2010, σελ. 111–114. doi: 10.1109/speedam.2010.5545093.
- [30] D. Ishak, Z. Q. Zhu, και D. Howe, ‘*Eddy-current loss in the rotor magnets of permanent-magnet brushless machines having a fractional number of slots per pole*’, IEEE Trans. Magn., τ. 41, τχ. 9, σελ. 2462–2469, Σεπτεμβρίου 2005, doi: 10.1109/tmag.2005.854337.

- [31] P. N. Murgatroyd, ‘*Calculation of proximity losses in multistranded conductor bunches*’, IEE Proc. Phys. Sci. Meas. Instrum. Manag. Educ., τ. 136, τχ. 3, σελ. 115–120, Μαΐου 1989, doi: 10.1049/ip-a-2.1989.0021.
- [32] C. Jiefan, W. Hui, S. Qing, Z. Yi, και Z. Lijun, ‘*Research on Restraining Thrust Force Ripple for Permanent Magnet Linear Synchronous Motor*’, στο 2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, Shanghai, China: IEEE, 2006. doi: 10.1109/ipemc.2006.4778114.
- [33] Cui Jiefan, Wang Chengyuan, Yang Junyou, και Liu Lifeng, ‘*Analysis of direct thrust force control for permanent magnet linear synchronous motor*’, στο Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation (IEEE Cat. No.04EX788), Hangzhou, China: IEEE, σελ. 4418–4421. doi: 10.1109/wcica.2004.1342349.
- [34] D. C. Meeker, “Finite Element Method Magnetics manual v4.2,” 2018.
- [35] S. J. Salon, ‘*Finite Element Analysis of Electrical Machines*’, στο Power Electronics and Power Systems. New York, NY: Springer US, 1995. doi: 10.1007/978-1-4615-2349-9.
- [36] N. Bianchi, ‘*Electrical Machine Analysis Using Finite Elements*’, Boca Raton: CRC Press, 2017. doi: 10.1201/9781315219295.
- [37] Χριστόφορος Π. Ποιητάρης, ‘*Πειραματική επιβεβαίωση σχεδιομελέτης κινητήρα μονίμων μαγνητών για ηλεκτροπρόωση πλοίου*’, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2023
- [38] C.-Y. Hsiao, S.-N. Yeh, και J.-C. Hwang, ‘*A Novel Cogging Torque Simulation Method for Permanent-Magnet Synchronous Machines*’, Energies, τ. 4, τχ. 12, σελ. 2166–2179, Δεκεμβρίου 2011, doi: 10.3390/en4122166.
- [39] H. Ahn, H. Park, C. Kim, και H. Lee, ‘*A Review of State-of-the-art Techniques for PMSM Parameter Identification*’, J. Electr. Eng. Technol., τ. 15, τχ. 3, σελ. 1177–1187, Μαΐου 2020, doi: 10.1007/s42835-020-00398-6.
- [40] Gieras, F. Jacek, ‘*Permanent magnet motor technology: design and applications*’, CRC press, 2009. τ. 20096073, στο Electrical and Computer Engineering, σελ. 171–225. doi: 10.1201/9781420064414-c5.
- [41] Γ. Αραμπατζής, Δ. Ασημακόπουλος, Β. Λυγερού, ‘*ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ*’, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ. (2020)
- [42] G. J. Hernández, ‘*Fundamentals of momentum, heatmass-transfer*’, Welty 5th Ed. Fundam. Momentum Heatmass-Transf., Σεπτέμβριος 2020
- [43] C. P. Kothandaraman, ‘*Fundamentals of heat and mass transfer*’, New Age International, 2006.
- [44] Α. Κ. Καμπανάκης, ‘*Θερμική ανάλυση Κινητήρα Μόνιμων Μαγνητών Με Πεπερασμένα Στοιχεία Και Μοντέλο συγκεντρωμένων Παραμέτρων*’, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα Ιούλιος 2013
- [45] J. R. M. Szogyen, ‘*Cooling of electric motors*’, IEE J. Electr. Power Appl., τ. 2, τχ. 2, σελ. 59, 1979, doi: 10.1049/ij-epa.1979.0010.
- [46] Ι.Α. Τεγόπουλος, ‘*ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ*’, Αθήνα : Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 1991. - Τόμ. Β : 2 : σ. 315. - 978-960-266-196-3

- [47] E. Gundabattini, R. Kuppan, D. G. Solomon, A. Kalam, D. P. Kothari, και R. Abu Bakar, ‘*A review on methods of finding losses and cooling methods to increase efficiency of electric machines*’, Ain Shams Eng. J., τ. 12, τχ. 1, σελ. 497–505, Μαρτίου 2021, doi: 10.1016/j.asej.2020.08.014.
- [48] A. La Rocca, C. Eastwick, S. J. Pickering, και C. Gerada, ‘*Enhanced Cooling for an Electric Starter-Generator for Aerospace Application*’, στο 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014), Manchester, UK: Institution of Engineering and Technology, 2014, σελ. 0267–0267. doi: 10.1049/cp.2014.0373.
- [49] M. A. Fakhfakh, M. H. Kasem, S. Tounsi, και R. Neji, ‘*Thermal Analysis of a Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicles*’, J. Asian Electr. Veh., τ. 6, τχ. 2, σελ. 1145–1151, 2008, doi: 10.4130/jaev.6.1145.
- [50] H. Alam, ‘*Thermal Analysis on Radial Flux Permanent Magnet Generator (PMG) using Finite Element Method*’, IPTEK J. Technol. Sci., Ιανουαρίου 2011,
- [51] A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, M. Shanel, M. Mueller, και C. Mejuto, ‘*Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines*’, IEEE Trans. Ind. Electron., τ. 56, τχ. 3, σελ. 871–882, Μαρτίου 2009, doi: 10.1109/TIE.2008.2011622.
- [52] <https://www.kjmagnetics.com/blog/halbach-arrays?srsId=AfmBOoqwylHqGRtPiNKSSsqS4ID584qI54BSOG-kkuCYa5RBQ0Vn01DF>
- [53] https://www.researchgate.net/figure/SCHEMATIC-OF-A-SLOTTED-PERMANENT-MAGNET-LINEAR-MOTOR-AND-ITS-COMPONENTS_fig1_320410377
- [54] <https://oswos.com/motor-windings/>
- [55] <http://m.vectormagnets.com/n1849177/What-is-Hysteresis-Loop.htm>
- [56] <https://www.arnoldmagnetics.com/>
- [57] https://www.researchgate.net/figure/Eddy-currents-generated-by-the-magnetic-field-B-in-a-solid-and-b-laminated-transformer_fig3_342998511
- [58] <https://www.motioncontroltips.com/what-does-motor-insulation-class-specify-and-why-is-it-important/>
- [59] <https://techweb.rohm.com/product/thermal-design/9551/>