



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Σχεδιασμός Κινητήρα με Δρομέα Πολλαπλών Μονίμων Μαγνητών για Ηλεκτρικό Όχημα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Αναστασίας Ι. Ράπτη

Επιβλέπων: Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Δεκέμβριος 2019



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Σχεδιασμός Κινητήρα με Δρομέα Πολλαπλών Μονίμων Μαγνητών για Ηλεκτρικό Όχημα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
της
Αναστασίας Ι. Ράπτη

Επιβλέπων: Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 17 Δεκεμβρίου
2019.

(Υπογραφή)

.....
Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

(Υπογραφή)

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

(Υπογραφή)

.....
Αντώνιος Αντωνόπουλος
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

(Υπογραφή)

.....

Αναστασία Ράπτη

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

© 2019 -All rights reserved.

Copyright © Αναστασία Ράπτη, 2019

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 Μετσόβου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία επιχειρεί τη σχεδίαση ενός κινητήρα μονίμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων εφαρμόζοντας τεχνικές βελτιστοποίησης γεωμετρίας με κύριο κριτήριο τη μείωση των απωλειών. Σκοπός είναι η επίτευξη της επιθυμητής επίδοσης με κατά το δυνατόν αυξημένη απόδοση του κινητήρα και ταυτόχρονη μείωση της κυμάτωσης της ροπής. Επιπλέον κεντρικό στόχο αποτελεί η δημιουργία μίας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας μέσω της οποίας μπορεί να σχεδιαστεί ένας κινητήρας μονίμων μαγνητών βασισμένος στις προδιαγραφές της εκάστοτε εφαρμογής. Συγκεκριμένα η εργασία περιλαμβάνει τα εξής στάδια: προκαταρκτική σχεδίαση με κλασσικές εξισώσεις, στη συνέχεια οριστική σχεδίαση μέσω ανάπτυξης κατάλληλου παραμετροποιημένου μοντέλου προσομοίωσης, το οποίο επιτρέπει βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του και επιλογή της προτεινόμενης διαμόρφωσης μετά από σχολιασμό - σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.

Αρχικά επιχειρείται εισαγωγική επισκόπηση των συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης με αναφορά στα διάφορα είδη μηχανών που χρησιμοποιούνται. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στους σύγχρονους κινητήρες καθώς στην κατηγορία αυτή ανήκει ο κινητήρας δρομέα μονίμων μαγνητών που μελετάται στη συνέχεια. Περιγράφονται εκτενώς οι διαδικασίες που υιοθετήθηκαν κατά την προκαταρκτική σχεδίαση προκειμένου να προσδιοριστούν τα κύρια χαρακτηριστικά διαμόρφωσης του κινητήρα. Μετά την προκαταρκτική σχεδίαση πραγματοποιείται η οριστική σχεδίαση της μηχανής χρησιμοποιώντας παραμετρική μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της.

Αφού επιλεγεί η αρχική γεωμετρία περιγράφεται η διαδικασία της πεδιακής ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για το μαγνητοστατικό πρόβλημα που εξετάζεται. Μέσω των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για τα κύρια στοιχεία λειτουργίας που συμβάλλουν στη συνάρτηση κόστους επιλέγεται ο προτεινόμενος κινητήρας της παρούσας εργασίας. Τα στοιχεία αυτά είναι η μηχανική ισχύς και η αντίστοιχη ροπή, η κυμάτωση ροπής, οι απώλειες, ο βαθμός απόδοσης, η ηλεκτρεγερτική δύναμη και η αρμονική της παραμόρφωση.

Στο τελικό στάδιο βελτιστοποίησης της γεωμετρίας της μηχανής θεωρήθηκαν εναλλακτικές ανταγωνιστικές διαμορφώσεις δρομέα πολλαπλών μονίμων μαγνητών. Η προτεινόμενη γεωμετρία προέκυψε χρησιμοποιώντας τεχνικές πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης γεωμετρίας με μέτωπα Pareto προκειμένου να επιτευχθεί κατάλληλος συμβιβασμός μεταξύ των κριτηρίων που συμβάλλουν στην αντικειμενική συνάρτηση κόστους.

Στη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκαν το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων FEMM, το λογισμικό MATLAB καθώς και το λογισμικό βελτιστοποίησης HEEDS.

Λέξεις - Κλειδιά κινητήρες μονίμων μαγνητών, βαθμός απόδοσης, τυλίγματα κλασματικού βήματος, τυλίγματα απλής και διπλής στρώσης, παραμετροποιημένη σχεδίαση, προσομοίωση μαγνητικού πεδίου, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση γεωμετρίας.

Abstract

The present thesis undertakes the design of a permanent magnet motor for electric vehicle applications by applying geometry optimization techniques with main criterion reduction of losses. The purpose is to achieve the specified performance in conjunction with reduced losses and torque ripple. In addition, a key goal is to create an integrated methodology enabling permanent magnet motor design based on the specifications of a particular application. Specifically, the thesis is developed including the following steps: a preliminary design stage based on classical formulae is followed by a final design stage based on the development of an appropriate parameterized simulation model, enabling geometry optimization and selection of the proposed configuration through analysis - comparison of the results obtained.

In a first step an overview of electric drive systems and various types of motors implemented is presented. Particular emphasis is given to synchronous motors as the permanent magnet motor studied belongs to this category. The procedures used during the preliminary design stage to select the main motor dimensions are described in detail. The preliminary design stage is followed by the final design stage of the machine based on parametric implementation its geometrical features.

Once the initial geometry has been determined, the field analysis procedure is described based on the finite element method for the magnetostatic problem considered. The results of this process for the basic operating characteristics contributing in the cost function enable determination of the motor configuration proposed. These elements are mechanical power and respective torque, torque ripple, losses, efficiency, electromotive force and its harmonic distortion.

At the final optimization stage of this thesis, alternative competitive multi permanent magnet rotor topologies have been considered. The final configuration proposed has been derived by adopting appropriate multicriteria Pareto Front techniques in order to achieve convenient compromise amongst criteria contributing in the objective cost function.

The developed methodology implements the finite element software FEMM, the software MATLAB and the optimization software HEEDS.

Keywords permanent magnet motor, efficiency, short pitched windings, single and double layer windings, parameterized design, magnetic field simulation, finite element method, multicriteria geometry optimization.

Ευχαριστίες

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

Ευχαριστώ θερμά, τον Καθηγητή μου κ. Αντώνιο Κλαδά για την εμπιστοσύνη που έδειξε αναθέτοντάς μου την παρούσα εργασία, για την στήριξη και την καθοδήγησή του καθώς και την άψογη συνεργασία καθόλη τη διάρκεια, ως την περάτωσή της.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Λευτέρη Καραμανή για την πρόθυμη καθοδήγηση και στήριξή του σε κάθε βήμα της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια και τους φίλους μου για την πολύτιμη στήριξή που μου πρόσφεραν καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	9
1.1	Σκοπός της εργασίας	9
1.2	Δομή της εργασίας	9
2	Ηλεκτροκίνηση	11
2.1	Εισαγωγή στην Ηλεκτροκίνηση	11
2.1.1	Ηλεκτρικό Όχημα	12
2.1.2	Υβριδικό Όχημα	14
2.2	Είδη Ηλεκτρικών Μηχανών	15
2.2.1	Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος	15
2.2.2	Κινητήρες Επαγωγής	17
2.2.3	Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμων Μαγνητών	17
2.2.4	Σύγχρονοι Κινητήρες Μαγνητικής Αντίδρασης	18
2.2.5	Αξιολόγηση όλων των παραπάνω κινητήρων για ηλεκτροκίνηση	19
2.3	Επιλογή Τοπολογίας Κινητήρα Μόνιμων Μαγνητών	20
2.3.1	Κινητήρας Επιφανειακών Μόνιμων Μαγνητών	20
2.3.2	Κινητήρας Εσωτερικά Επιφανειακών Μαγνητών	20
2.3.3	Κινητήρας Εσωτερικών Μόνιμων Μαγνητών	20
3	Σχεδίαση Κινητήρα	22
3.1	Εισαγωγή	22
3.2	Θεμελιώδεις Αρχές Προκαταρκτικής Σχεδίασης	22
3.2.1	Ειδική Μαγνητική Φόρτιση	22
3.2.2	Ειδική Ηλεκτρική Φόρτιση	23
3.2.3	Σχέση Εξόδου Ηλεκτρικής Μηχανής	23
3.2.4	Διαστασολόγηση Διακένου	24
3.2.5	Χαρακτηριστικά Στάτη	26
3.2.6	Χαρακτηριστικά Δρομέα	28
3.2.7	Σιδηρομαγνητικά Υλικά	30
3.3	Πεδιακή Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων	31
3.3.1	Μαγνητοστατικά Προβλήματα	31
3.3.2	Οριακές Συνθήκες	32
3.3.3	Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία	33
3.4	Προκαταρκτική Σχεδίαση	34
3.4.1	Επιλογή Διαστάσεων Εξωτερικής Διαμέτρου Δρομέα και Ενεργού Μήκους Μηχανής (D, L)	34
3.4.2	Επιλογή Χαρακτηριστικών Στάτη	35
3.4.3	Επιλογή Χαρακτηριστικών Δρομέα	37

3.4.4	Επιλογή σιδήρου	37
3.5	Παραμετροποιημένη Σχεδίαση Μηχανής Εσωτερικών Μόνιμων Μαγνητών και Μελέτη της Πεδιακής της Ανάλυσης με Πεπερασμένα Στοιχεία	38
3.5.1	Οριστική Σχεδίαση Πρώτης Μηχανής	38
3.5.2	Πεδιακή Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων Πρώτης Μηχανής	41
3.5.3	Αξιοποίηση Αποτελεσμάτων από Πεδιακή Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων	42
3.5.4	Υλοποίηση Κώδικα για Σχεδίαση Κινητήρα και Υπολογισμό Στοιχείων Αξιολόγησης Μηχανής	48
4	Διαδικασία Βελτιστοποίησης Γεωμετρίας	49
4.1	Εισαγωγή	49
4.2	Αρχές Βελτιστοποίησης	49
4.2.1	Η έννοια του συστήματος	49
4.2.2	Ακρότατα	50
4.2.3	Βελτιστοποίηση πραγματικών συναρτήσεων	50
4.2.4	Μονοκριτηριακή Βελτιστοποίηση	51
4.2.5	Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση	51
4.3	Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης	52
4.3.1	Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms GA)	52
4.3.2	Μέθοδος Προσομοιωμένη Ανόπτυση (Simulated - Annealing SA)	55
4.3.3	Μέθοδος Nelder-Mead (NMS)	56
4.3.4	Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Partical Swarm Optimization PSO)	58
4.3.5	Υβριδικός Αλγόριθμος SHERPA του Heeds	59
4.4	Διαδικασία Βελτιστοποίησης Γεωμετρίας Κινητήρα	59
4.4.1	Μεταβλητοί Ανεξάρτητοι Παράμετροι Βελτιστοποίησης	60
4.4.2	Γεωμετρικοί Περιορισμοί Ανεξάρτητων Μεταβλητών	61
4.4.3	Αποτελέσματα Πρώτου Κινητήρα (Κινητήρας 1)	64
4.4.4	Περιορισμοί στα Λειτουργικά Χαρακτηριστικά για Βελτιστοποίηση	69
4.4.5	Εναλλακτικές Περιπτώσεις Κινητήρων	70
4.4.6	Σχεδίαση και Αποτελέσματα Δεύτερου Κινητήρα (Κινητήρας 2)	70
4.4.7	Υλοποίηση Βελτιστοποίησης	76
5	Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης και Συγκριτική Μελέτη Διαμορφώσεων	77
5.1	Εισαγωγή	77
5.2	Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Κινητήρα Μονής Στρώσης	77
5.2.1	Κινητήρας 1 - Βελτιστοποίηση Απόδοσης	77
5.2.2	Κινητήρας 1 - Βελτιστοποίηση Ροπής και Κυμάτωσης Ροπής	79
5.2.3	Επιλεγμένος Κινητήρας 1	81
5.2.4	Επιρροή Παραμέτρων Βελτιστοποίησης	86
5.3	Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Κινητήρα Διπλής Στρώσης	89
5.3.1	Κινητήρας 2 - Βελτιστοποίηση	89
5.3.2	Επιλεγμένος Κινητήρας 2	91
5.3.3	Επιρροή Παραμέτρων Βελτιστοποίησης	97
5.4	Συγκριτική Μελέτη Κινητήρων	99
5.5	Χαρακτηριστικά Τελικής Επιλογής Κινητήρα	101
6	Συμπεράσματα	104

6.1	Συμπεράσματα	104
6.2	Πρωτότυπη Συνεισφορά Εργασίας	105
6.3	Εργασίες για Περαιτέρω Διερεύνηση	105

Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Σύστημα Κίνησης Ηλεκτρικού Οχήματος [17]	12
2.2	Διάγραμμα Κίνησης Ηλεκτρικού Οχήματος	12
2.3	Χρήση της τεχνολογίας μπαταριών σε ηλεκτρικά οχήματα από 2002 έως 2012 [1]	13
2.4	Διάγραμμα Κίνησης Υβριδικού Οχήματος [17]	14
2.5	(α) Μηχανή Συνεχούς Ρεύματος, (β) Μηχανή Επαγωγής, (γ) Μηχανή Μόνιμων Μαγνητών, (δ) Μηχανή Μαγνητικής Αντίδρασης [3]	15
2.6	Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος [2]	16
2.7	Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος Χωρίς Ψήκτρες-Συλλέκτη [18]	16
2.8	Κινητήρες Επαγωγής [2]	17
2.9	Σύγχρονη Μηχανή Μόνιμων Μαγνητών [20]	18
2.10	Σύγκριση Σύγχρονης Μηχανής και Μηχανής Επαγωγής [19]	18
2.11	Σκιαγράφημα Σύγχρονου Κινητήρα Μαγνητικής Αντίδρασης με Μόνιμους Μαγνήτες στο Δρομέα [13]	19
2.12	Τοπολογίες Δρομέων Κινητήρων Μόνιμων Μαγνητών: (α) επιφανειακών μόνιμων μαγνητών, (β)εγκάρσιων μόνιμων μαγνητών, (γ)εσωτερικά επιφανειακών μόνιμων μαγνητών, (δ)εσωτερικών μόνιμων μαγνητών τύπου V, (ε)μαγνητικής αντίστασης με υποβοήθηση μόνιμων μαγνητών. [14]	21
3.1	Είδη Τυλιγμάτων: (α) επικαλυπτόμενο διανεμημένο (β) επικαλυτόμενο συγκεντρωμένο (γ) συγκεντρωμένο διπλής στρώσης (δ) συγκεντρωμένο απλής στρώσης [6]	28
3.2	Χαρακτηριστικές B-H για διάφορους Μόνιμους Μαγνήτες [13]	29
3.3	Ιστορική Ανάπτυξη Υλικών Μόνιμων Μαγνητών με βάση την μέγιστη ενέργεια τους [22]	29
3.4	Βρόχος Υστέρησης Σιδηρομαγνητικού Υλικού [23]	30
3.5	Καμπύλη Απομαγνήτισης Μόνιμου Μαγνήτη Κράματος Νεοδυμίου - Σιδήρου - Βορίου (NdFeB) [13]	37
3.6	Καμπύλη Απομαγνήτισης Σιδήρου	37
3.7	Γεωμετρικά Μεταβλητά Μεγέθη Κινητήρα	40
3.8	Σχεδίαση και Πλέγμα Πρωταρχικής Μηχανής στο λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων FEMM	41
3.9	Αναπαράσταση Μαγνητικού Πεδίου Πόλου Μηχανής στο λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων FEMM	42
3.10	Γραφικές για την Μαγνητική Επαγωγή και τις Αρμονικές στο Διάκενο	42
3.11	Διάγραμμα Ροής Κώδικα Υλοποίησης και Αξιολόγησης Μηχανής	48
4.1	Ο εξελικτικός κύκλος ενός γενετικού αλγορίθμου	54
4.2	Διάγραμμα Ροής Γενετικών Αλγορίθμων	55

4.3	Διάγραμμα Ροής Nelder-Mead Αλγορίθμου	57
4.4	Πόλος Μηχανής με όλα τα Γεωμετρικά της Χαρακτηριστικά	61
4.5	Σχεδίαση και Πλέγμα Κινητήρα 1	64
4.6	Μαγνητικό Πεδίο 1ου Κινητήρα	64
4.7	Πεδίο στο διάκενο του Κινητήρα 1 κατά μήκος αυτού	65
4.8	Αρμονικό περιεχόμενο πεδίου στο διάκενο του Κινητήρα 1	66
4.9	Χαρακτηριστική Καμπύλη T-γ του Κινητήρα 1	66
4.10	Διακύμανση Ροπής Κινητήρα 1	67
4.11	Απώλειες Κινητήρα 1	68
4.12	Χάρτης Απόδοσης Κινητήρα 1	68
4.13	Σχεδίαση και Πλέγμα Κινητήρα 2	70
4.14	Μαγνητικό Πεδίο 2ου Κινητήρα	71
4.15	Πεδίο στο διάκενο του Κινητήρα 2 κατά μήκος αυτού	72
4.16	Αρμονικό περιεχόμενο πεδίου στο διάκενο του Κινητήρα 2	72
4.17	Διακύμανση Ροπής Κινητήρα 2	73
4.18	Απώλειες Κινητήρα 2	74
4.19	Χάρτης Απόδοσης Κινητήρα 2	74
5.1	Βελτιστοποίηση με τον αλγόριθμο Nelder-Mead ως προς την απόδοση	78
5.2	Βελτιστοποίηση με τον υβριδικό αλγόριθμο Sherpa ως προς την απόδοση	79
5.3	Βελτιστοποίηση με Γενετικούς ως προς την Ροπή και την Κυμάτωση της	80
5.4	Σχεδίαση και Πλέγμα Επιλεγμένου Κινητήρα 1	82
5.5	Μαγνητικό Πεδίο Επιλεγμένου Κινητήρα 1	82
5.6	Πεδίο στο διάκενο του Επιλεγμένου Κινητήρα 1 κατά μήκος αυτού	83
5.7	Αρμονικό περιεχόμενο πεδίου στο διάκενο του Επιλεγμένου Κινητήρα 1	83
5.8	Διακύμανση Ροπής Επιλεγμένου Κινητήρα 1	84
5.9	Απώλειες Επιλεγμένου Κινητήρα 1	85
5.10	Χάρτης Απόδοσης Επιλεγμένου Κινητήρα 1	85
5.11	Επιρροή των γεωμετρικών παραμέτρων στην απόδοση	87
5.12	Επιρροή των γεωμετρικών παραμέτρων στην ροπή και την κυμάτωση της	87
5.13	Συσχέτιση των γεωμετρικών παραμέτρων μεταξύ τους και με την απόδοση	88
5.14	Συσχέτιση των γεωμετρικών παραμέτρων μεταξύ τους και με ροπή	89
5.15	Βελτιστοποίηση με τον αλγόριθμο Nelder-Mead ως προς την απόδοση	90
5.16	Βελτιστοποίηση Γεωμετρίας με Διπλή Στρώση Τυλίγματος με τον υβριδικό αλγόριθμο SHERPA	91
5.17	Σχεδίαση και Πλέγμα Επιλεγμένου Κινητήρα 2	93
5.18	Μαγνητικό Πεδίο Επιλεγμένου Κινητήρα 2	93
5.19	Πεδίο στο διάκενο του Επιλεγμένου Κινητήρα 2 κατά μήκος αυτού	94
5.20	Αρμονικό περιεχόμενο πεδίου στο διάκενο του Επιλεγμένου Κινητήρα 2	94
5.21	Επαγόμενη αντί-ΗΕΔ	95
5.22	Διακύμανση Ροπής Επιλεγμένου Κινητήρα 2	96
5.23	Απώλειες Επιλεγμένου Κινητήρα 2	96
5.24	Χάρτης Απόδοσης Επιλεγμένου Κινητήρα 2	96
5.25	Επιρροή των γεωμετρικών παραμέτρων στην απόδοση, την ροπή και την κυμάτωση	98
5.26	Συσχέτιση των γεωμετρικών και λειτουργικών παραμέτρων	98
5.27	Διάγραμμα Taguchi	100
5.28	Κανονικοποιημένο Διάγραμμα Σχήματος 5.27	101

5.29 Τελική Σχεδίαση Κινητήρα	103
---	-----

Κατάλογος Πινάκων

2.1 Συγκριτικός πίνακας αξιολόγησης των βασικών τύπων μηχανών	19
3.1 Μεταβλητές Σχεδίασης Διατομής Μηχανής	39
4.1 Μεταβλητές Παράμετροι για βελτιστοποίηση	60
4.2 Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Κινητήρα 1	69
4.3 Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Κινητήρα 2	75
4.4 Τα χαρακτηριστικά των αλγορίθμων βελτιστοποίησης	76
5.1 Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Κινητήρα 1 μετά τη Βελτιστοποίηση Απόδοσης 1	78
5.2 Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Κινητήρα 1 μετά τη Βελτιστοποίηση Απόδοσης 1	80
5.3 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Επιλεγμένου Κινητήρα 1	81
5.4 Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Επιλεγμένου Κινητήρα 1	86
5.5 Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Επιλεγμένου Κινητήρα 1 μετά τη Βελτιστοποίηση Απόδοσης, Ροπής, Κυμάτωσης Ροπής	86
5.6 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Επιλεγμένου Κινητήρα 2	92
5.7 Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Επιλεγμένου Κινητήρα 2	97
5.8 Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Επιλεγμένου Κινητήρα 2 μετά τη Βελτιστοποίηση Απόδοσης, Ροπής, Κυμάτωσης Ροπής	97
5.9 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης για Μονή Στρώση	99
5.10 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης για Διπλή Στρώση	100
5.11 Χαρακτηριστικά Τελικού Κινητήρα και Σύγκριση με τον Πρώτο Κινητήρα	102

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας που εκπονήθηκε στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών και Ηλεκτρονικών Ισχύος είναι η παραμετροποιημένη σχεδίαση ενός ηλεκτρικού σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών και η βελτιστοποιημένη σχεδίαση αυτού όσον αφορά την απόδοση. Στην βελτιστοποίηση αυτή εκτός της απόδοσης λαμβάνεται επίσης υπόψιν η ροπή του κινητήρα και η κυμάτωση αυτής. Πιο συγκεκριμένα σκοπός είναι η αύξηση της ροπής και η ταυτόχρονη μείωση της κυμάτωσης της.

Αρχικά σχεδιάστηκε η γεωμετρία μίας μηχανής και με τη βοήθεια λογισμικού αναπτύχθηκε προσομοιωτικό μοντέλο ώστε να μπορούν να παρθούν τα κατάλληλα αποτελέσματα για την βελτιστοποίηση της. Η υλοποίηση του μοντέλου αυτού πραγματοποιήθηκε με χρήση παραμετροποιημένων μεθόδων σχεδίασης και η ανάλυση του στηρίχθηκε σε πεδιακή ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Για την βελτιστοποίηση χρησιμοποιήθηκε ειδικό λογισμικό στο οποίο εφαρμόστηκε το παραπάνω προσομοιωτικό μοντέλο και με αλγορίθμους βελτιστοποίησης που περιλαμβάνει το εν λόγω λογισμικό με κριτήρια όπως προαναφέρθηκε την απόδοση, τη ροπή και την κυμάτωση αυτής προκύπτει η νέα βελτιστοποιημένη γεωμετρία κινητήρα. Για την σωστή βελτιστοποίηση εφαρμόστηκαν όπως θα αναλυθούν και εντός της παρούσας εργασίας ορισμένοι περιορισμοί στο προσομοιωτικό μοντέλο που αναπτύχθηκε.

1.2 Δομή της εργασίας

Η δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η οποία πραγματεύεται την παραμετροποιημένη σχεδίαση ενός ηλεκτρικού κινητήρα και τη βελτιστοποίηση αυτής είναι η εξής:

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η κατηγορία σύγχρονων κινητήρων μόνιμων μαγνητών καθώς και ο λόγος που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροκίνηση. Στην κατηγορία αυτή ανήκει και ο κινητήρας που υλοποιείται στην συγκεκριμένη εργασία.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η παραμετροποιημένη σχεδίαση του ηλεκτρικού κινητήρα και η ανάπτυξη του προσομοιωτικού του μοντέλου.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η διαδικασία βελτιστοποίησης της γεωμετρίας του κινητήρα με βάση το μοντέλο που αναπτύχθηκε.

Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται εκτενής παρουσίαση των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις των κινητήρων που προέκυψαν μετά την μελέτη της βελτιστοποίησης.

Τέλος στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν συνολικά από την εργασία και επιλέγεται τελικώς ο καλύτερος κινητήρας με βάση τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε.

Κεφάλαιο 2

Ηλεκτροκίνηση

2.1 Εισαγωγή στην Ηλεκτροκίνηση

Τα τελευταία χρόνια περιβαλλοντικοί και οικονομικοί λόγοι καθιστούν επιτακτική την ανάγκη για επαναπροσδιορισμό των πόρων που καταναλώνονται από την κοινωνία. Η αναπόφευκτη μείωση των φυσικών πόρων και η περιβαλλοντική μόλυνση είναι οι δύο κύριοι λόγοι που έχει έρθει στο προσκήνιο η χρήση των ηλεκτρικών κινητήρων. Η ανάγκη αυτή ωθεί τους ηλεκτρικούς κινητήρες να κερδίζουν όλο και περισσότερο το μεγαλύτερο μερίδιο της παγκόσμιας κοινότητας. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν είναι ιδιαίτερα σημαντικά και αφορούν κυρίως το περιβάλλον. Κάποια από αυτά είναι η μη παραγωγή οποιουδήποτε είδους ρύπου, η αθόρυβη λειτουργία, η ελάχιστη θερμική επιβάρυνση και η επίτευξη υψηλών ροπών. Άλλωστε πρόκειται για μία ρεαλιστική εναλλακτική από πλευράς απόδοσης, επίδοσης και κατανάλωσης σε σχέση με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης.

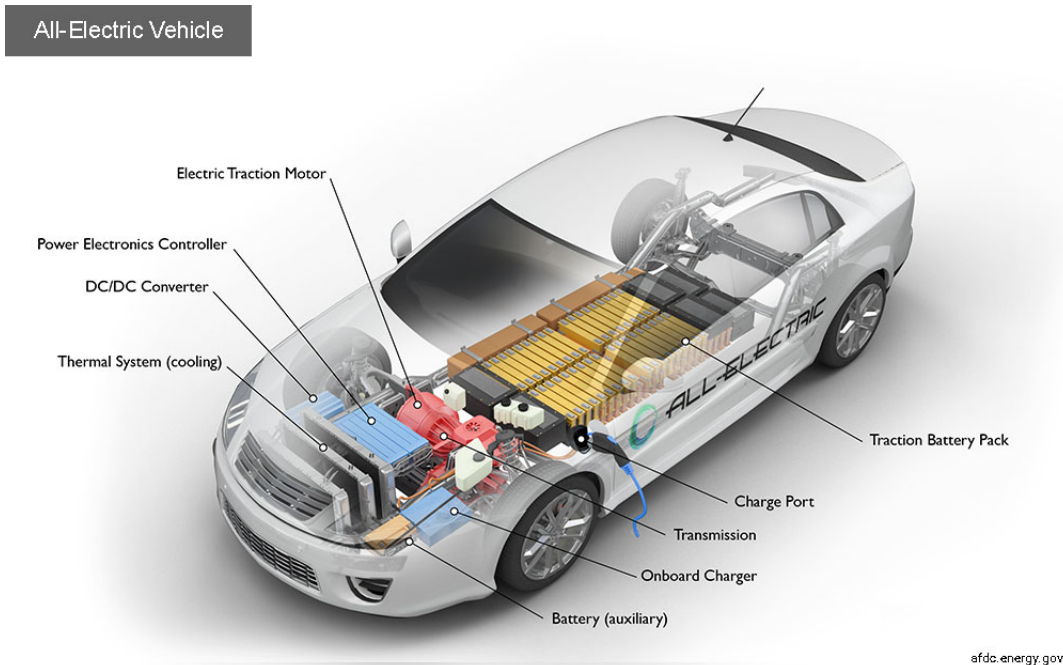
Το πρόβλημα της αποθήκευσης της απαιτούμενης ενέργειας για την αυτονομία του ηλεκτρικού αυτοκινήτου οδήγησε στην όχι και τόσο μεγάλη ανάπτυξη όσον αφορά τους ηλεκτρικούς κινητήρες στο παρελθόν. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια το κόστος των μπαταριών έχει μειωθεί σε αντίθεση με το κόστος της βενζίνης που αυξάνεται και το γεγονός πως οι μπαταρίες είναι αποδοτικότερες με μεγαλύτερη χωρητικότητα οδηγούν στην τεχνολογική ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης.

Συγκεκριμένα τα ηλεκτρικά οχήματα θα μπορούσαν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες με βάση την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνουν:

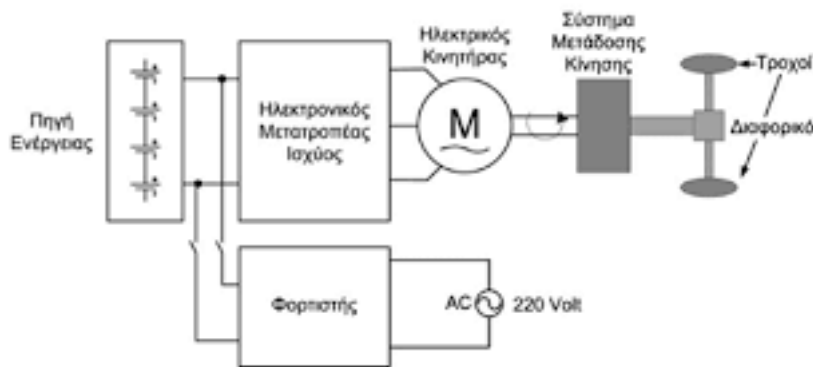
- Τα πλήρως ηλεκτρικά αυτόνομα συστήματα όπου η κύρια πηγή ενέργειας προέρχεται από την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ δύναται να υπάρχουν και άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας όπως είναι τα φωτοβολταϊκά, οι ανεμογεννήτριες κλπ.
- Τα υβριδικά συστήματα τα οποία είναι αυτά όπου χρησιμοποιούν περισσότερες από μία τεχνολογίες για να επιτύχουν κίνηση. Δηλαδή συνδυάζουν έναν συμβατικό κινητήρα εσωτερικής καύσης και έναν η περισσότερους ηλεκτροκινητήρες αλλά και χρησιμοποιούν συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.

2.1.1 Ηλεκτρικό Όχημα

Τα πλήρως ηλεκτρικά αυτόνομα συστήματα έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό πως η πρόωση παρέχεται αποκλειστικά από έναν η και περισσότερους ηλεκτρικούς κινητήρες και ότι η πηγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι φορητή, χημικής ή ηλεκτρομηχανικής φύσης. [17]



Σχήμα 2.1: Σύστημα Κίνησης Ηλεκτρικού Οχήματος [17]

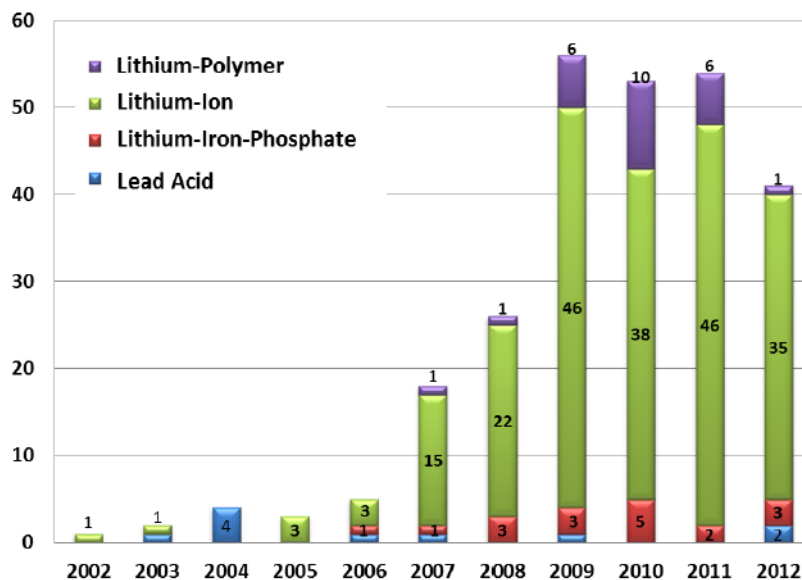


Σχήμα 2.2: Διάγραμμα Κίνησης Ηλεκτρικού Οχήματος

Τα παραπάνω Σχήματα 2.1, 2.2 υποδεικνύουν τα βασικότερα στοιχεία του συστήματος κίνησης σε ένα ηλεκτρικό όχημα τα οποία είναι:

- Πηγή Ηλεκτρικής Ενέργειας: Στην αρχή η πηγή ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων ήταν κυρίως ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές με βασικό τύπο αυτών των συσσωρευτών μολύβδου - οξέος. Όμως η ανάγκη για αυτοδυναμία οδήγησης στην ανάπτυξη και άλλων ειδών με υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας και δυνατότητα παροχής μεγαλύτερης ισχύος αλλά και μεγαλύτερο αριθμό κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης. Αναφέρονται ως παράδειγμα οι συσσωρευτές νικελίου - καδμίου

(NiCd), νικελίου - μετάλλου (NiMH), ιόντων λιθίου (LiION), λιθίου - ιόντων πολυμερών και εξελιγμένοι συσσωρευτές μολύβδου οξέως. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 2.3) παρουσιάζεται ένα διάγραμμα όπου δείχνει την χρήση των διάφορων ειδών συσσωρευτών από το 2002 έως το 2012 σε ηλεκτρικά οχήματα. [1]

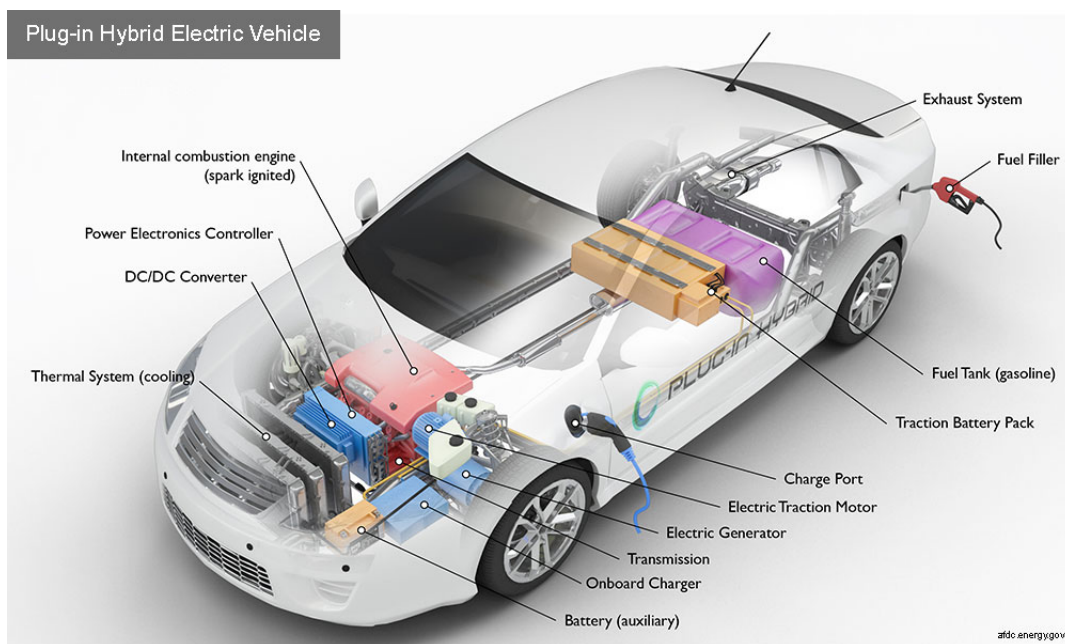


Σχήμα 2.3: Χρήση της τεχνολογίας μπαταριών σε ηλεκτρικά οχήματα από 2002 έως 2012 [1]

- Μετατροπέας Ισχύος** Ο μετατροπέας ισχύος παρεμβάλλεται μεταξύ της πηγής ηλεκτρικής ενέργειας και του κινητήρα και μετασχηματίζει την ισχύ εισόδου σε τάση και ρεύμα εξόδου κατάλληλης μορφής, πλάτους και συχνότητας αν πρόκειται για κινητήρα εναλλασσομένου ρεύματος. Η τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος σε συνδυασμό με μικροεπεξεργαστή ή ψηφιακό επεξεργαστή σήματος που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή αυτή είναι μία σημαντική παράμετρος, όπως και αυτή των συσσωρευτών, στην ανάπτυξη της τεχνολογίας της ηλεκτροκίνησης καθώς συμβάλλουν στην αποδοτικότητα όλου του οχήματος.
- Κινητήρας** Ο ηλεκτρικός κινητήρας αποτελεί το βασικό υποσύστημα του συστήματος κίνησης για την επίτευξη της απαιτούμενης πρόωσης αφού είναι υπεύθυνος για την μετατροπή της ενέργειας που προσφέρει η πηγή ισχύος σε μηχανική. Οι προδιαγραφές που απαιτείται να πληροί ένας ηλεκτροκινητήρας είναι πολλές. Κάποια παραδείγματα αυτών είναι η ροπή, το εύρος ταχυτήτων, το μέγεθος, το βάρος, το κόστος, ο ακουστικός θόρυβος, η θερμοκρασιακή και μηχανική αντοχή, η επίδοση και η απόδοση. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροκίνηση διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες οι οποίες θα αναλυθούν στην συνέχεια της παρούσας εργασίας. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, οι ασύγχρονοι κινητήρες και οι κινητήρες μονίμων μαγνητών. Σε κάθε περίπτωση όμως η σχεδίαση ενός ηλεκτρικού κινητήρα λόγω της πληθώρας των παραμέτρων, της αλληλεξάρτησης αυτών και των προδιαγραφών που πρέπει να τηρούνται είναι μια εξαιρετικά σύνθετη διαδικασία.

2.1.2 Υβριδικό Όχημα

Η πρόωση σε ένα τέτοιο όχημα μπορεί να παρέχεται από δύο ή και περισσότερα είδη ενέργειας, μετατροπείς ή κινητήρες. Ουσιαστικά πρόκειται για έναν συμβιβασμό ανάμεσα στα οφέλη του ηλεκτρικού αυτοκινήτου και στην αυξημένη εμβέλεια κίνησης που παρέχει το σύστημα κίνησης με κινητήρα εσωτερικής καύσης και ταυτόχρονα αποτελεί μία λύση η οποία είναι φιλική προς το περιβάλλον έως ότου να λυθούν τα ζητήματα που δεν επιτρέπουν την μαζική παραγωγή και κυκλοφορία ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Το σύστημα κίνησης ενός υβριδικού αυτοκινήτου συγκριτικά με αυτό του ηλεκτρικού που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1 εμφανίζεται στο παρακάτω Σχήμα 2.4. Το σύστημα αυτό τροφοδοτείται από μπαταρίες, από κινητήρα εσωτερικής καύσης και περιλαμβάνει φορτιστή σύνδεσης με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. [17]



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα Κίνησης Υβριδικού Οχήματος [17]

Τα σύγχρονα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιούν τεχνολογίες που αυξάνουν την απόδοση. Μία από αυτές είναι η αναγεννητική πέδηση, μέσω της οποίας η κινητική ενέργεια του συστήματος μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια για τον συσσωρευτή. Επίσης μερικά υβριδικά χρησιμοποιούν τον κινητήρα εσωτερικής καύσης ως γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρισμού είτε για επαναφόρτιση των συσσωρευτών είτε για την απευθείας τροφοδοσία του ηλεκτρικού κινητήρα. Τα υβριδικά γενικά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την σύνδεση των κινητήριων υποσυστημάτων.

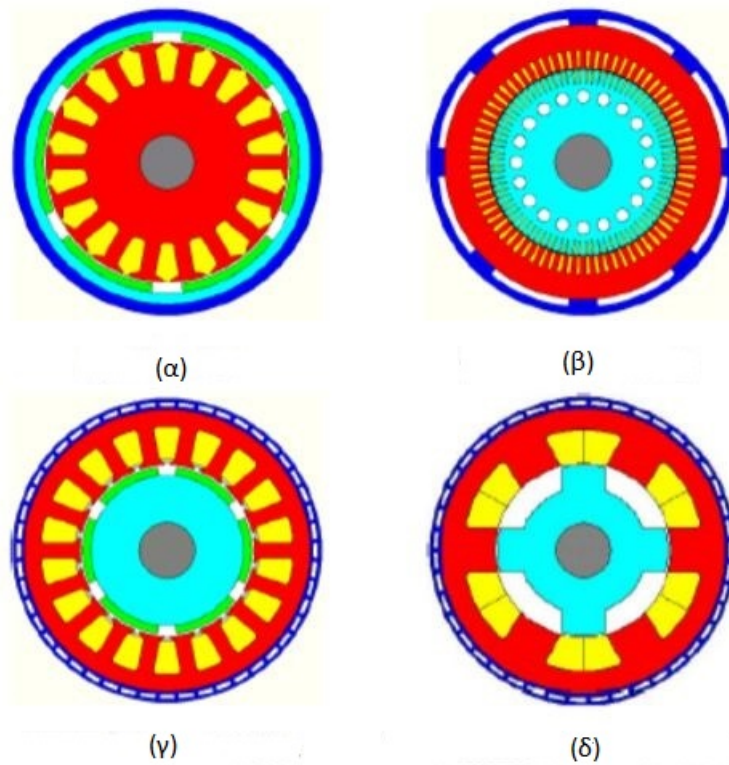
- Σύνδεση σε σειρά: Στην περίπτωση αυτή ο κινητήρας εσωτερικής καύσης χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την κίνηση μίας ηλεκτρικής γεννήτριας και τη φόρτιση του συσσωρευτή. Ο συσσωρευτής τροφοδοτεί τον ηλεκτρικό κινητήρα, ο οποίος δίνει και κίνηση στο σύστημα μετάδοσης.
- Παράλληλη σύνδεση: Στην σύνδεση αυτή υπάρχουν δύο είδη κινητήρων που παρέχουν πρόωση, ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης και ένας ηλεκτρικός κινητήρας. Η ισχύς τους συνδυάζεται κατάλληλα ώστε να πραγματοποιείται η κίνηση με μικρή κατανάλωση καυσίμου, που είναι και ουσιαστικά ο σκοπός ύπαρξης των υβριδικών αυτοκινήτων.

2.2 Είδη Ηλεκτρικών Μηχανών

Για την ηλεκτροκίνηση όπως έχει αναφερθεί το βασικότερο υποσύστημα για την επίτευξη της απαιτούμενης πρόωσης είναι η ηλεκτρική μηχανή. Για το λόγο αυτό η σχεδίαση και βελτιστοποίηση ενός κινητήρα είναι ιδιαίτερα σημαντική στην κατασκευή ενός συστήματος ηλεκτρικής πρόωσης.

Στους ηλεκτρικούς κινητήρες μερικές προδιαγραφές που πρέπει να ικανοποιούνται είναι το μεγάλο εύρος ταχυτήτων υπό σταθερή ισχύ, η υψηλή πυκνότητα ισχύος, η υψηλή απόδοση, το χαμηλό κόστος, η αξιοπιστία και η μεγάλη διάρκεια ζωής με την ελάχιστη δυνατή απαίτηση συντήρησης.

Με βάση τα παραπάνω εξετάζονται και συγκρίνονται τα παρακάτω είδη κινητήρων έτσι ώστε να γίνει η επιλογή του κινητήρα που είναι καταλληλότερος για την εκάστοτε εφαρμογή.

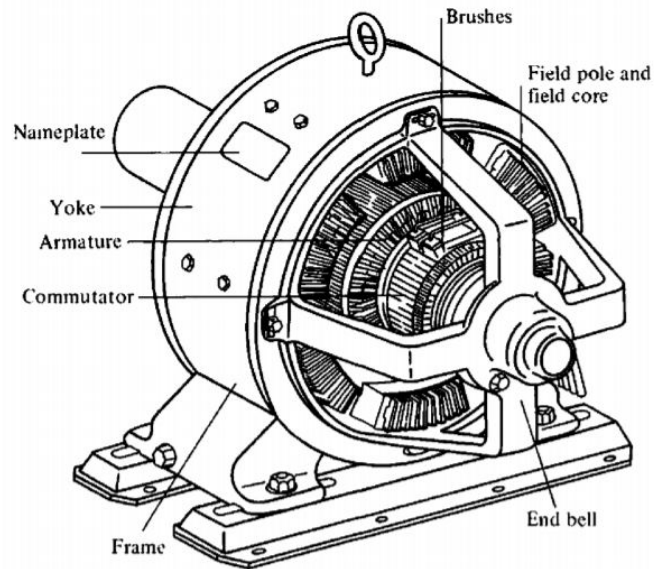


Σχήμα 2.5: (α) Μηχανή Συνεχούς Ρεύματος, (β) Μηχανή Επαγωγής, (γ) Μηχανή Μονίμων Μαγνητών, (δ) Μηχανή Μαγνητικής Αντίδρασης [3]

2.2.1 Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος

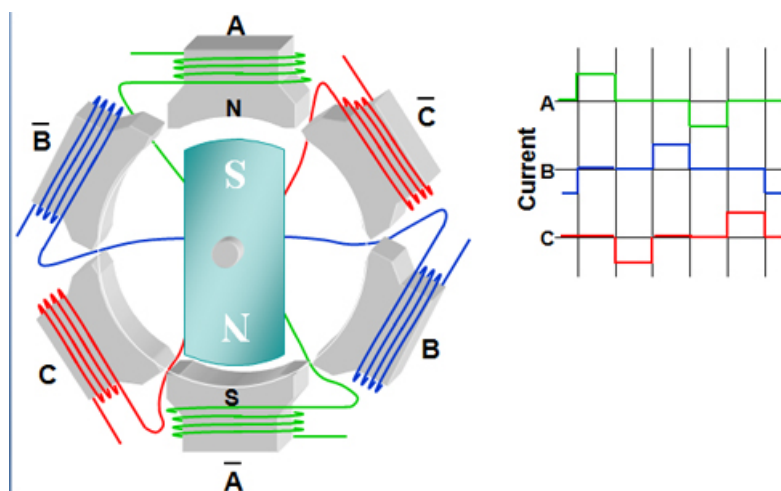
Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι εκείνοι που έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στο παρελθόν σε ηλεκτροκίνητα οχήματα. Ο απλός έλεγχος τους σε συνδυασμό με την τεχνολογική τους ανάπτυξη υπερσχίζουν του βασικού μειονεκτήματός τους που είναι η συντήρηση και αντικατάσταση των ψυκτρών ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Η λειτουργία τους στηρίζεται στην αλληλεπίδραση του πεδίου διεγέρσεως και του πεδίου τυμπάνου. Το πεδίο διεγέρσεως βρίσκεται στον στάτη της μηχανής και συνήθως παράγεται από συγκεντρωμένο τύλιγμα συνεχούς ρεύματος. Ενώ το πεδίο του τυμπάνου

βρίσκεται στο δρομέα της μηχανής και για να μείνει σταθερό απαιτεί χρήση συλλέκτη και ψηκτρών. Η χρησιμότητα του συλλέκτη είναι η εξασφάλιση της καθετότητας μεταξύ των δύο πεδίων του στάτη και του δρομέα, το οποίο και οδηγεί στην απλότητα του ελέγχου για την οδήγηση του. Στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 2.6) παρουσιάζεται ένα σκιαγράφημα ενός τέτοιου κινητήρα με εμφανή όλα τα τμήματα από τα οποία αυτός αποτελείται.



Σχήμα 2.6: Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος [2]

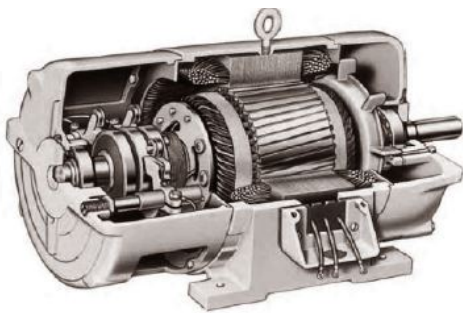
Παρόλη όμως την αξία που έχει η ευκολία του ελέγχου της ταχύτητας η αξιοπιστία τους περιορίζεται πολύ λόγω την συχνής συντήρησης και αλλαγής του συλλέκτη και των ψηκτρών. Για το λόγω αυτό επήλθε ο παραγκωνισμός των ψηκτρών και η εξέλιξη της τεχνολογίας των μετατροπέων εναλλασσομένου ρεύματος που οδήγησε στην ύπαρξη κινητήρων συνεχούς ρεύματος χωρίς συλλέκτη και ψηκτρες (brushless). Το είδος αυτών των κινητήρων συνεχούς ρεύματος μοιάζει αρκετά με αυτό των σύγχρονων κινητήρων μόνιμων μαγνητών όπως φαίνεται και στη συνέχεια με τη διαφορά ότι τα τυλίγματα στάτη δεν τροφοδοτούνται με ημιτονοειδή ρεύματα αλλά με συνεχή (Σχήμα 2.7).



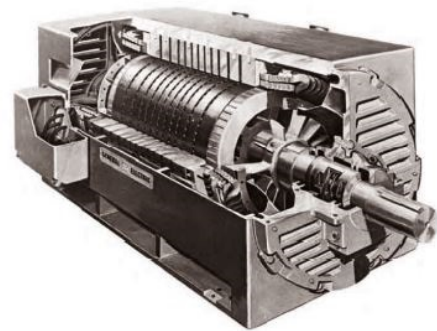
Σχήμα 2.7: Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος Χωρίς Ψήκτρες-Συλλέκτη [18]

2.2.2 Κινητήρες Επαγωγής

Άλλη μία κατηγορία κινητήρων που χρησιμοποιείται συχνά στην ηλεκτροκίνηση είναι οι κινητήρες επαγωγής. Η επιλογή τους βασίζεται κυρίως στο μικρό κόστος κατασκευής και ταυτόχρονα στην υψηλή αξιοπιστία τους. Η λειτουργία βασίζεται στην αλληλεπίδραση του πεδίου του τυμπάνου, που παράγεται από το τύλιγμα του στάτη, όσο αυτό διαρρέεται από τριφασικό συμμετρικό σύστημα ρευμάτων με το τύλιγμα του δρομέα που δημιουργεί ένα πεδίο εξ' επαγωγής. Τα δύο πεδία στρέφονται με σύγχρονη ταχύτητα, ενώ ο δρομέας στρέφεται με διαφορετική ταχύτητα κοντά όμως στη σύγχρονη. Ο δρομέας της μηχανής μπορεί να διαμορφωθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους. Στον πρώτο περιλαμβάνει καταναμημένο τριφασικό τύλιγμα που βραχυκυκλώνεται μέσω του συστήματος δακτυλίων και ψηκτρών επιτρέποντας τη σύνδεση εξωτερικών αντιστάσεων, ενώ στον δεύτερο αποτελείται από μεταλλικές ράβδους βραχυκυκλωμένες στα άκρα δηλαδή πρόκειται για βραχυκυκλωμένο κλωδό. Η δεύτερη περίπτωση είναι και η επικρατέστερη λόγω απλότητας στη σχεδίαση και άρα μείωση κόστους. Ταυτόχρονα έχει και υψηλή αξιοπιστία, μειωμένη απαίτηση για συντήρηση και υψηλή απόδοση. Τα σκαριφήματα της τομής ενός κινητήρα επαγωγής δακτυλιοφόρου δρομέα και βραχυκυκλωμένου κλωδού παρουσιάζονται στην συνέχεια (Σχήματα 2.8α', 2.8β').



(α) Επαγωγικός Κινητήρας Δακτυλιοφόρου Δρομέα



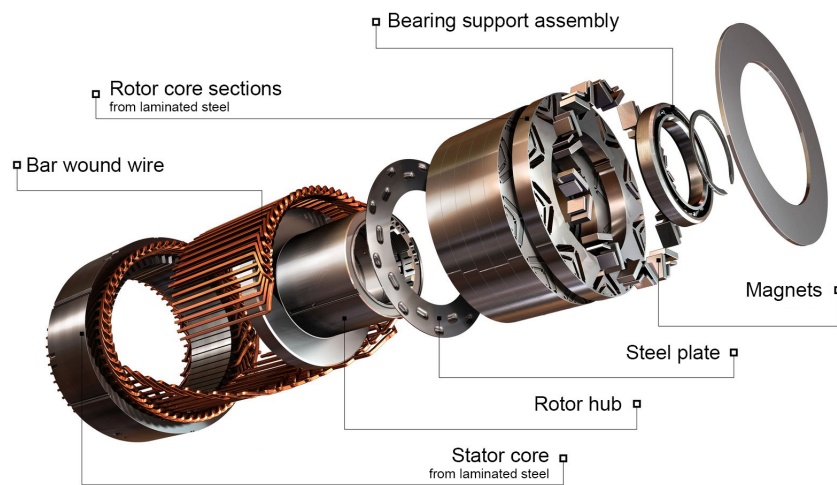
(β) Επαγωγικός Κινητήρας Βραχυκυκλωμένου Κλωδού

Σχήμα 2.8: Κινητήρες Επαγωγής [2]

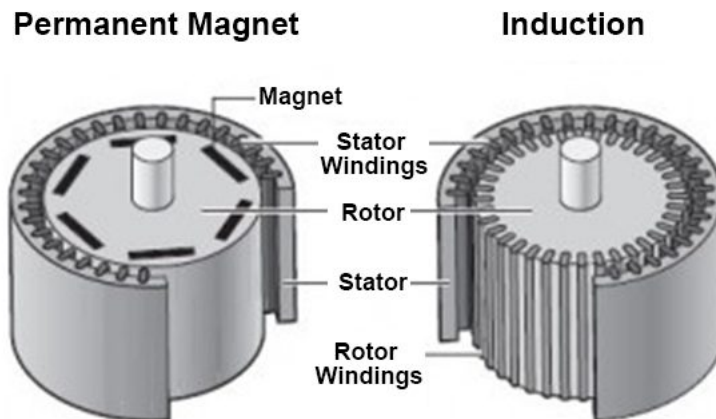
2.2.3 Σύγχρονοι Κινητήρες Μονίμων Μαγνητών

Οι σύγχρονοι κινητήρες χρησιμοποιούνται επίσης με μεγάλη επιτυχία στην ηλεκτροκίνηση. Στηρίζουν τη λειτουργία τους όπως και οι κινητήρες επαγωγής στην αλληλεπίδραση των πεδίων δρομέα και στάτη. Συγκεκριμένα οι σύγχρονοι κινητήρες μονίμων μαγνητών αποτελεί την κύρια εναλλακτική έναντι των κινητήρων επαγωγής. Με τη χρήση μόνιμων μαγνητών στον δρομέα δημιουργείται ένα μόνιμο πεδίο έτσι ώστε να αντικαθίσταται το τύλιγμα πεδίου, ενώ ο στάτης εξακολουθεί να τροφοδοτείται στα τυλίγματα του από τριφασικό ρεύμα, ώστε να δημιουργείται το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Χωρίς το πεδίο τυλίγματος υπάρχει μία μείωση στις απώλειες χαλκού αλλά και μία αύξηση της αξιοπιστίας λόγω έλλειψης χρήσης ψηκτρών. Ακόμα οι κινητήρες αυτοί έχουν υψηλή απόδοση αλλά και υψηλή πυκνότητα ισχύος, στοιχεία που τους κάνουν εξαιρετικά ικανούς για χρήση στην ηλεκτροκίνηση. Το μόνο τους αρνητικό το οποίο διορθώνεται με κατάλληλο έλεγχο είναι πως δεν έχουν μεγάλο εύρος ταχυτήτων σταθερής τιμής ισχύος εξόδου. Η κατασκευή μόνιμων μαγνητών γίνεται από κράματα Νεοδημίου, Σιδήρου και Βορίου, που έχουν υψηλή μαγνήτιση της τάξης του 1.5 Tesla οδήγησε στην εξέλιξη των σύγχρονων κινητήρων μόνιμων μαγνητών. Στην συνέχεια πα-

ρουσιάζονται τα εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται μία σύγχρονη μηχανή μόνιμων μαγνητών καθώς και μία σύγκριση της κατασκευής της με αυτή της κατασκευής ενός κινητήρα επαγωγής (Σχήματα 2.9, 2.10).



Σχήμα 2.9: Σύγχρονη Μηχανή Μονίμων Μαγνητών [20]

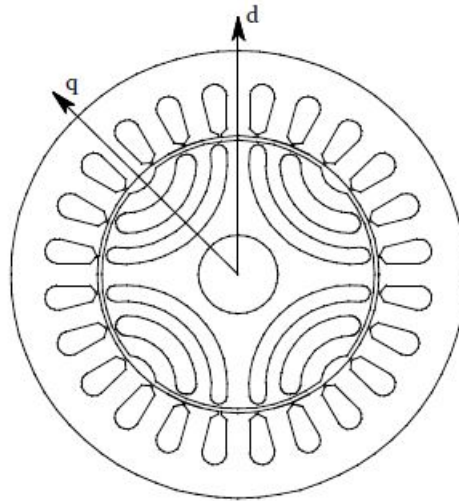


Σχήμα 2.10: Σύγκριση Σύγχρονης Μηχανής και Μηχανής Επαγωγής [19]

2.2.4 Σύγχρονοι Κινητήρες Μαγνητικής Αντίδρασης

Πρόκειται για κινητήρες με σχετικά απλή κατασκευή και χαμηλό κόστος κατασκευής και για το λόγο αυτό έχουν κεντρίσει το ενδιαφέρον στην ερευνητική κοινότητα. Η λειτουργία τους βασίζεται στην μεταβολή της μαγνητικής αντίστασης του δρομέα εκμεταλλευόμενοι την ροπή εκτυπότητας και όχι στην αλληλεπίδραση του πεδίου του δρομέα και του στάτη αφού απουσιάζει το τύλιγμα διέγερσης και οι μόνιμοι μαγνήτες στο δρομέα. Έχουν εύκολο έλεγχο και πολύ καλή χαρακτηριστική ροπής - ταχύτητας. Τα προβλήματα όμως που παρουσιάζουν αποτελούν τροχοπέδη στη χρήση τους σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, καθώς έχουν έντονη κυμάτωση ροπής, έντονο θόρυβο λειτουργίας, μικρή δυνατότητα σε παροχή ισχύος εξόδου και τέλος απαιτούν ιδιαίτερες τοπολογίες μετατροπέα. Συχνά οι τελευταίες βοηθούνται από μόνιμους μαγνήτες στον

δρομέα με αποτέλεσμα να μειώνεται η κυμάτωση ροπής και ο θόρυβος λόγω επίτευξης ομαλής μεταβολής την μαγνητικής αντίστασης.



Σχήμα 2.11: Σκιαγράφημα Σύγχρονου Κινητήρα Μαγνητικής Αντίδρασης με Μόνιμους Μαγνήτες στο Δρομέα [13]

2.2.5 Αξιολόγηση όλων των παραπάνω κινητήρων για ηλεκτροκίνηση

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η αξιολόγηση των κατηγοριών μηχανών που αναλύθηκαν παραπάνω, με βάση στοιχεία βιβλιογραφίας. Χρησιμοποιείται ένα σύστημα βαθμολόγησης με κλίμακα από 1 έως 5 στον παρακάτω πίνακα όπου και αξιολογούνται έξι βασικά χαρακτηριστικά των κινητήρων αυτών.

Χαρακτηριστικά	Κινητήρας			
	Συνεχούς Ρεύματος	Επαγωγής	Μόνιμων Μαγνητών	Μαγνητικής Αντίδρασης
Πυκνότητα Ισχύος	2.5	3.5	5	3.5
Απόδοση	2.5	3.5	5	3.5
Έλεγχος	5	5	4	3
Αξιοπιστία	3	5	4	5
Τεχνολογική Πρόοδος	5	5	4	4
Κόστος	4	5	3	4

Πίνακας 2.1: Συγκριτικός πίνακας αξιολόγησης των βασικών τύπων μηχανών

Από τον παραπάνω πίνακα 2.1 φαίνεται πως οι κινητήρες επαγωγής και οι κινητήρες μόνιμων μαγνητών είναι η καταλληλότεροι για χρήση σε ηλεκτροκίνηση. Μάλιστα οι δεύτεροι λόγω της υψηλότερης απόδοσης, της υψηλής πυκνότητας ισχύος και του χαμηλότερου κόστους παρότι δεν έχουν την τεχνολογικό ωριμότητα και αξιοπιστία των κινητήρων επαγωγής ενδείκνυνται όλο και περισσότερο για τέτοιες εφαρμογές. Για τον λόγο αυτό λοιπόν ο κινητήρας που μελετάται η σχεδίαση και η βελτιστοποίηση του ανήκει στην κατηγορία των σύγχρονων κινητήρων μόνιμων μαγνητών

2.3 Επιλογή Τοπολογίας Κινητήρα Μόνιμων Μαγνητών

Η επιλογή τοπολογίας αφορά κυρίως τη διαμόρφωση των μόνιμων μαγνητών στον δρομέα αλλά και τη σχετική θέση στάτη δρομέα. Οι βασικές κατηγορίες κινητήρα με βάση την διαμόρφωση των μαγνητών δρομέα αναλύονται στην συνέχεια.

2.3.1 Κινητήρας Επιφανειακών Μόνιμων Μαγνητών

Οι κινητήρες επιφανειακών μόνιμων μαγνητών είναι η τοπολογία εκείνη που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στις εφαρμογές ηλεκτροκίνησης. Κατασκευάζονται σχετικά εύκολα και με χαμηλό κόστος. Ακόμα παρέχουν πληθώρα πλεονεκτημάτων όπως υψηλή απόδοση, επίδοση και ποιότητα ισχύος. Η διαμόρφωση είναι κυλινδρικού δρομέα και επειδή η μαγνητική διαπερατότητα των μόνιμων μαγνητών είναι περίπου ίση με αυτή του αέρα οι αυτεπαγωγές ευθέως (d) και κάθετου (q) άξονα είναι και αυτές περίπου ίσες. Η ποιότητα ισχύος είναι πολύ υψηλή διότι λόγω της τοποθέτησής των μαγνητών κοντά στο διάκενο αξιοποιούνται όσο το δυνατόν καλύτερα οι μαγνητικές τους ιδιότητες και αναπτύσσεται η απαιτούμενη ροπή. Μάλιστα η μεγιστοποίηση της ροπής συμβαίνει όταν η εσωτερική γωνία ροπής είναι 90 ηλεκτρικές μοίρες. Παρόλα αυτά ένα σημαντικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης τοπολογίας είναι πως οι μαγνήτες επειδή τοποθετούνται επιφανειακά είναι εκτεθειμένοι ιδιαίτερα στις υψηλές ταχύτητες όπου υπάρχει σοβαρός κίνδυνος αποκόλλησης τους, λόγω φυγόκεντρων δυνάμεων.

2.3.2 Κινητήρας Εσωτερικά Επιφανειακών Μαγνητών

Στην συγκεκριμένη τοπολογία οι μαγνήτες τοποθετούνται στην επιφάνεια του δρομέα, αλλά το μεταξύ τους πληρείτε με σίδηρο. Στη διαμόρφωση αυτή προφανώς δεν υπάρχει ο κίνδυνος της αποκόλλησης των μαγνητών σε υψηλές ταχύτητες όμως η εκτυπότητα λόγω σιδήρου προκαλεί μία ακόμα συνιστώσα ροπής.

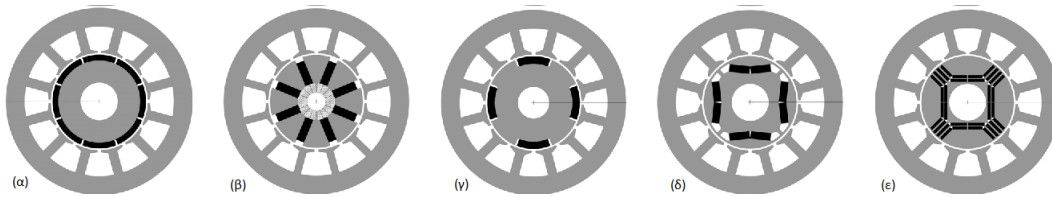
2.3.3 Κινητήρας Εσωτερικών Μόνιμων Μαγνητών

Σε αυτές τις τοπολογίες οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται στο εσωτερικό του σιδήρου του δρομέα. Οι διαμορφώσεις των μαγνητών στο εσωτερικό του δρομέα είναι πολλές (V, I), εγκάρσιων μόνιμων μαγνητών και μαγνητικής αντίστασης με υποδομή μόνιμων μαγνητών. Στις τοπολογίες αυτές είναι έντονη η συνιστώσα εκτυπότητας που προστίθεται στην μηχανή με αποτέλεσμα η μεγιστοποίηση της ροπής να συμβαίνει όταν η εσωτερική γωνία ροπής φτάνει έως και 150 ηλεκτρικές μοίρες σε αντίθεση με τους επιφανειακούς μόνιμους μαγνήτες που ήταν στις 90 ηλεκτρικές μοίρες. Ακόμα σε αντίθεση με τους επιφανειακούς οι εσωτερικοί είναι πιο προστατευμένοι από άποψη αποκόλλησης. Μπορούν να έχουν καλύτερη ποιότητα ισχύος σε μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων, υψηλή απόδοση και υψηλό συντελεστή ισχύος, όμως υστερούν στην πολυπλοκότητα και άρα στο κόστος κατασκευής.

Η επιλογή κινητήρα εσωτερικών μόνιμων μαγνητών παρά την πολυπλοκότητα κατασκευής γίνεται για τα πλεονεκτήματα που αναφέρονται παραπάνω όσον αφορά την σταθερή ροπή σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων, την απόδοση και την επίδοση. Σε μία τοπολογία τύπου I η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο είναι μικρότερη της μαγνητικής επαγωγής των μόνιμων μαγνητών διότι η επιφάνεια τους είναι μικρότερη της επιφάνειας

του πόλου. Ακόμα η μαγνητική διαπερατότητα στον q άξονα είναι μεγαλύτερη από αυτή στον d άξονα, που έχει ως αποτέλεσμα την ανισοτροπία στο μαγνητικό κύκλωμα και την συνιστώσα ροπής εκτυπότητας. Για την βελτίωση της ημιτονικότητας της επαγόμενης ΜΕΔ του δρομέα και την αύξηση της αυτεπαγωγής d άξονα, με σκοπό την βελτίωση της δυνατότητας εξασθένισης πεδίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τοπολογία τύπου V. Η τοπολογία τύπου (V-I), συνδυάζει τα πλεονεκτήματα και των δύο διαμορφώσεων που αναφέρονται παραπάνω.

Τέλος για όλες τις παραπάνω τοπολογίες που αναλύονται, φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12: Τοπολογίες Δρομέων Κινητήρων Μόνιμων Μαγνητών: (α) επιφανειακών μόνιμων μαγνητών, (β)εγκάρσιων μόνιμων μαγνητών, (γ)εσωτερικά επιφανειακών μόνιμων μαγνητών, (δ)εσωτερικών μόνιμων μαγνητών τύπου V, (ε)μαγνητικής αντίστασης με υποβοήθηση μόνιμων μαγνητών. [14]

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας σχεδιάζεται και βελτιστοποιείται μία Σύγχρονη Μηχανή Εσωτερικών Μόνιμων Μαγνητών και τοπολογίας δρομέα τύπου (V-I) (πολυστρωματικών μόνιμων μαγνητών) για τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω (επίδοση, απόδοση, σταθερή ποιότητα ισχύος σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων κλπ). Στην μηχανή αυτή κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας της διατηρείται σταθερός ο όγκος της επομένως θα μπορούσε να τοποθετηθεί σε έναν συγκεκριμένο μικρό σχετικά χώρο.

Κεφάλαιο 3

Σχεδίαση Κινητήρα

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται λεπτομερώς οι διαδικασίες που ακολουθούνται για τη σχεδίαση του Σύγχρονου Κινητήρα Εσωτερικά Μόνιμων Μαγνητών Τύπου V-I. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται κάποιες θεμελιώδεις σχέσεις προκαταρκτικής σχεδίασης με χρήση αναλυτικών σχέσεων, αναλύονται οι τοπολογίες για τυλίγματα στάτη και προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά του δρομέα για την συγκεκριμένη τοπολογία κινητήρων Μόνιμων Μαγνητών.

Στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο υλοποιήθηκε η παραμετρική σχεδίαση του κινητήρα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η δημιουργία ενός παραμετρικού κώδικα είναι απαραίτητη προκειμένου κατά την βελτιστοποίηση να αλλάζουν οι εκάστοτε τιμές για την σχεδίαση της κάθε γεωμετρίας. Επίσης χρησιμοποιείται η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων και περιγράφεται πως ένα δυναμικό πρόβλημα όπως αυτό επιλύεται μέσω μιας αλληλουχίας μαγνητοστατικών αναλύσεων. Μοντελοποιείται λοιπόν η σχετική κίνηση στάτη-δρομέα και η μεταβολή των ρευμάτων τροφοδοσίας, μέσω των οποίων προκύπτουν όπως φαίνεται και στην συνέχεια της παρούσας εργασίας τα κατάλληλα αποτελέσματα για την αξιολόγηση και βελτιστοποίηση μίας μηχανής.

3.2 Θεμελιώδεις Αρχές Προκαταρκτικής Σχεδίασης

Η προκαταρκτική Σχεδίαση δεν οδηγεί στην λεπτομερή διαμόρφωση του κινητήρα, αλλά πρόκειται για μία διαδικασία εκκίνησης απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση, καθώς καθορίζει τα όρια των μεταβλητών σχεδίασης.

3.2.1 Ειδική Μαγνητική Φόρτιση

Η ειδική μαγνητική φόρτιση ή αλλιώς μέση τιμή πυκνότητας μαγνητικής ροής \bar{B} συνδέει τον αριθμό των πόλων P με την ροή ανά πόλο Φ μίας μηχανής ως εξής:

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

όπου

- D : η διάμετρος του δρομέα αυξημένη κατά το πάχος διακένου
 L : το ενεργό μήκος της μηχανής.

Λαμβάνει συνήθως τιμές από 0.4 T έως 0.7 T και το άνω όριο τίθεται από το φαινόμενο του κορεσμού του σιδηρομαγνητικού υλικού στα δόντια του στάτη. Η υψηλή μαγνητική φόρτιση σημαίνει και αυξημένη δυνατότητα παραγωγής ροπής και ισχύος. Το αντίτιμο είναι αυξημένες απώλειες πυρήνα ειδικά όταν τα δόντια του στάτη βρίσκονται σε κορεσμό. Σε ειδικές μηχανές μεγάλης απαίτησης πυκνότητας ροπής, όπου κύριο λόγο παίζει η επίδοση σε στατική λειτουργία, μπορεί η τιμή της ειδικής μαγνητικής φόρτισης να φτάσει και το 1 T.

3.2.2 Ειδική Ηλεκτρική Φόρτιση

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση ac προσδιορίζεται από την ενεργό τιμή των αμπερελιγμάτων ($3 \cdot N \cdot P \cdot I_{rms}$) ανά μέτρο περιφέρειας διακένου ($\pi \cdot D$) ως εξής:

$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot N \cdot I_{rms}}{\pi \cdot D} \quad (3.2)$$

όπου

- N : ο συνολικός αριθμός εν σειρά ελιγμάτων ανά φάση
 I_{rms} : η ενεργός τιμή του ρεύματος.

Λαμβάνει συνήθως τιμές από 15.000 $AE \setminus m$ έως 45000 $AE \setminus m$. Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση καθώς και η ειδική μαγνητική φόρτιση που αναλύθηκε πρωτίστως αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες στην διαμόρφωση της ικανότητας παραγωγής ροπής. Η ηλεκτρική φόρτιση συνδέεται με τις απώλειες χαλκού της μηχανής.

3.2.3 Σχέση Εξόδου Ηλεκτρικής Μηχανής

Τα δύο παραπάνω μεγέθη σχετίζονται με την σχέση εξόδου της ηλεκτρικής μηχανής, δηλαδή με την ροπή η την ισχύς εξόδου. Για την εύρεση τους ακολουθείται η εξής μεθοδολογία:

Επαγόμενη Τάση

Η ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης E_{rms} δίνεται από τη σχέση:

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

όπου

- k_w : συντελεστής τυλίγματος
 f : ηλεκτρική συχνότητα
 Φ : θεμελιώδης μαγνητική ροή ανά πόλο

Φαινόμενη Ισχύς

Η φαινόμενη ισχύς της μηχανής δίνεται προσεγγιστικά από την ακόλουθη σχέση :

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

Ηλεκτρική Συχνότητα

Η μηχανική ταχύτητα περιστροφής n σε στροφές ανά λεπτό (ΣΑΛ) σε σχέση με την ηλεκτρική συχνότητα f είναι :

$$n = \frac{120 \cdot f}{P} \quad [\text{ΣΑΛ}] \quad (3.5)$$

$$f = \frac{P}{2} \cdot n \quad [\text{Hz}] \quad (3.6)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει πως η σχέση εξόδου της ηλεκτρική μηχανής είναι :

$$S = 1.11 \cdot k_w \cdot \pi^2 \cdot \bar{B} \cdot ac \cdot D^2 \cdot L \cdot n \quad (3.7)$$

Η ισχύς εξόδου επομένως είναι ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου του διακένου και ανάλογη του ενεργού μήκους της μηχανής. Επομένως στην σχεδίαση ενός κινητήρα είναι ιδιαίτερα σημαντικό να βρεθεί ο κατάλληλος συνδυασμός ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης, ειδικής μαγνητικής φόρτισης και διαστάσεων διακένου ώστε να είναι επιθυμητή η ισχύς στην έξοδο χωρίς αυτό να σημαίνει μείωση απόδοσης, αύξηση βάρους και κόστους.

3.2.4 Διαστασολόγηση Διακένου

Η σημασία της σωστής διαστασολόγησης του διακένου είναι ιδιαίτερα σημαντική διότι με βάση αυτή επιτυγχάνεται η επιθυμητή αναπτυσσόμενη ροπή στο διάκενο. Η διαστασολόγηση αυτή αφορά τη διάμετρο του δρομέα αυξημένη κατά το πάχος διακένου μεταξύ δρομέα και στάτη D και το ενεργό μήκος της μηχανής L .

Επιφάνεια διακένου

Ο υπολογισμός της επιφάνειας διακένου γίνεται με βάση την επιθυμητή ροπή στο διάκενο T_e , η οποία για να είναι μέγιστη πρέπει τα δύο πεδία στάτη και δρομέα να είναι κάθετα μεταξύ τους. Η ροπή αυτή μπορεί να υπολογιστεί με βάση την εφαπτομενική πίεση P_t των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο και την επιφάνεια του διακένου $A = \pi DL$. Επομένως ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις :

$$F_t = P_t \cdot A = P_t \cdot \pi DL \quad (3.8)$$

$$T_e = \frac{D \cdot F_t}{2} \quad (3.9)$$

Από τον συνδυασμό των δύο παραπάνω προκύπτει πως η ροπή στο διάκενο είναι :

$$T_e = \frac{\pi \cdot L \cdot D^2 \cdot P_t}{2} \quad (3.10)$$

Η μέση τιμή της εφαπτομενικής πίεσης στο διάκενο ορίζεται από την εξής σχέση :

$$P_t = \frac{\int_C \overline{B}_n \cdot \overline{B}_t dl}{\pi \cdot D \cdot \mu_0} \quad (3.11)$$

$$\overline{B}_n = \overline{B}_t = \overline{B} \cdot \sin \vartheta \quad (3.12)$$

$$\int_C \overline{B}_n \cdot \overline{B}_t dl = \pi \cdot D \cdot \overline{B}_n \cdot \overline{B}_t = \pi \cdot D \cdot \frac{\overline{B}^2 \cdot \sin 2\vartheta}{2} \quad (3.13)$$

όπου

- \overline{B}_n : μέση ακτινική συνιστώσα μαγνητικής επαγωγής διακένου
- \overline{B}_t : μέση εφαπτομενική συνιστώσα μαγνητικής επαγωγής διακένου
- \overline{B} : ειδική μαγνητική φόρτιση
- ϑ : γωνία μεταξύ εφαπτομενικής και ακτινικής συνιστώσας
- μ_0 : μαγνητική διαπερατότητα του κενού ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T m A}^{-1}$)

Τέλος η εύρεση της μέσης τιμής της εφαπτομενικής πίεσης στο διάκενο και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής που αναπτύσσεται σε αυτό καταλήγουν στις εξής σχέσεις :

$$P_t = \frac{\overline{B}^2 \cdot \sin 2\vartheta}{2 \cdot \mu_0} \quad (3.14)$$

$$T_e = \frac{D^2 L \cdot \pi \cdot \overline{B}_n \cdot \overline{B}_t}{2 \cdot \mu_0} = \frac{D^2 L \cdot \overline{B}^2 \cdot \sin 2\vartheta}{4 \cdot \mu_0} \quad (3.15)$$

Πάχος διακένου

Ιδιαίτερη σημασία στη σωστή διαστασολόγηση του διακένου και της μηχανής προκειμένου να λειτουργεί με έναν επιθυμητό τρόπο έχει το πάχος διακένου. Όπως προαναφέρθηκε το διάκενο είναι αυτό στο οποίο πραγματοποιείται η ηλεκτρομηχανική ροπή της ισχύος. Γενικά ισχύει η ακόλουθη αρχή όσον αφορά το πάχος του :

Όσο μικρότερο είναι τόσο μεγαλύτερες θα είναι οι συνιστώσες της πίεσης και άρα το μέγεθος της αναπτυσσόμενης ροπής σε αυτό. Όσο μεγαλύτερο είναι τόσο θα μειώνεται η απόδοση της μηχανής, με μείωση όμως και στις αρμονικές της ΜΕΔ που γίνεται πιο ημιτονική.

Το μέγεθος όμως αυτό όπως είναι λογικό εξαρτάται και από την ακρίβεια κατασκευής, την δυνατότητα μηχανικής στήριξης δρομέα και στάτη και τον περιορισμό των οποιοδήποτε εκκεντροτήτων στον άξονα της μηχανής που μπορούν να οδηγήσουν σε ασυμμετρία.

3.2.5 Χαρακτηριστικά Στάτη

Συχνότητα Λειτουργίας - Πόλοι Μηχανής

Η συχνότητα λειτουργίας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα λειτουργικά χαρακτηριστικά καθώς καθορίζει την διακύμανση των απωλειών του πυρήνα αλλά και την τιμή των αντιδράσεων σκέδασης και μαγνήτισης. Η επιλογή λοιπόν της ονομαστικής συχνότητας λειτουργίας και του αριθμού των πόλων σχετίζεται με τη μηχανική ταχύτητα περιστροφής στην μόνιμη κατάσταση:

$$\frac{P}{f} = \frac{4 \cdot \pi}{\omega_m} \quad (3.16)$$

όπου

- P : αριθμός των πόλων της μηχανής
- f : ηλεκτρική συχνότητα λειτουργίας
- ω_m : μηχανική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής

Από την σχέση αυτή συμπεραίνετε πως όσο πιο χαμηλή ταχύτητα περιστροφής ο αριθμός των πόλων μπορεί να αυξηθεί, διατηρώντας σχετικά μικρή ηλεκτρική συχνότητα.

Πυκνότητα Ρεύματος Τυλίγματος

Αποτελεί βασικό ηλεκτρικό μέγεθος της μηχανής και σχετίζεται με την θερμική της ισορροπία αφού προσδιορίζει το μέγεθος των ωμικών απωλειών στο τύλιγμα της μηχανής. Σε ονομαστική λειτουργία οι θερμικές απώλειες είναι κατά κύριο λόγο χαλκού και έπειτα σιδήρου. Μπορούν όπως είναι λογικό να οδηγήσουν σε αύξηση της θερμοκρασίας της μηχανής και άρα να απαιτείται εξαναγκασμένη ψύξη. Ένα εμπειρικό όριο πυκνότητας ρεύματος είναι τα 4 A mm^{-2} πάνω από το οποίο λόγω πιθανής αύξησης της θερμοκρασίας υπάρχει ανάγκη για εξαναγκασμένη ψύξη που υλοποιείται είτε με τεχνητό εξαερισμό είτε με κλειστό σύστημα κυκλοφορίας ψυκτικού υγρού.

Διαμόρφωση Τυλιγμάτων

Το τύλιγμα του στάτη μιας μηχανής μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο κύριες διαμορφώσεις που αναλύονται στην συνέχεια ανάλογα με τον τρόπο εκείνο που διανέμεται στις αύλακες της μηχανής. Έπειτα τα τυλίγματα αυτά διακρίνονται με την σειρά τους σε βροχοειδή και κυματοειδή (για μηχανή λίγων και πολλών πόλων αντίστοιχα) με βάση τις τερματικές συνδέσεις των επιμέρους πηνίων, αλλά και σε μονής η διπλής στρώσης με βάση το βήμα συστάδας. Οι βασικές αυτές κατηγορίες είναι:

- Συγκεντρωμένα Τυλίγματα

Το τύλιγμα αυτό αποτελεί και την απλούστερη τοπολογία τυλίγματος όταν πρόκειται για διαμόρφωση επικαλυπτόμενη πλήρους βήματος, διότι ουσιαστικά οι σπειρές μίας φάσης διέρχονται μόνο από ένα αυλάκι ανά πόλο. Η διαμόρφωση αυτή αν και απλή δεν παρουσιάζει καλά χαρακτηριστικά στην ημιτονικότητα της μαγνητορροής και της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης. Υπάρχει επίσης και η τοπολογία

του συγκεντρωμένου τυλίγματος χωρίς επικάλυψη φάσεων όπου οι σπείρες του πηνίου μίας φάσης περιελίσσονται γύρω από κάθε δόντι. Η διαμόρφωση όμως αυτή δεν είναι τόσο απλή όσο η προηγούμενη καθώς έχει περιορισμό ως προς την επιλογή του συνδυασμού των αριθμών των πόλων και των αυλάκων. Όχι μόνο δεν είναι όλοι οι συνδυασμοί εφικτοί αλλά και ο συντελεστής τυλίγματος δεν είναι ίδιος για όλους. Παρά τις δυσκολίες που υπάρχουν στην χρήση των συγκεντρωμένων τυλιγμάτων έχουν απασχολήσει αρκετά την επιστημονική κοινότητα λόγω και των πλεονεκτημάτων τους που είναι η υψηλή απόδοση, τα κοντά άκρα τυλίγματος που μειώνουν τις απώλειες χαλκού, τον υψηλό συντελεστή πληρότητας, τη μεγάλη ισχύ, τη χαμηλή ροπή ευθυγράμμισης καθώς και την μεγάλη ανοχή στα σφάλματα.

- Διανεμημένα ή Κατανεμημένα Τυλίγματα

Το τύλιγμα αυτό όταν η διαμόρφωσή του είναι πλήρους βήματος οι σπείρες της μίας φάσης ανά πόλο διανέμονται σε περισσότερες από μία διαδοχικές αύλακες. Γι' αυτό και ορίζεται το μέγεθος q το οποίο είναι ουσιαστικά ο αριθμός των διαδοχικών αυλάκων ανά πόλο και φάση που τροφοδοτούνται από τα πηνία της ίδιας φάσης. Το νούμερο αυτό δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$q = \frac{Q}{m \cdot P} \quad (3.17)$$

όπου

Q : αριθμός των αυλάκων της μηχανής
 m : αριθμός των φάσεων της μηχανής
 P : αριθμός των πόλων της μηχανής

Το πλεονέκτημα των διανεμημένων τυλιγμάτων είναι πως συμβάλλει στην ημιτονικότητα του πεδίου. Όμως κερδίζοντας σε ημιτονικότητα μειώνεται το πλάτος της θεμελιώδους συνιστώσας της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης (ΜΕΔ). Ο συντελεστής πλάτους που μειώνει την ΜΕΔ είναι:

$$k_b = \frac{\sin \frac{q\gamma}{2}}{q \cdot \sin \frac{\gamma}{2}} \quad (3.18)$$

όπου

γ : βήμα αύλακος σε ηλεκτρικές μοίρες

Το κλασματικό βήμα στο κατανεμημένο τύλιγμα βελτιώνει ακόμα περισσότερο την ημιτονικότητα μειώνοντας όμως το πλάτος της ΜΕΔ κατά έναν συντελεστή βήματος:

$$k_p = \cos \frac{\pi - \rho}{2} \quad (3.19)$$

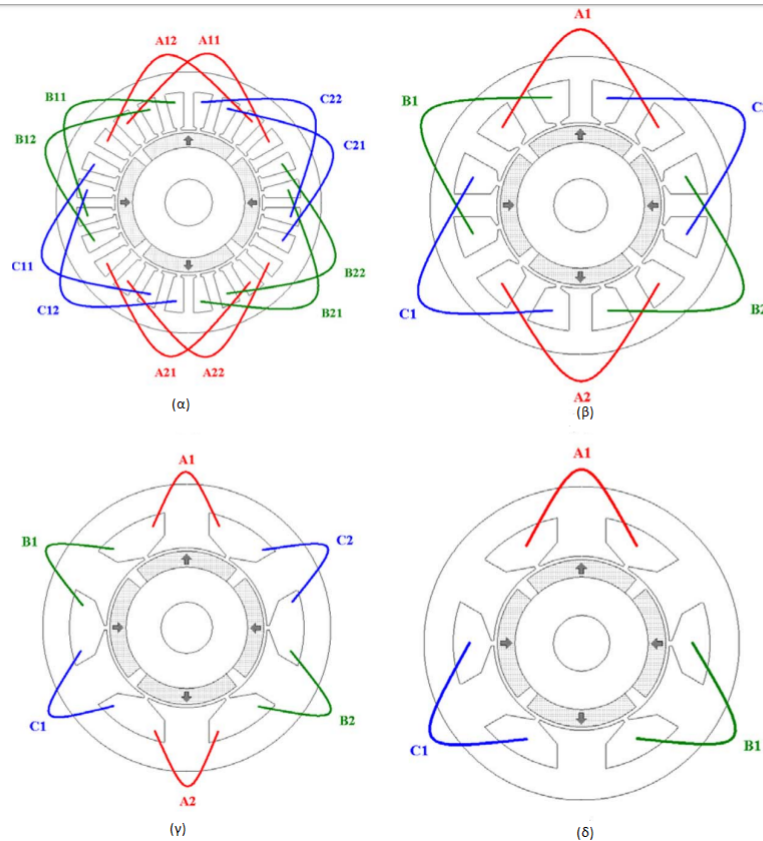
όπου

ρ : κλασματικό βήμα σε ηλεκτρικές μοίρες

Τελικά στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής τυλίγματος είναι :

$$k_w = k_b \cdot k_p \quad (3.20)$$

Στην συνέχεια η εικόνα αποτελεί μία σύγκριση κάποιων διαμορφώσεων τυλιγμάτων σε μία σύγχρονη μηχανή 4 πόλων.



Σχήμα 3.1: Είδη Τυλιγμάτων: (α) επικαλυπτόμενο διανεμημένο (β) επικαλυπτόμενο συγκεντρωμένο (γ) συγκεντρωμένο διπλής στρώσης (δ) συγκεντρωμένο απλής στρώσης [6]

3.2.6 Χαρακτηριστικά Δρομέα

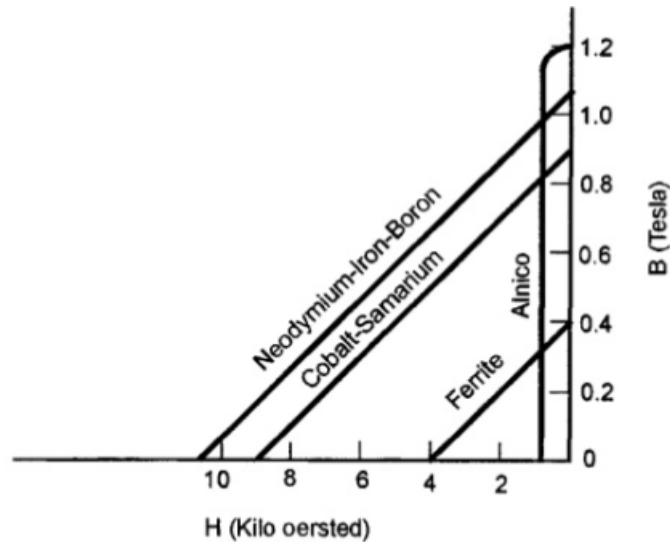
Η τοπολογία δρομέα που επιλέγεται για την συγκεκριμένη μηχανή είναι εσωτερικών μόνιμων μαγνητών διπλής στρώσεως και πιο συγκεκριμένα τύπου V-I. Οι μόνιμοι μαγνήτες δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για πολύ καιρό στην κατασκευή μόνιμων μαγνητών κυρίως διότι τα υλικά τους δεν ήταν αρκετά τεχνολογικά ώριμα. Μετά την ανακάλυψη των υλικών Αργιλίου (Alnico) και Φερρίτη (Ferrite) οι μόνιμοι μαγνήτες χρησιμοποιήθηκαν ευρέως σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης.

Για να γίνει αντιληπτή η συμπεριφορά ενός μόνιμου μαγνήτη πρέπει να οριστούν συγκεκριμένα μεγέθη τα οποία είναι :

- Η πυκνότητα ροής B_r που παραμένει σε έναν μόνιμο μαγνήτη μετά τον κορεσμό (παραμένουσα μαγνήτιση).
- Η δύναμη απομαγνήτισης H_c που απαιτείται για τον μηδενισμό της κανονικής πυκνότητας του μαγνήτη (πεδίο αναφοράς).

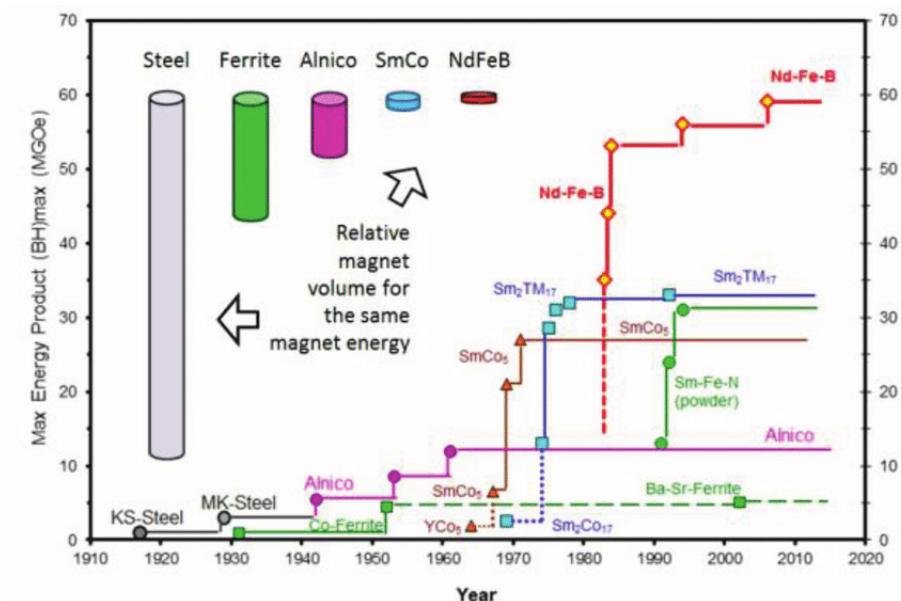
- Η καμπύλη απομαγνήτισης η οποία χρησιμοποιείται για την ανάλυση και το σχεδιασμό μηχανών αφού δείχνει την επιρροή της έντασης εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, λόγω της διέγερσης του τυμπάνου.

Επομένως για τους μόνιμους μαγνήτες με βάση τα παραπάνω πρέπει να χρησιμοποιηθούν σκληρά μαγνητικά υλικά καθώς αυτά διατηρούν την μαγνήτισή τους. Τα υλικά αυτά που είναι ικανά να χρησιμοποιηθούν παρατίθενται στο παρακάτω διάγραμμα, στο οποίο παρουσιάζονται για σύγκριση οι καμπύλες απομαγνήτισής τους. [13]



Σχήμα 3.2: Χαρακτηριστικές B-H για διάφορους Μόνιμους Μαγνήτες [13]

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται μια ιστορική ανάπτυξη των υλικών αυτών. Πιο συγκεκριμένα η γραφική αυτή δείχνει την καλύτερευση της μέγιστης ενέργειας στα υλικά συγκριτικά με τα χρόνια από το 1910 έως σήμερα.



Σχήμα 3.3: Ιστορική Ανάπτυξη Υλικών Μονίμων Μαγνητών με βάση την μέγιστη ενέργεια τους [22]

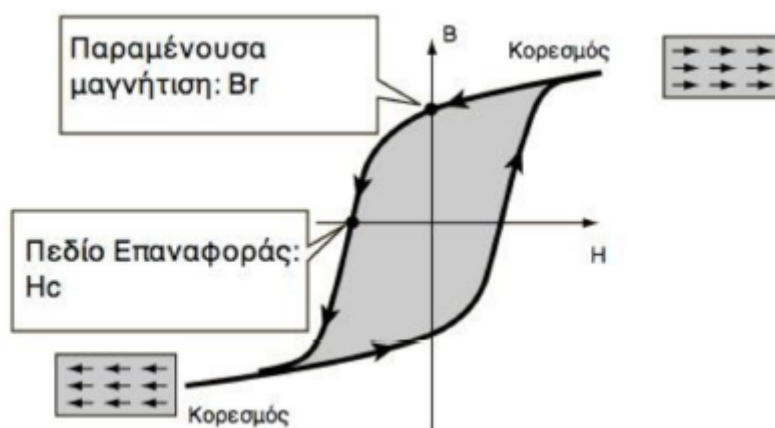
3.2.7 Σιδηρομαγνητικά Υλικά

Για την κατασκευή του σώματος του στάτη και του δρομέα μίας μηχανής επιλέγονται συνήθως μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά. Η μεταβλητότητα της μαγνητικής ροής του πυρήνα σε συνδυασμό με το κόστος των επιμέρους υλικών καθορίζουν την επιλογή χρησιμοποίησης λαμαρίνας ή συμπαγούς σιδήρου.

Συνήθως επιλέγεται η χρήση της λαμαρίνας σιδήρου διότι λόγω ανάπτυξης δινορρευσμάτων ελαχιστοποιούνται με τις λεπτές λαμαρίνες, που καλύπτονται από μονωτικό υλικό, οι απώλειες που προκαλούν τα ρεύματα αυτά μέσω της μείωσης της αγωγίμης διαδρομής τους. Επιπρόσθετα η καμπύλη μαγνήτισης τους εμφανίζει πολύ μεγάλη κλίση και ο βρόχος υστέρησης έχει μικρό εμβαδόν, στοιχείο που υποδεικνύει μικρές απώλειες υστέρησης. Επομένως οι λαμαρίνες οδηγούν σε μείωση των απωλειών του πυρήνα μειώνοντας τις απώλειες και υστέρησης και δινορρευσμάτων και ταυτόχρονα έχουν υψηλή μαγνητική διαπερατότητα.

Αξίζει να σημειωθεί πως με την προσθήκη ποσότητας πυριτίου βελτιώνονται σημαντικά οι ιδιότητες του. Πιο συγκεκριμένα αυξάνεται η ηλεκτρική του αντίσταση, μειώνεται η μαγνητική του αντίσταση και βελτιώνεται η σταθερότητα των μαγνητικών του χαρακτηριστικών. Το βασικό όμως μειονέκτημα ενός τέτοιου κράματος είναι η ελάττωση της αντοχής του υλικού.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η καμπύλη μαγνήτισης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού αλλά και ο βρόχος υστέρησης που δημιουργείται λόγω μίας εναλλασσόμενης έντασης μαγνητικού πεδίου H που οδηγεί στην απομαγνήτιση του υλικού.



Σχήμα 3.4: Βρόχος Υστέρησης Σιδηρομαγνητικού Υλικού [23]

3.3 Πεδιακή Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων

3.3.1 Μαγνητοστατικά Προβλήματα

Μαγνητοστατικά ονομάζονται τα προβλήματα εκείνα στα οποία το μαγνητικό πεδίο είναι αμετάβλητο στο χρόνο. Σε αυτή την περίπτωση η ένταση του μαγνητικού πεδίου \mathbf{H} και η πυκνότητα του μαγνητικού πεδίου \mathbf{B} ικανοποιούν τις εξισώσεις Maxwell:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (3.21)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.22)$$

Τα δύο παραπάνω μεγέθη συνδέονται με την καταστατική εξίσωση

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \quad (3.23)$$

όπου μ η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού. Η διαπερατότητα έχει σχέση με το μαγνητικό πεδίο, εξαρτάται από το υλικό και μπορεί να έχει μία σταθερή τιμή, να έχει γραμμική εξάρτηση από την ένταση του μαγνητικού πεδίου \mathbf{H} ή και να έχει ακόμα μια μη γραμμική εξάρτηση από το μαγνητικό πεδίο.

Στην περίπτωση των μόνιμων μαγνητών η καταστατική εξίσωση έχει τη γενική μορφή:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M} \quad (3.24)$$

Στην περίπτωση λοιπόν που το υλικό είναι μη γραμμικό η μαγνητική διαπερατότητα μ ορίζεται ως εξής:

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \quad (3.25)$$

Για την εύρεση του μαγνητικού πεδίου απαιτείται ο υπολογισμός του διανυσματικού δυναμικού \mathbf{A} , καθώς ισχύει η σχέση:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3.26)$$

Επομένως από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει η εξής εξίσωση:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (3.27)$$

Από τις παραπάνω προκύπτει πως με την εύρεση του \mathbf{A} είναι εύκολος και ο υπολογισμός των \mathbf{B} και \mathbf{H} από παραγώγιση. Γενικά το μαγνητικό δυναμικό είναι ένα διάνυσμα τριών μεταβλητών, στις εφαρμογές των ηλεκτρικών μηχανών όμως οι δύο από τις τρεις συνιστώσες είναι 0 και μεταβάλλεται μόνο η κατακόρυφη συνιστώσα. Συνεπώς:

$$\mathbf{A} = A_z \vec{i}_z \quad (3.28)$$

Το ίδιο ισχύει και για την πυκνότητα ρεύματος:

$$\mathbf{J} = J_z \vec{i}_z \quad (3.29)$$

Ενώ για την πυκνότητα της μαγνητικής ροής η ανάλυση περιορίζεται στις δύο διαστάσεις και άρα ισχύει:

$$\mathbf{B} = B_x \vec{i}_x + B_y \vec{i}_y \quad (3.30)$$

Πιο συγκεκριμένα για ένα γραμμικό ιστροπικό μέσο υπό της προϋπόθεσή πως ισχύει η σχέση του Coulomb $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ η παραπάνω εξίσωση λαμβάνει την εξής μορφή:

$$-\frac{1}{\mu} \cdot \nabla^2 \cdot \mathbf{A} = \mathbf{J} \quad (3.31)$$

3.3.2 Οριακές Συνθήκες

Η επίλυση ενός μαγνητοστατικού ή ηλεκτροστατικού προβλήματος, ανάγεται σε επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων επομένως προκειμένου να υπάρξει μοναδική λύση πρέπει να πραγματοποιηθεί ορισμός των οριακών συνθηκών. Οι οριακές συνθήκες μπορούν να ενταχθούν σε κατηγορίες ως εξής:

- Συνθήκες Dirichlet: Σε αυτή την κατηγορία οριακής συνθήκης το μέτρο του δυναμικού \mathbf{A} επιβάλλεται σε ένα σύνορο. Συνήθως στη μελέτη του πεδίου εσωτερικά της ηλεκτρικής μηχανής εφαρμόζεται η ομογενής συνθήκη Dirichlet $A = 0$ στην εξωτερική επιφάνεια του στάτη και στην εσωτερική επιφάνεια του δρομέα, εκεί δηλαδή που ενώνεται με τον άξονα της μηχανής. Αν η μελέτη του πεδίου πραγματοποιηθεί σε ολόκληρη την μηχανή τότε η συνθήκη αυτή είναι η μόνη που χρειάζεται. Η φυσική σημασία της σε ένα μαγνητικό πρόβλημα είναι πως η μαγνητική ροή περιορίζεται εντός των ορίων της μηχανής ενώ οι γραμμές της θα είναι παράλληλες προς το σύνορο αυτό.
- Συνθήκες Neumann: Σε αυτήν την κατηγορία το μέτρο της κάθετης παραγώγου του δυναμικού \mathbf{A} σε ένα σύνορο. Στη μελέτη των ηλεκτρικών μηχανών όσον αφορά τα μαγνητικά προβλήματα η ομογενής συνθήκη Neumann $\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}} = 0$ εφαρμόζεται στην επιφάνεια επαφής με ένα εξαιρετικά διαπερατό μέταλλο, εξαναγκάζοντας τη ροή να διασχίσει την επιφάνεια υπό γωνία 90° .

- Συνθήκες Robin: Η κατηγορία αυτή είναι ουσιαστικά μία μίξη των συνθηκών τύπου Dirichlet και Neumann. Ειδικότερα διατυπώνεται μία σχέση μεταξύ του μαγνητικού δυναμικού \mathbf{A} και της κάθετης παραγώγου του σε ένα σύνορο. Μία τέτοια σχέση θα μπορούσε να είναι η ακόλουθη: $\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}} + c \cdot \mathbf{A} = 0$
- Περιοδική συνθήκη: Μία περιοδική οριακή συνθήκη συνδέει δύο όρια μεταξύ τους και στα αντίστοιχα σημεία των δύο ορίων οι τιμές του πεδίου είναι ίσες. Αυτή η συνοριακή συνθήκη επιβάλλεται στα άκρα του μαγνητοστατικού προβλήματος της μελέτης μίας ηλεκτρικής μηχανής όταν επιλύεται ένα ζεύγος πόλων αυτής.
- Αντιπεριοδική συνθήκη: Μία αντιπεριοδική οριακή συνθήκη συνδέει επίσης δύο όρια μεταξύ τους, όμως στην περίπτωση αυτή οι τιμές του πεδίου είναι αντίθετες έχουν δηλαδή ίδιο μέτρο και αντίθετο πρόσημο. Αυτή χρησιμοποιείται στα άκρα του προβλήματος όταν επιλύεται ένας πόλος μίας ηλεκτρικής μηχανής.

Στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος στον έναν πόλο του ηλεκτρικού κινητήρα που σχεδιάστηκε και βελτιστοποιήθηκε. Για τον λόγο αυτό στις εξωτερικές επιφάνειες στάτη και άξονα οι συνθήκες είναι ομογενείς Dirichlet και οι πλευρικές συνθήκες του ενός πόλου ορίζονται ως αντιπεριοδικές.

3.3.3 Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία αριθμητική μέθοδος για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται η μέθοδος αυτή διότι λόγω των γεωμετρικών σχημάτων η αναλυτική λύση των εξισώσεων που περιγράφηκαν προηγουμένως δεν είναι εφικτή. Η μέθοδος αυτή αν και προσεγγιστική μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει και το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα.

Για να εφαρμοστεί η μέθοδος αυτή ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Εισάγεται η γεωμετρία της κατασκευής, στην προκειμένη η γεωμετρία του ηλεκτρικού κινητήρα στο αντίστοιχο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων FEMM και ορίζονται οι οριακές και περιοδικές συνθήκες αλλά και τα υλικά.
- Χωρίζεται το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία δηλαδή χωρίζεται το εκάστοτε μαγνητοστατικό πρόβλημα σε επιμέρους υποπροβλήματα τα οποία μπορεί να είναι περισσότερα σε αριθμό όπως επιλύονται πιο εύκολα από ένα ενιαίο. Οι επιλύσεις των υποπροβλημάτων ενώνονται και δίνουν τη συνολική λύση του προβλήματος. Στο λογισμικό FEMM αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται με τη βοήθεια της πλεγματοποίησης, και ανήκει στην κατηγορία της προ-επεξεργασίας (pre-processing). Αφού λοιπόν ετοιμαστεί το πλέγμα επιλέγεται το είδος της επίλυσης. Η διακριτοποίηση του χώρου πραγματοποιείται με τρίγωνα στην περίπτωση διδιάστατης γεωμετρίας όπως στην παρούσα εργασία. Σε κάθε ένα από αυτά τα τρίγωνα πραγματοποιείται επίλυση ηλεκτρομαγνητικών διαφορικών εξισώσεων. Έτσι ουσιαστικά ένα φυσικό πρόβλημα μετατρέπεται σε αλγεβρικό καθώς σε κάθε τριγωνικό στοιχείο η λύση προσεγγίζεται με γραμμική παρεμβολή των τιμών του δυναμικού στις κορυφές του τριγώνου. Το πρόβλημα αυτό γραμμικής άλγεβρας σχηματίζεται με ελαχιστοποίηση του μέτρου του σφάλματος ανάμεσα στην πραγματική διαφορική εξίσωση και την προσεγγιστική.

- Όταν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση εισάγονται σε ένα πρόγραμμα που επιλύει το πρόβλημα, το οποίο ονομάζεται επιλυτής (solver). Ουσιαστικά επιλύεται το πρόβλημα γραμμικής άλγεβρας που αναλύθηκε προηγουμένως και πραγματοποιείται η εύρεση του διανυσματικού δυναμικού.
- Έπειτα όταν τελειώσει η επίλυση χρησιμοποιείται η διαδικασία μετ-επεξεργασίας (post-processing) προκειμένου ο μελετητής να δει τα αποτελέσματα και να τα επεξεργαστεί αντίστοιχα.

3.4 Προκαταρκτική Σχεδίαση

Στην ενότητα αυτή χρησιμοποιούνται όλες οι παραπάνω θεμελιώδεις σχέσεις προκειμένου να οριστούν οι πρωταρχικές γεωμετρικές διαστάσεις του κινητήρα προς σχεδίαση. Σημειώνεται πως επειδή πρόκειται για μία μηχανή με σταθερό όγκο δεν θα μεταβληθεί το ενεργό της μήκος ούτε η εξωτερική διάμετρος του στάτη. Οι τιμές των δύο αυτών τιμών υπολογίζονται στη συνέχεια αφού έχουν πρωτίστως οριστεί οι τιμές κάποιων άλλων μεγεθών. Επίσης στην συγκεκριμένη ενότητα γίνεται επιλογή για τα χαρακτηριστικά του στάτη, για το τύλιγμα που χρησιμοποιείται στον κινητήρα στην πρωταρχική του σχεδίαση αλλά και για τα χαρακτηριστικά του δρομέα.

3.4.1 Επιλογή Διαστάσεων Εξωτερικής Διαμέτρου Δρομέα και Ενεργού Μήκους Μηχανής (D, L)

Για τον υπολογισμό των διαστάσεων D, L από την Σχέση 3.15 προκύπτει η ακόλουθη σχέση που θα χρησιμοποιηθεί για την επιλογή τους:

$$D^2L = \frac{2 \cdot T_e}{\pi \cdot P_t} \quad (3.32)$$

Από την Ενότητα 3.2.1 προκύπτει πως μία αποδεκτή τιμή για την ειδική μαγνητική φόρτιση προκειμένου να υπάρχουν μικρές απώλειες σιδήρου στον στάτη είναι $\bar{B} = 0.6 \text{ T}$. Θεωρώντας και μία τυπική τιμή $\theta = 85^\circ$ [8] στην γωνία μεταξύ της εφαπτομενικής και επιφανειακής συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής και ορίζοντας ως μέγιστη ζήτηση ροπής που θα πρέπει να αναπτυχθεί στο διάκενο την τιμή $T_e = 50 \text{ N m}$ προκύπτει από τις Σχέσεις 3.14, 3.32 αντίστοιχα:

$$P_t = \frac{0.6^2 \cdot \sin(2 \cdot 85^\circ)}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 24.873 \text{ kN m}^{-2} \quad (3.33)$$

$$D^2L = \frac{2 \cdot 50}{\pi \cdot 24873} = 1279 \text{ cm}^3 \quad (3.34)$$

Από τον παραπάνω περιορισμό που προκύπτει από την Σχέση 3.34 όσον αφορά την σχέση των D, L μπορεί να γίνει οποιοσδήποτε συνδυασμός που θα τον ικανοποιεί. Πρέπει από τον συνδυασμό αυτό το τετράγωνο του D επί το L να δίνει τιμή μεγαλύτερη της τιμής του παραπάνω περιορισμού. Θεωρώ λοιπόν μετά από δοκιμές πως:

$$L = 120 \text{ mm}$$

$$D = 105 \text{ mm}$$

Η τιμή του ενεργού μήκους L διατηρείται σταθερή κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης ενώ η D μεταβάλλεται με μικρές όμως μεταβολές που βρίσκονται κοντά στην αρχική τιμή προκειμένου να μην γίνει παραβίαση του περιορισμού που υπολογίστηκε στην Σχέση 3.34. Αυτή η διάσταση που διατηρείται

Το πάχος του διακένου επιλέγεται να είναι και παραμένει σταθερό καθ όλη τη διάρκεια της μελέτης της βελτιστοποίησης, για όλους τους λόγους που καταγράφονται στην ενότητα 3.2.4:

$$l_g = 0.6 \text{ mm}$$

3.4.2 Επιλογή Χαρακτηριστικών Στάτη

Επιλογή Εξωτερικής Διαμέτρου Στάτη

Με βάση την τιμή της διαμέτρου D επιλέγω και την τιμή της εξωτερικής διαμέτρου του στάτη D_{so} η οποία και παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης. Επιλέγω η τιμή αυτή να είναι λίγο λιγότερο από το διπλάσιο της διαμέτρου του δρομέα D και άρα

$$D_{so} = 180 \text{ mm}$$

Επομένως πρόκειται για μία μηχανή με σταθερό όγκο ίσο με:

$$V_{motor} = \frac{\pi \cdot D_{so}^2 \cdot L}{4} = \frac{\pi \cdot 180^2 \cdot 120}{4} = 3053 \text{ cm}^2 \quad (3.35)$$

Συχνότητα Λειτουργίας - Πόλοι Μηχανής

Θεωρώ ως ονομαστική ταχύτητα του δρομέα τις 2000 στροφές/λεπτό (ΣΑΛ). Επομένως ο λόγος πόλων ανά ηλεκτρική συχνότητα που προκύπτει από την Σχέση 3.16 είναι:

$$P/f = 0.06$$

και άρα θεωρώ πως ένας αποδεκτός συνδυασμός είναι:

$$(P, f) = (4, 70)$$

Στην συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται μία υψηλόστροφη μηχανή επομένως είναι λογικό να επιλεχθεί μικρός αριθμός πόλων.

Επίσης υπολογίζεται η μέση ροή ανά πόλο για την ονομαστική κατάσταση λειτουργίας:

$$\Phi = \frac{\bar{B} \cdot \pi \cdot L \cdot D}{P} = \frac{0.6 \cdot \pi \cdot 120 \cdot 105}{4} = 5.94 \text{ mWb} \quad (3.36)$$

Χαρακτηριστικά Αύλακας και Τυλιγμάτων

Η ενεργός τιμή της φασικής τάσης, που είναι ικανή να αναπτύξει ο μετατροπέας PWM και θεωρώντας ένα συντελεστή διαμόρφωσης $m_a = 0.9$ και τροφοδοσία αντιστροφεία $V_{dc} = 450$ V υπολογίζεται ως εξής:

$$E_{rms} = \frac{1}{2} \cdot m_a \cdot V_{dc} \cong 200 \text{ V} \quad (3.37)$$

Επομένως υπολογίζονται οι σπείρες από την σχέση 3.3:

$$N = \frac{200}{4.44 \cdot 70 \cdot \frac{4}{2} \cdot 5.94 \cdot 10^{-3}} \cong 60 \quad (3.38)$$

Η ενεργός τιμή του ρεύματος που διαρρέει τα τυλίγματα του στάτη είναι:

$$I_{rms} = \frac{P_m}{3 \cdot E_{rms} \cos \phi} = 22.2 \text{ A} \quad (3.39)$$

Λόγω της παραπάνω τιμής επιλέγεται **AWG = 14**, καθώς η τιμή αυτή επιτρέπεται για ρεύματα από 15 A έως 25 A το οποίο δίνει διάμετρο καλωδίου τυλίγματος ίσο με [21]:

$$d_{wire} = 10^3 \cdot 0.324861 \cdot 0.0254 \cdot \exp\{-0.115942 \cdot \text{AWG}\} = 1.2909 \text{ mm} \quad (3.40)$$

Θεωρώ συντελεστή πληρότητας αύλακος ίσο με **ff = 0.55** και **J = 4 A mm⁻²**

Η διατομή αύλακος για μια φάση υπολογίζεται ως εξής:

$$A_{slot} = \frac{A_{Cu}}{ff} = \frac{N \cdot I_{rms}}{J \cdot ff} = 605 \text{ mm}^2 \quad (3.41)$$

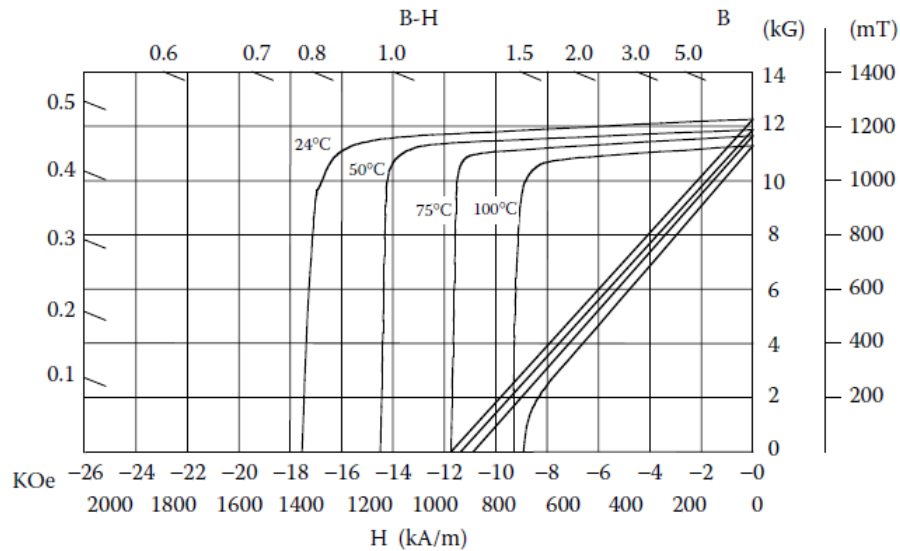
και άρα η ειδική ηλεκτρική φόρτιση που προκύπτει από την Σχέση 3.2:

Έλεγχος Ειδικής Ηλεκτρικής Φόρτισης

$$ac = \frac{3 \cdot 60 \cdot 4 \cdot 22}{\pi \cdot 105} = 48019 \frac{\text{A} \cdot \epsilon}{\text{m}} \quad (3.42)$$

3.4.3 Επιλογή Χαρακτηριστικών Δρομέα

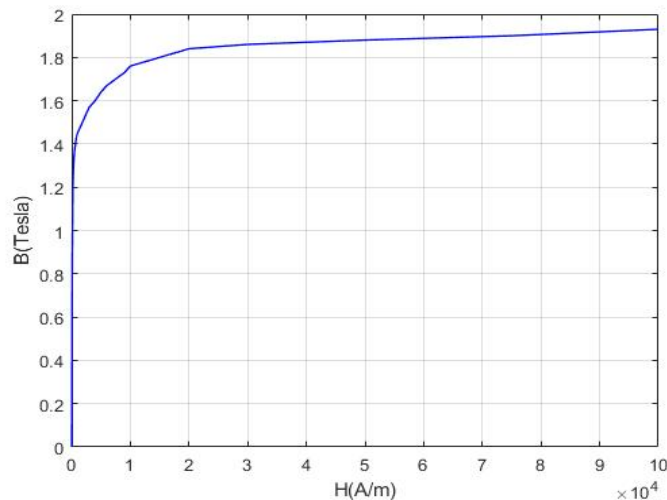
Όσον αφορά την τοπολογία του δρομέα όπως έχει ήδη αναφερθεί χρησιμοποιείται η τοπολογία $V - I$ διπλής στρώσης μαγνητών και το υλικό αυτών των μόνιμων μαγνητών είναι κράμα Νεοδυμίου - Σιδήρου - Βορίου, του οποίου οι καμπύλες απομαγνήτισης για διαφορετικές τιμές θερμοκρασιών παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5: Καμπύλη Απομαγνήτισης Μόνιμου Μαγνήτη Κράματος Νεοδυμίου - Σιδήρου - Βορίου (Nd-FeB) [13]

3.4.4 Επιλογή σιδήρου

Για τον πυρήνα του στάτη και του δρομέα επιλέγεται λαμαρίνα πάχους 0.35 mm της οποίας η καμπύλη μαγνήτισης εμφανίζεται στο Σχήμα 3.6:



Σχήμα 3.6: Καμπύλη Απομαγνήτισης Σιδήρου

3.5 Παραμετροποιημένη Σχεδίαση Μηχανής Εσωτερικών Μόνιμων Μαγνητών και Μελέτη της Πεδιακής της Ανάλυσης με Πεπερασμένα Στοιχεία

Η παραπάνω προκαταρκτική σχεδίαση αν και ιδιαίτερα σημαντική για τον προσδιορισμό προσεγγιστικά των κύριων μεγεθών του κινητήρα δεν προβλέπει επακριβώς όλα τα μεγέθη της μηχανής και επίσης δεν επιτρέπει αλλαγές πολλών μεταβλητών. Τα μεγέθη αυτά προσδιορίζονται σε αυτήν την ενότητα και δημιουργείται μία παραμετρική σχεδίαση προκειμένου να είναι εύκολη η βελτιστοποίηση των γεωμετρικών παραμέτρων.

Χρησιμοποιείται το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων FEMM του οποίου η λειτουργία εξηγήθηκε σε προηγούμενη ενότητα (Ενότητα 3.3) και μέσω της διεπαφής του με τον κώδικα που δημιουργήθηκε στο λογισμικό MATLAB δίνεται η δυνατότητα να σχεδιαστεί πληθώρα γεωμετρικών μηχανών μόνιμων μαγνητών, να αναλυθούν μέσω ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών και να δώσει αυτοματοποιημένα τα στοιχεία που χρειάζονται για την βελτιστοποίησή του.

3.5.1 Οριστική Σχεδίαση Πρώτης Μηχανής

Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Διατομής Κινητήρα

Στον παρακάτω Πίνακα 3.1 γίνεται μία επεξήγηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κινητήρα στα οποία ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τη τιμή θα πάρουν μέσω κάποιων περιορισμών και ορίων. Τα μεγέθη αυτά είναι και αυτά που όπως φαίνεται σε παρακάτω ενότητα (Κεφάλαιο 4) μεταβάλλονται εντός ορίων με τέτοιο τρόπο ώστε να βρεθεί η βέλτιστη γεωμετρία κινητήρα ως προς την απόδοση του, την ροπή και την κυμάτωση αυτής.

Επίσης στο παρακάτω Σχήμα 3.7 διακρίνονται τα γεωμετρικά αυτά μεγέθη πάνω στην μηχανή που υλοποιείται. Σημειώνεται πως σχεδιάζεται μόνο ο ένας πόλος της μηχανής, διότι οι κινητήρες με αυτήν την τοπολογία δρομέα δηλαδή πολυστρωματικός εσωτερικών μαγνητών έχουν πιο χρονοβόρα ηλεκτρομαγνητική ανάλυση λόγω των πολλών κόμβων στο πλέγμα που δημιουργείται. Η σχεδίαση ενός πόλου μπορεί να δώσει έγκυρα αποτελέσματα σε λιγότερο χρόνο εφόσον ορίζονται αντιπεριοδικές πλευρικές οριακές συνθήκες, μία δυνατότητα που δίνεται από το FEMM όπως παρουσιάζεται και στην Ενότητα 3.3.

Καθορισμός Ρεύματος και Τάσης σε κάθε Φάση Τυλίγματος

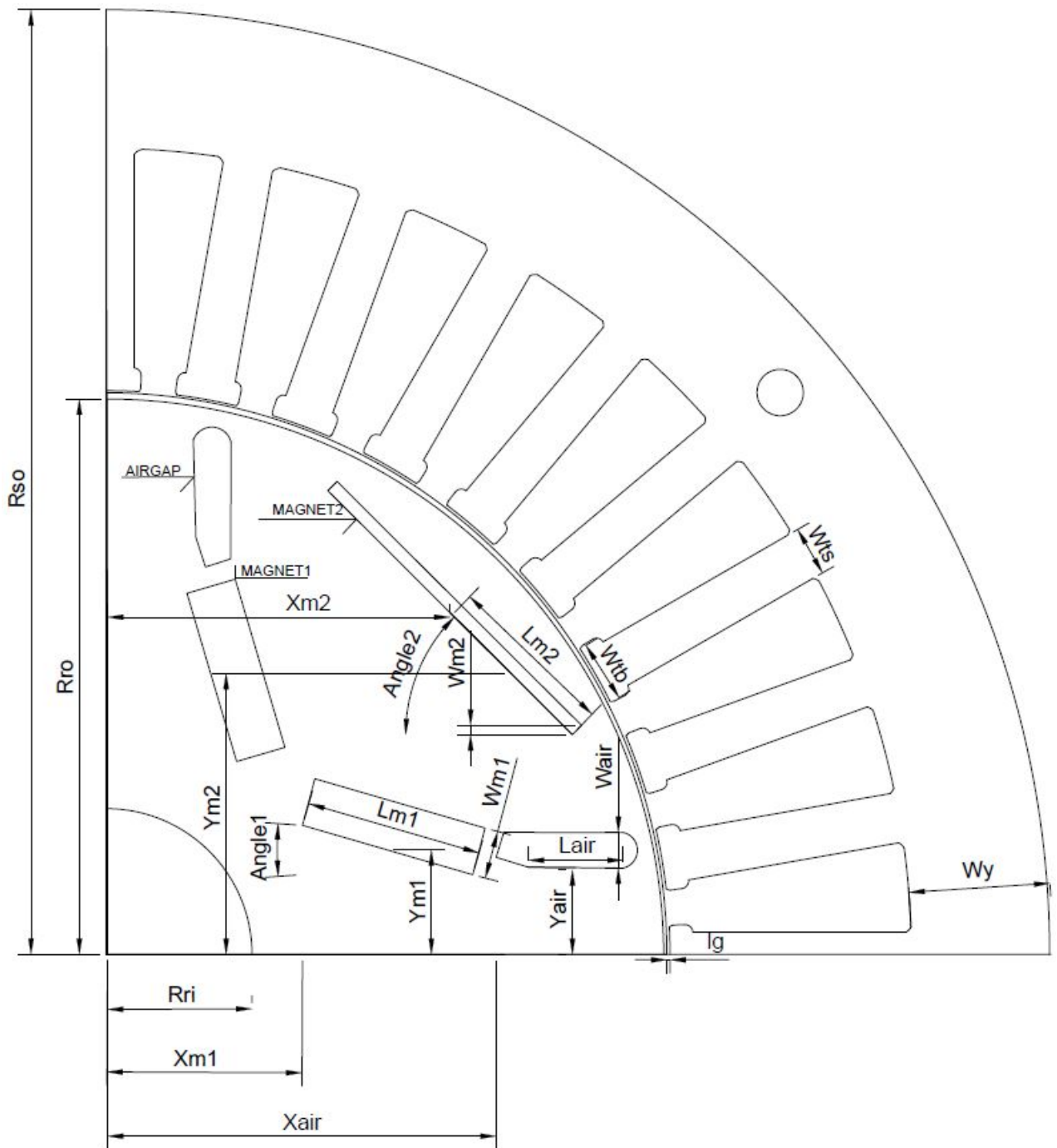
Εφόσον η διατομή της μηχανής καθορίζεται πλήρως από τα παρακάτω γεωμετρικά χαρακτηριστικά (Πίνακας 3.1, Σχήμα 3.7), ορίζεται και το ενεργό μήκος της μηχανής.

Επίσης υπολογίζεται ο αριθμός των ελιγμάτων και το ρεύμα που διέρχεται από τα τυλίγματα αυτά έχοντας πως $J = 4 \text{ A mm}^{-2}$ και $ff = 0.55$ και υπολογίζοντας το εμβαδόν της κάθε αύλακας και το εμβαδόν του καλωδίου.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό πως η τιμή του ρεύματος που υπολογίζεται είναι για τον q άξονα ενώ θεωρείται πως $I_d = 0$.

Γενικά Στοιχεία Σχεδίασης	
Poles	Αριθμός Πόλων Κινητήρα (σταθερός)
Slots	Αριθμός Αυλάκων Κινητήρα
L	Ενεργό Μήκος Κινητήρα (σταθερό)
m	Αριθμός Φάσεων (σταθερός)
q	Αριθμός Αυλάκων ανά πόλο και φάση
Lg	Πάχος Διακένου (σταθερό)
Στοιχεία Σχεδίασης Δρομέα	
Rro	Εξωτερική Ακτίνα Δρομέα
Rri	Εσωτερική Ακτίνα Δρομέα
Wm1	Πάχος Μαγνήτη 1
Lm1	Μήκος Μαγνήτη 1
Xm1	Οριζόντια Μετατόπιση Μαγνήτη 1
Ym1	Κάθετη Μετατόπιση Μαγνήτη 1
Angle1	Γωνία Στροφής Μαγνήτη 1
Wm2	Πάχος Μαγνήτη 2
Lm2	Μήκος Μαγνήτη 2
Xm2	Οριζόντια Μετατόπιση Μαγνήτη 2
Ym2	Κάθετη Μετατόπιση Μαγνήτη 2
Angle2	Γωνία Στροφής Μαγνήτη 2
Wair	Πάχος Τρύπας Αέρα
Lair	Μήκος Τρύπας Αέρα
Xair	Οριζόντια Μετατόπιση Τρύπας Αέρα
Yair	Κάθετη Μετατόπιση Τρύπας Αέρα
DirM1	Κατεύθυνση Μαγνήτισης Μαγνήτη 1
DirM2	Κατεύθυνση Μαγνήτισης Μαγνήτη 2
Στοιχεία Σχεδίασης Στάτη	
Rsi	Εσωτερική Ακτίνα Στάτη $Rro + Lg$
Rso	Εξωτερική Ακτίνα Στάτη
Wtb	Μεγάλο Πάχος Δοντιού
Wts	Μικρό Πάχος Δοντιού
Wy	Πάχος Σώματος Στάτη

Πίνακας 3.1: Μεταβλητές Σχεδίασης Διατομής Μηχανής



Σχήμα 3.7: Γεωμετρικά Μεταβλητά Μεγέθη Κινητήρα

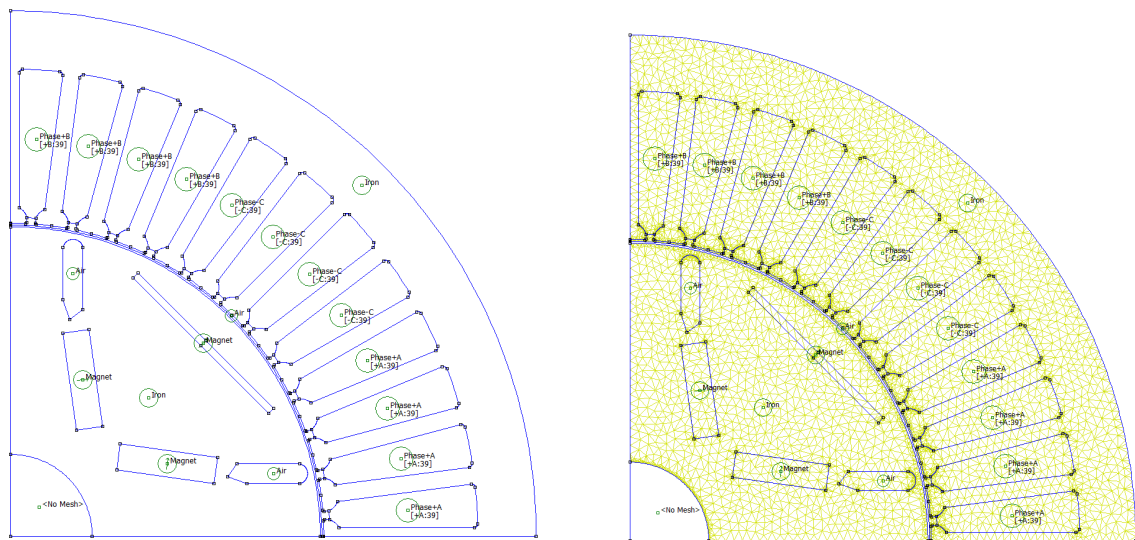
3.5.2 Πεδιακή Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων Πρώτης Μηχανής

Πλεγματοποίηση Μηχανής

Η γεωμετρία της διατομής της μηχανής (στάτης και δρομέας) εισάγεται στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων FEMM. Εκεί ορίζονται οι αντιπεριοδικές πλευρικές συνθήκες και όλα τα υλικά σε όλες τις περιοχές της μηχανής.

Έπειτα όπως αναφέρεται και σε προηγούμενη ενότητα (Ενότητα 3.3) δημιουργείται το τριγωνικό πλέγμα. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως απαιτείται το πλέγμα αυτό να είναι πιο πυκνό στο διάκενο της μηχανής καθώς εκεί υπολογίζεται η ροπή της.

Στο Σχήμα 3.8 εμφανίζεται η γεωμετρία της μηχανής έτσι όπως φαίνεται στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων FEMM και η δημιουργία του τριγωνικού πλέγματος για την επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος.



(α) Αναπαράσταση Πόλου Μηχανής στο λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων FEMM

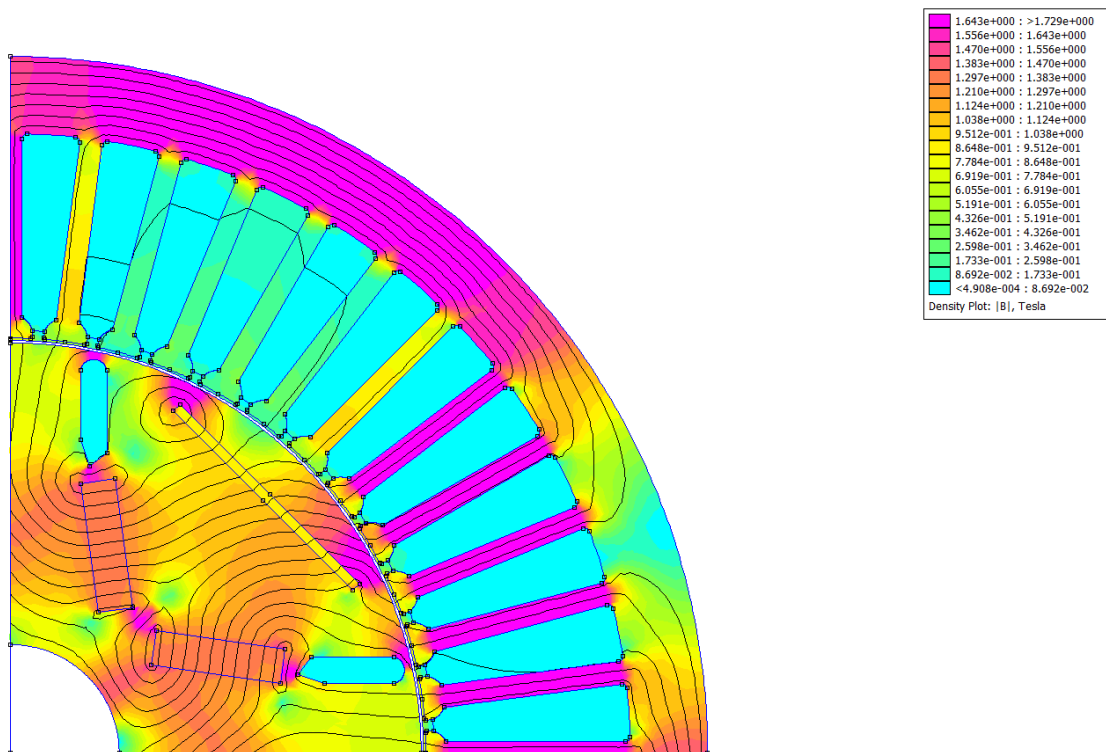
(β) Τριγωνικό Πλέγμα Πόλου Μηχανής με 13919 κόμβους στο λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων FEMM

Σχήμα 3.8: Σχεδίαση και Πλέγμα Πρωταρχικής Μηχανής στο λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων FEMM

Επίλυση Μαγνητοστατικού Προβλήματος

Ανάλογα με την λειτουργική κατάσταση που επιθυμείτε να ευρεθεί το πεδίο στη μηχανή μεταβάλλονται οι τιμές των J, γ . Η λύση που προκύπτει για την συγκεκριμένη λειτουργική κατάσταση είναι μία πλήρης αναπαράσταση του μαγνητικού πεδίου σε όλο τον χώρο. Με βάση τα αποτελέσματα μαγνητοστατικής φύσης που προκύπτουν από τη λύση αυτή και με τη βοήθεια συναρτήσεων που δημιουργήθηκαν στο λογισμικό MATLAB υπολογίζονται ορισμένα στοιχεία για την μηχανή με σκοπό την αξιολόγηση της. Τα στοιχεία αυτά υπολογίζονται αυτοματοποιημένα σε κάθε αλλαγή εντός ορίων των γεωμετρικών μεταβλητών που επεξηγούνται στον Πίνακα 3.1 παραπάνω. Τα όρια θεσμοθετούνται σε παρακάτω ενότητα στο Κεφάλαιο 4.

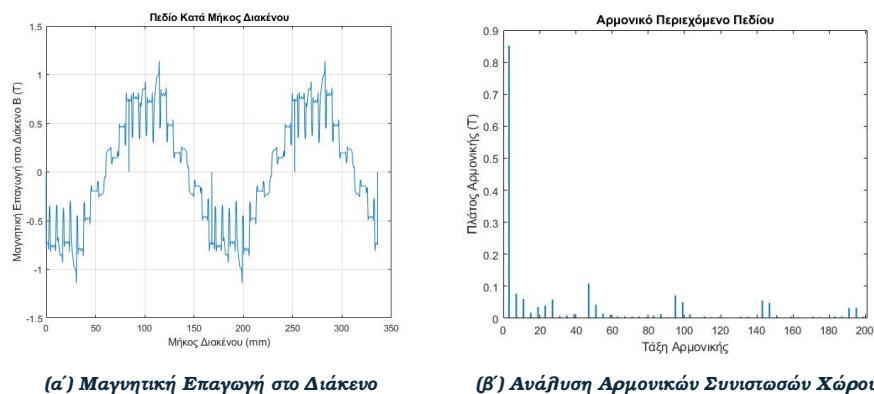
Στη συνέχεια εμφανίζεται η διατομή ενός πόλου της μηχανής στο λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων FEMM και η αναπαράσταση του μαγνητικού του πεδίου για μία συγκεκριμένη λειτουργική του κατάσταση.



Σχήμα 3.9: Αναπαράσταση Μαγνητικού Πεδίου Πόλου Μηχανής στο λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων FEMM

3.5.3 Αξιοποίηση Αποτελεσμάτων από Πεδιακή Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων

Από την πεδιακή ανάλυση που υλοποιήθηκε παραπάνω προκύπτουν κάποια ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη χρήσιμα για την διεξαγωγή στοιχείων που βοηθούν στην αξιολόγηση της μηχανής. Τα περισσότερα από αυτά τα στοιχεία για να υπολογιστούν χρειάζονται την υλοποίηση των δύο προσομοιώσεων που αναλύονται στην συνέχεια. Όμως υπάρχουν και στοιχεία τα οποία για μία συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας υπολογίζονται από το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων FEMM και αυτά είναι η γραφική της μαγνητική επαγωγής στο μήκος του διακένου και η ανάλυση των αρμονικών συνιστωσών. Οι δύο αυτές γραφικές για την πρωταρχική μηχανή που σχεδιάστηκε και επιλύθηκε παραπάνω (Σχήματα 3.8, 3.9) είναι τα ακόλουθα :



(α') Μαγνητική Επαγωγή στο Διάκενο

(β') Ανάλυση Αρμονικών Συνιστωσών Χώρου

Σχήμα 3.10: Γραφικές για την Μαγνητική Επαγωγή και τις Αρμονικές στο Διάκενο

Οι δύο προσομοιώσεις που αναφέρθηκαν για τον υπολογισμό των στοιχείων της μηχανής είναι:

- Ανάλυση με σταθερό δρομέα. Ουσιαστικά στην περίπτωση αυτή σχεδιάζεται και πραγματοποιείται η γεωμετρία μόνο κατά την πρώτη επίλυση. Στη συνέχεια όμως προσομοιώνεται μεταβολή της ηλεκτρικής γωνίας ισχύος του κινητήρα στο διάστημα ($0^\circ, 180^\circ$) μέσω ολίσθησης των ρευμάτων στάτη διατηρώντας όμως την ημιτονοειδή κατανομή των ρευμάτων των τριών φάσεων. Σε κάθε μία τέτοια μεταβολή επιλυόταν το μαγνητοστατικό πρόβλημα και υπολογιζόταν η ηλεκτρομαγνητική ροπή στο διάκενο. Επομένως από την ανάλυση αυτή προκύπτει το διάγραμμα μεταβολής της ηλεκτρομαγνητικής ροπής στο διάκενο συναρτήσει της μεταβολής της ηλεκτρικής γωνίας των ρευμάτων των τυλιγμάτων στάτη.
- Ανάλυση με σύγχρονα στρεφόμενο δρομέα Στην περίπτωση αυτή τα πεδία του στάτη και του δρομέα στρέφονται συγχρονισμένα για διάστημα μιας πλήρους ηλεκτρικής περιστροφής μέσω συγχρονισμένης ολίσθησης της φάσης των ρευμάτων του στάτη και της γωνίας στροφής του δρομέα. Επομένως, σε αντίθεση με πριν για τις ανάγκες αυτής της προσομοίωσης η γεωμετρία σχεδιάζεται και επαναπλεγματοποιείται κάθε φορά πριν την επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος. Μάλιστα, χρησιμοποιούνται σε αυτήν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την παραπάνω ανάλυση όσον αφορά την ροπή συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας των ρευμάτων του στάτη. Πιο συγκεκριμένα η γωνία στην οποία η ροπή γίνεται μέγιστη είναι και η αρχική γωνία των ρευμάτων στην ανάλυση με σύγχρονα στρεφόμενο δρομέα. Από την ανάλυση αυτή προκύπτουν υπό δεδομένη ηλεκτρική φόρτιση τα χαρακτηριστικά της απόδοσης, της επίδοσης, της κυμάτωσης ροπής, της στιγμιαίας ροπής της επαγόμενης τάσης στάτη του κινητήρα και φυσικά των απωλειών του κινητήρα που είναι και αυτές που μαζί με τη ροπή συμβάλλουν στον υπολογισμό της απόδοσης όπως φαίνεται στην συνέχεια.

Οι διαδικασίες που χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό όλων των μεγεθών που αναγράφονται κατά την επεξήγηση των δύο παραπάνω προσομοιώσεων που υλοποιήθηκαν αναλύονται εκτενώς στις επόμενες υποενότητες.

Υπολογισμός μέσης ροπής και κυμάτωσης ροπής

Ο υπολογισμός της μέσης ροπής και της κυμάτωσης είναι ιδιαίτερα σημαντικός για τον προσδιορισμό της αξιοπιστίας του κινητήρα. Σκοπός είναι η μείωση της κυμάτωσης και η ταυτόχρονη αύξηση της μέσης ροπής διότι έτσι υπάρχει καλύτερη ποιότητα ισχύος στην μηχανή χωρίς να υφίσταται καταπόνηση ο άξονας της.

Για τον υπολογισμό των στοιχείων αυτών είναι αναγκαία η υλοποίηση και των δύο παραπάνω προσομοιώσεων. Από την πρώτη, δηλαδή από την ανάλυση σταθερού δρομέα υπολογίζεται η αρχική γωνία των ρευμάτων στάτη όπου δηλαδή η ροπή είναι μέγιστη. Έπειτα μέσω της δεύτερης ανάλυσης με σύγχρονη περιστροφή δρομέα μπορεί να υπολογιστεί η στιγμιαία ροπή στο διάκενο για κάθε βήμα. Η τιμή αυτή αποθηκεύεται για κάθε βήμα και εν συνεχεία υπολογίζεται η μέση ροπή για μία ηλεκτρική περίοδο, καθώς και η κυμάτωση της από την παρακάτω σχέση:

$$T_r = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{mean}} \quad (3.43)$$

Είναι λογικό πως όσο μικρότερο το βήμα τόσο πιο ακριβής αλλά και χρονοβόρος ο υπολογισμός. Είθισται να χρησιμοποιείται βήμα 1°.

Υπολογισμός πεπλεγμένης ροής και επαγόμενης τάσης τυμπάνου

Για τον υπολογισμό της πεπλεγμένης ροής και της επαγόμενης τάσης τυμπάνου ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Εντοπίζονται και επιλέγονται όλες εκείνες οι επιφάνειες που περιέχουν το τύλιγμα της φάσης A στον έναν πόλο.
- Λαμβάνεται το ολοκλήρωμα του διανυσματικού δυναμικού A στην συνολική επιφάνεια που επιλέχθηκε.
- Λαμβάνεται και το αντίστοιχο ολοκλήρωμα των επιφανειών που περιέχουν το τύλιγμα της φάσης -A.
- Υπολογίζεται το εμβαδόν των στρώσεων που επιλέχθηκαν για την κάθε φάση ενός πόλου S_{total} και υπολογίζεται το εμβαδόν για κάθε αύλακα από την σχέση $S_{slot} = \frac{S_{total}}{q}$.
- Υπολογισμός μαγνητικής ροής της κάθε σπείρας του πηνίου της φάσης A ενός από την σχέση:

$$\Psi_m = \left(\frac{\int A_+}{S_{slot}} - \frac{\int A_-}{S_{slot}} \right) \quad (3.44)$$

- Υπολογισμός της συνολική μαγνητικής ροής που διαπερνά όλο το τύλιγμα της φάσης A είναι:

$$\Lambda_A = \frac{P}{2} \cdot N \cdot \Psi_m \quad (3.45)$$

- Η αντί-ΗΕΔ προκύπτει πως είναι:

$$E = -\frac{d\Lambda}{dt} = -\frac{\Lambda_i - \Lambda_{i-1}}{dt} \quad (3.46)$$

όπου το χρονικό βήμα dt αντιστοιχεί στο βήμα μίας ηλεκτρικής μοίρας.

Υπολογισμός Απωλειών Χαλκού

Οι απώλειες χαλκού οφείλονται κυρίως στις ωμικές απώλειες στα τυλίγματα του στάτη. Για τον υπολογισμό τους γίνεται χρήση του εξής τύπου:

$$P_{cu} = 3 \cdot R_{phase} \cdot I^2 \quad (3.47)$$

Επομένως για τον υπολογισμό τους απαιτείται ο υπολογισμός της τιμής του ρεύματος στάτη:

$$I = \frac{J \cdot \tilde{f} \cdot A_{slot}}{N_i} \quad (3.48)$$

όπου N_i : ι αριθμός ελιγμάτων ανά αύλακα.

Επιπλέον απαιτείται ο υπολογισμός της τιμής της αντίστασης τυλιγμάτων στάτη ανά φάση R_{phase} . Για τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιείται η εξής σχέση:

$$R_{phase} = \frac{N \cdot Q}{m} \cdot r_{cu} \cdot \frac{l_{turn}}{A_{cu}} \quad (3.49)$$

όπου

- N : αριθμός περιελίξεων τυλιγμάτων
- Q : συνολικός αριθμός αυλάκων μηχανής
- r_{cu} : ειδική αντίσταση σε θερμοκρασία θ
- l_{turn} : μήκος της κάθε σπείρας
- A_{cu} : $A_{cu} = \frac{A_{slot} \cdot f}{N}$

Επίσης για τον υπολογισμό των παραπάνω απαιτείται πρωτίστως ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης σε θερμοκρασία θ αλλά και το μήκος της κάθε σπείρας.

Όσον αφορά την ειδική αντίσταση είναι γνωστό πως η ειδική αντίσταση του χαλκού για θερμοκρασία περιβάλλοντος ($\theta = 20^\circ C$) είναι ίση με $r_{cu,20} = 1.75 \mu\Omega \cdot cm$ και πως ο συντελεστής θερμοκρασιακής μεταβολής αντίστασης του χαλκού είναι $a = 3.9 \cdot 10^{-3}$. Επομένως η ειδική αντίσταση για μία θερμοκρασία (θ) είναι:

$$r_{cu} = r_{cu,20} \cdot [1 + a \cdot (\theta - 20^\circ)] \quad (3.50)$$

Όσον αφορά τώρα τον υπολογισμό του μέσου μήκους μίας σπείρας του τυλίγματος λαμβάνονται υπόψιν το ενεργό μήκος L μίας μηχανής αλλά και το W_{ts} που είναι ουσιαστικά η απόσταση από το γεωμετρικό μέσο της μίας αύλακας έως το γεωμετρικό μέσο της γειτονικής αύλακας. Επίσης λαμβάνεται υπόψιν ένας συντελεστής προσαύξησης του μέσου μήκους μίας σπείρας olf που μία τυπική τιμή για αυτόν είναι $olf = 1.2$. Άρα το μέσο μήκος μίας σπείρας δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$l_{turn} = olf \cdot (2L + 2W_{ts}) \quad (3.51)$$

Παρόλο που ο χαλκός εμφανίζει σχετικά μικρή αντίσταση αγωγής, οι απώλειες χαλκού αποτελούν το κυριότερο μέρος απωλειών των ηλεκτρικών μηχανών λόγω των υψηλών τιμών των ρευμάτων. Όταν έχουμε εναλλασσόμενο ρεύμα τα πράγματα είναι λίγο διαφορετικά καθώς εμφανίζονται δύο φαινόμενα που μεταβάλλουν την τιμή της αντίστασης και την πυκνότητα ρεύματος [21].

Φαινόμενο Εγγύτητας (proximity losses) - Επιδερμικό Φαινόμενο

Το φαινόμενο εγγύτητας αναφέρεται στην αναδιανομή του ρεύματος, το οποίο οφείλεται στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται εξαιτίας των ρευμάτων που ρέουν σε γειτονικούς αγωγούς. Όταν το ρεύμα δύο αγωγών ρέει προς την ίδια κατεύθυνση, τότε η πυκνότητα ρεύματος είναι μεγαλύτερη στις πλευρές των αγωγών που γειτονεύουν. Το αντίθετο ισχύει για αντίρροπα ρεύματα. Το φαινόμενο αυτό αυξάνει με τη συχνότητα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αντίσταση του αγωγού και να μειώνεται η αυτεπαγωγή του. Το επιδερμικό φαινόμενο αναφέρεται στην αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος κοντά στην επιφάνεια του αγωγού. Αυτό οφείλεται στο εναλλασσόμενο μαγνητικό

πεδίο το οποίο δημιουργεί δινορρεύματα στο εσωτερικό των αγωγών. Αυτά τα δινορρεύματα αντιτίθενται στη ροή του ρεύματος στο εσωτερικό του αγωγού, αφού έχουν αντίθετη κατεύθυνση, ενώ προστίθενται στο εξωτερικό του αγωγού. Αυξανόμενης της συχνότητας, έχουμε και πάλι αύξηση της αντίστασης των αγωγών και μείωση της επαγωγής. Το φαινόμενο αυτό δεν είναι τόσο αισθητό στα τυλίγματα του στάτη, όπου οι αγωγοί έχουν έτσι και αλλιώς μικρή διατομή, όσο στο δρομέα. Για μερικές μηχανές, οι απώλειες λόγω φαινόμενης εγγύτητας μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τις απώλειες χαλκού. Σε προβλήματα AC μια περιοχή με σύρματα μπορεί να αντικατασταθεί από μια ομογενοποιημένη περιοχή με μια πολύπλοκη διαπερατότητα. Το φανταστικό μέρος της διαπερατότητας συνδέεται με τις απώλειες. Παρόλο που οι απώλειες μπορούν να υπολογιστούν σε ένα πολύ ευρύ φάσμα συχνοτήτων και συντελεστών πληρότητας, η κατάσταση που είναι πιθανότερο να συναντηθεί στις τυπικές εφαρμογές κινητήρα είναι η περίπτωση περιορισμού χαμηλής συχνότητας. Στην περίπτωση χαμηλής συχνότητας, η απώλεια έχει πολύ πιο απλή μορφή. Η απώλεια εγγύτητας ανά μονάδα όγκου, P_{prox} , είναι:

$$P_{prox} = C_{prox} \cdot \omega^2 B^2 \quad (3.52)$$

όπου C_{prox} είναι ένας συντελεστής απωλειών φαινομένου εγγύτητας που υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$C_{prox} = ff \cdot (\rho_i^2 / 8) \cdot \sigma_{wire} \cdot d_{wire}^2 \quad (3.53)$$

όπου τα σ_{wire} , d_{wire} είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα και διάμετρος των καλωδίων αντίστοιχα.

Συχνά για τον περιορισμό των παραπάνω απωλειών χρησιμοποιείται το καλώδιο Litz όπου είναι ένας τύπος πολύκλωνου καλωδίου η καλωδίου που χρησιμοποιείται για να μεταφέρει εναλλασσόμενο ρεύμα. Αποτελείται από πολλά λεπτά σύρματα μεμονωμένα μονωμένα και υφασμένα μαζί. Το αποτέλεσμα που προσφέρει αυτή η μορφή καλωδίων είναι πως εξισορροπεί την αναλογία του συνολικού μήκους κατά την οποία κάθε έλικας είναι στο εξωτερικό του αγωγού, στοιχείο που οδηγεί στην διανομή του ρεύματος εξίσου μεταξύ των συρματόσχοινων μειώνοντας την αντίσταση. Όμως στην συγκεκριμένη εφαρμογή για λόγους απλότητας χρησιμοποιείται απλό τύλιγμα και όχι πολύκλωνο.

Υπολογισμός Απωλειών Πυρήνα

Στον υπολογισμό αυτόν λαμβάνονται υπόψιν και φαινόμενα αρμονικών χώρου, εκτός της θεμελιώδους συχνότητας λειτουργίας μέσω υπέρθεσης των απωλειών διαφόρων συχνοτήτων, στοιχείο που οδηγεί σε μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογισμών. Συγκεκριμένα από την ανάλυση αρμονικών συνιστωσών χώρου που υλοποιήθηκε στο Σχήμα 3.10β' προκύπτει πως η θεμελιώδης αρμονική στην περίπτωση αυτή είναι η 3η και από αυτή ξεκινάει ο υπολογισμός των απωλειών. Ο τύπος που υπολογίζει τις απώλειες πυρήνα είναι ο εξής:

$$P_{FE} = \left(\sum_{m=1}^{\infty} C_h \cdot B_m \cdot m \cdot \omega_r^2 + C_e \cdot B_m^2 \cdot m \cdot \omega_r^2 \right) \cdot V_{FE} \quad (3.54)$$

όπου $C_h = 143$ και $C_e = 0.53$ ($W/(m^3 \cdot T^2 \cdot Hz)$) είναι οι συντελεστές απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων, αντίστοιχα, για μαγνητική λαμαρίνα πάχους $0.35mm^2$, B_m είναι το πλάτος της μαγνητικής επαγωγής της m τάξης αρμονικής, ω_m είναι η ταχύτητα του δρομέα σε Hz και V_{FE} ο όγκος του σιδηρομαγνητικού υλικού της μηχανής.

Η υλοποίηση του παραπάνω γίνεται ως εξής. Στην ανάλυση με σύγχρονο δρομέα σε κάθε μαγνητοστατική επίλυση αποθηκεύεται η τιμή της μαγνητικής επαγωγής και κάθε τριγωνικό στοιχείο του πλέγματος. Οι πληροφορίες για την αρχική θέση και την τιμή της επιφάνειας των στοιχείων αποθηκεύονται στην πρώτη επανάληψη. Επιπλέον, τα στοιχεία που ανήκουν στον δρομέα στρέφονται μαζί με το δρομέα, έτσι ώστε να υπολογίζεται η επαγωγή για τα ίδια σημεία του δρομέα, σε κάθε επανάληψη. Οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής που λαμβάνονται σε κάθε βήμα θα πρέπει επίσης να στρέφονται, έτσι ώστε να βρίσκονται στο επίπεδο αναφοράς του δρομέα. Αφού ολοκληρωθεί μια πλήρης ηλεκτρική περιστροφή του κινητήρα και επομένως υπολογιστεί η τιμή της μαγνητικής επαγωγής σε κάθε στοιχείο του αρχικού πλέγματος για κάθε βήμα, στην συνέχεια αφού ληφθούν μέσω ανάλυσης *fourier* τα πλάτη της μαγνητικής επαγωγής για κάθε συχνότητα σε κάθε σημείο μπορούν να υπολογιστούν οι απώλειες σιδήρου εφαρμόζοντας την Εξίσωση 3.54

Υπολογισμός Απωλειών Μόνιμων Μαγνητών

Στη μέθοδο για τον υπολογισμό των απωλειών των Μόνιμων Μαγνητών, αγνοείται το πεδίο αντίδρασης των δινορρευμάτων και η πυκνότητα ρεύματος J_m στην διατομή του μαγνήτη είναι:

$$J_m = -\sigma_m \frac{dA}{dt} + J_c \quad (3.55)$$

όπου J_c είναι μια πυκνότητα ρεύματος περιορισμού που επιλέγεται για να κάνει το συνολικό ρεύμα στην εγκάρσια διατομή του κάθε μαγνήτη να είναι ίσο με το μηδέν και σ_m είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού μόνιμου μαγνήτη. Η απώλεια λαμβάνεται στη συνέχεια με την ενσωμάτωση του J_c^2 / σ_m πάνω από τον όγκο κάθε μαγνήτη.

Όπως έγινε λοιπόν και στις απώλειες πυρήνα υπολογίζονται οι απώλειες σε κάθε αρμονική και αθροίζονται όλες μαζί για να υπολογιστεί η συνολική τιμή απωλειών που οφείλεται στους μόνιμους μαγνήτες. [7]

Υπολογισμός Απόδοσης Μηχανής

Έπειτα από τον υπολογισμό όλων των συνιστωσών απωλειών με βάση τις προαναφερθείσες διαδικασίες, η απόδοση του κινητήρα δίνεται από την σχέση:

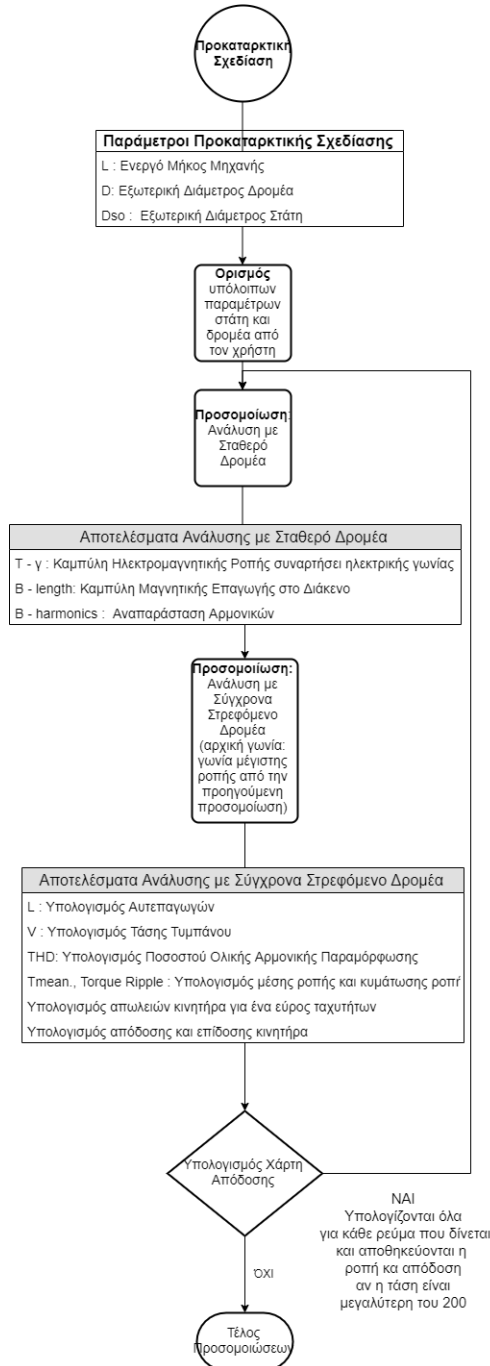
$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{T_m \cdot \omega_m}{T_m \cdot \omega_m + P_{losses}} \quad (3.56)$$

Επίσης οι συνολικές απώλειες του κινητήρα P_{losses} είναι:

$$P_{losses} = P_{cu} + P_{Fe} + P_{mag} + P_{prox} \quad (3.57)$$

3.5.4 Υλοποίηση Κώδικα για Σχεδίαση Κινητήρα και Υπολογισμό Στοιχείων Αξιολόγησης Μηχανής

Το διάγραμμα ροής του παραμετροποιημένου κώδικα, ο οποίος υλοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού MATLAB παρουσιάζεται στη συνέχεια.



Σχήμα 3.11: Διάγραμμα Ροής Κώδικα Υλοποίησης και Αξιολόγησης Μηχανής

Κεφάλαιο 4

Διαδικασία Βελτιστοποίησης Γεωμετρίας

4.1 Εισαγωγή

Αφού προηγηθεί η ανάπτυξη ενός παραμετρικού μοντέλου σχεδίασης της ηλεκτρικής μηχανής, το οποίο και περιγράφει ικανοποιητικά την λειτουργία της σκοπός της παρούσας διπλωματικής εκτός από την σχεδίαση της μηχανής είναι και η σχεδίαση μίας βελτιστοποιημένης γεωμετρίας της. Επομένως στο παρών κεφάλαιο γίνεται μία εκτενής παρουσίαση των αρχών βελτιστοποίησης και των αλγορίθμων βελτιστοποίησης με έμφαση σε αυτούς που χρησιμοποιούνται εν τέλη στην εργασία αυτή. Τέλος, γίνεται μία παρουσίαση της διαδικασίας βελτιστοποίησης που ακολουθείται στην παρούσα διπλωματική.

4.2 Αρχές Βελτιστοποίησης

Σύμφωνα με τον Pierre (1984):

Ένα σύστημα είναι βέλτιστο ως προς ένα δεδομένο μέτρο επίδοσης και ένα δεδομένο σύνολο περιορισμών, εφόσον λειτουργεί/αποδίδει τουλάχιστον ίσα αν όχι καλύτερα από κάθε άλλο σύστημα που ικανοποιεί τους ίδιους περιορισμούς.

Στην ενότητα αυτή γίνεται μια εκτενής αναφορά και παρουσίαση βασικών εννοιών αλλά και αρχών που διέπουν την διαδικασία της βελτιστοποίησης. Η βελτιστοποίηση ως έννοια αποτελεί την εύρεση εναλλακτικών λύσεων του ίδιου προβλήματος που δίνουν καλύτερα αποτελέσματα από τις υπόλοιπες. Συγκεκριμένα, η επίλυση ενός προβλήματος έγκειται σε ένα πλήθος εναλλακτικών επιλογών – αποφάσεων (decisions), καθεμία από τις οποίες δίνει διαφορετικά αποτελέσματα – αποτιμήσεις (evaluation). Ορίζοντας μια ομάδα αποφάσεων αυτή μπορεί να είναι η βέλτιστη απόφαση αν μεγιστοποιεί την επίδοση του προβλήματος. [15] [23]

4.2.1 Η έννοια του συστήματος

Η έννοια του συστήματος (*system*) είναι θεμελιώδης για την διατύπωση του ορισμού της βελτιστοποίησης σε πραγματικά προβλήματα προς επίλυση. Ως σύστημα ορίζεται

ένα σύνολο ανεξάρτητων μεταξύ τους στοιχείων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Το σύστημα απαρτίζεται από τα εξής στοιχεία του που το χαρακτηρίζουν:

- **Σύνολο:** Ορίζει αν το εκάστοτε σημείο ανήκει στο σύστημα ή στο περιβάλλον του.
- **Αλληλεπιδράσεις:** Οι αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον του ορίζουν τα στοιχεία εισόδου και εξόδου του συστήματος προς μελέτη. Είσοδος (*input*) του συστήματος αποτελεί κάθε σύνολο δράσεων που προέρχονται από το εξωτερικό περιβάλλον του συστήματος και επιφέρουν μεταβολές στην κατάσταση του. Ενώ έξοδος (*output* ή *response*) του συστήματος καλείται κάθε αντίδραση που παράγεται από το σύστημα και γίνεται αντιληπτή από το περιβάλλον.
- **Μεταβλητές Κατάστασης:** Αποτελούν εσωτερικές ιδιότητες του συστήματος και περιγράφουν το τρέχον καθεστώς του συστήματος ανάλογα με τις αντίστοιχες εισόδους του.

4.2.2 Ακρότατα

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται πως για την εύρεση του βέλτιστου συνόλου αποφάσεων που ικανοποιούν τους περιορισμούς που δίνονται από το πρόβλημα απαιτείται η εύρεση της ακρότατης τιμής της επίδοσης του συστήματος ανάλογα με τις εισόδους του. Το σύστημα στην προκειμένη θεωρείται ως μία συνάρτηση $f(x)$ ορισμένη στο $D \subseteq \mathbb{R}^n$ η οποία παρουσιάζει ελάχιστο στο σημείο $x^* \in D$ όταν υπάρχει $D_0 \subset D$ του x^* τέτοιο ώστε για κάθε $x \in D_0$ να ισχύει:

$$f(x^*) \leq f(x) \quad (4.1)$$

Το τοπικό μέγιστο ορίζεται αντίστοιχα. Για την εύρεση του ολικού ακρότατου ισχύει πως είναι το μέγιστο ή το ελάχιστο από τα υπόλοιπα τοπικά μέγιστα ή ελάχιστα αντίστοιχα.

4.2.3 Βελτιστοποίηση πραγματικών συναρτήσεων

Έστω η συνάρτηση $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ μία πραγματική συνάρτηση ορισμένη στο πεδίο $D \subseteq \mathbb{R}^n$ και $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ το διάνυσμα των ανεξάρτητων μεταβλητών της συνάρτησης. Το μέτρο f καλείται συνάρτηση κόστους, ενώ οι συνιστώσες του x ονομάζονται μεταβλητές απόφασης και είναι οι παράμετροι του συστήματος βελτιστοποίησης.

Το πεδίο ορισμού στην προκειμένη περίπτωση είναι το πεδίο D και σηματοδοτεί την περιοχή ή τον χώρο αναζήτησης από όπου λαμβάνει τιμές το διάνυσμα x . Τα αποτελέσματα της συνάρτησης ανήκουν στο πεδίο τιμών της και προβάλλονται στον χώρο αποτίμησης ή αντικειμενικό χώρο F .

Έστω πως $P = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ το βαθμωτό μέτρο της επίδοσης του συστήματος, το οποίο υποδεικνύει την τιμή ενός κριτηρίου του συστήματος για τις τιμές μεταβλητών εισόδου. Επομένως αναζητούνται οι τιμές εκείνες που ικανοποιούν την ακόλουθη συνθήκη αν πρόκειται για ελαχιστοποίηση κριτηρίου.

$$\min P = f(x), x \in D \quad (4.2)$$

Στο σημείο αυτό σημειώνεται πως αν πρόκειται για μεγιστοποίηση κριτηρίου μετατρέπεται η συνάρτηση κόστους σε: $f(x) = -f(x)$ ή $f(x) = \frac{1}{f(x)}$ [15] [23]

Πεδίο Ορισμού και Πεδίο Τιμών

Ουσιαστικά με τα πεδία ορισμού και τιμών που αναφέρονται και στην προηγούμενη υποενότητα περιορίζονται οι τιμές εισόδου και εξόδου εντός κάποιων ορίων με βάση κάποιους περιορισμούς του προβλήματος. Με τους περιορισμούς αυτούς όμως είναι δυνατόν σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης το βέλτιστο αποτέλεσμα να βρίσκεται εκτός των ορίων που έχουν θεσμοθετηθεί και έτσι να αποκλείεται από το πεδίο D . Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στους υπολογισμούς και μεγαλύτερο πλήθος δοκιμών με σκοπό την εύρεση του καλύτερου δυνατού. Για να αποφευχθεί η πολυπλοκότητα προτιμάται στους χώρους αναζήτησης η κυρτότητα καθώς κάθε γραμμικός συνδυασμός μεταξύ των σημείων, εγγυάται τη γέννηση νέων σημείων εντός του χώρου αναζήτησης, οπότε την σίγουρη παραγωγή εφικτών λύσεων. Η κυρτότητα έχει μεγάλη σημασία και στο πεδίο τιμών. Όταν μία μη γραμμική συνάρτηση είναι κυρτή, η επιφάνεια απόκρισης περιλαμβάνει ένα και μόνο ακρότατο, που αντιστοιχεί στην ολικώς βέλτιστη λύση.

4.2.4 Μονοκριτηριακή Βελτιστοποίηση

Ο βασικός στόχος της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης είναι να βρει την καλύτερη λύση που αντιστοιχεί είτε στην ελάχιστη είτε στην μέγιστη τιμή μιας εξίσωσης με ένα κριτήριο - αντικείμενο προς βελτιστοποίηση. Σκοπός κάθε βελτιστοποίησης είναι η διατύπωση του προβλήματος δηλαδή ο ορισμός της συνάρτησης στόχου και των περιορισμών και τέλος ο εντοπισμός μονοσήμαντης λύσης του προβλήματος. Εδώ ουσιαστικά έγκειται και το πρόβλημα της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης το οποίο είναι πως είναι χρήσιμη ώστε να παρέχει πληροφορίες για τη φύση του προβλήματος, όμως συνήθως δεν μπορεί να παρέχει ένα σύνολο από εναλλακτικές λύσεις που ανταλλάσσουν διαφορετικούς στόχους ο ένας εναντίον του άλλου.

Με βάση τα παραπάνω, αλλά και ακολουθώντας πιο πιστά την νοοτροπία του μηχανικού που πρέπει να λαμβάνει υπόψη του ταυτόχρονα πολλαπλά κριτήρια για να καταλήξει σε ένα τελικό αποτέλεσμα, καταλήγουμε στη χρήση πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. [15] [23]

4.2.5 Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση

Ουσιαστικά στην περίπτωση της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης ορίζεται αντίστοιχα με προηγουμένως μία συνάρτηση κόστους που είναι η εξής:

$$f(x) = P = (P_1, P_2, \dots, P_m)^T \quad (4.3)$$

με την $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))^T$ συνάρτηση - διάνυσμα ορισμένη στο $D \subseteq \mathbb{R}^n$ και $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ το διάνυσμα των ανεξάρτητων μεταβλητών. Τα κριτήρια για την βελτιστοποίηση είναι οι συνιστώσες του P με καθεμία από τις f να δηλώνει το σύνολο των εφικτών τιμών των επιμέρους συναρτήσεων. Στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση που είναι και η επιθυμητή για την παρούσα εργασία αφού πρέπει να ελεγχθούν διάφορα αντικρουόμενα κριτήρια δεν υπάρχει μονοσήμαντα βέλτιστη ορισμένη λύση.

Όμως μία είναι η μηχανή που πρέπει να προταθεί ως καλύτερη με βάση τα κριτήρια που θα οριστούν και για να πραγματοποιηθεί αυτό χρησιμοποιείται η έννοια των βέλτιστων κατά Pareto. Για να γίνουν αντιληπτοί οι όροι σημείο, σύνολο και μέτωπο Pareto ορίζονται τα εξής:

Ένα εφικτό σημείο x^ είναι βέλτιστο, εφόσον δεν υπάρχει άλλο εφικτό σημείο $x \in D$, ούτως ώστε $f(x) \leq f(x^*)$, δηλαδή δεν υπάρχει εφικτό σημείο που να κυριαρχεί επί του x^* .*

Το σημείο $x^ \in D$ είναι βέλτιστο αν και μόνο αν δεν υπάρχει εφικτό σημείο $x \in D$, το οποίο να μπορεί να βελτιώσει κάποιο κριτήριο f_i , χωρίς ταυτόχρονα να χειροτερέψει ένα άλλο κριτήριο f_j .*

Οι παραπάνω λύσεις που είναι τα βέλτιστα κατά Pareto είναι πολλαπλές τιμές εφικτών σημείων $x^ \in D$ το σύνολο των οποίων X^* καλείται σύνολο Pareto*

Η προβολή των κριτηρίων $f(x^)$ στο πεδίο αποτίμησης αντικατοπτρίζει το μέτωπο Pareto*

Παρά την χρήση του Pareto για την εξάλειψη της υποκειμενικότητας, αυτή συνεχίζει να υπάρχει καθώς η επιλογή των κριτηρίων έγκειται κατά κύριο λόγο στον σχεδιαστή της μηχανής. Επομένως αν και είναι αντικειμενικός ο τρόπος με τον οποίο επιλέγονται τα επιμέρους βέλτιστα δεν είναι αντικειμενικός ο τρόπος με τον οποίο επιλέγεται η τελική βέλτιστη σχεδίαση κινητήρα. Για την τελική επιλογή όπως φαίνεται και στη συνέχεια που παρουσιάζονται τα αποτελέσματα χρησιμοποιείται το διάγραμμα Taguchi προκειμένου να βρεθεί το κατά Pareto βέλτιστο σημείο με βάση τα κριτήρια του προβλήματος. [15] [23] [16]

4.3 Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης

Προκειμένου να υλοποιηθεί η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της μηχανής απαιτείται η χρήση κάποιων αλγορίθμων με βάση των οποίων θα αλλάζουν οι είσοδοι του μοντέλου βελτιστοποίησης προκειμένου να βρεθεί εκείνη η βέλτιστη γεωμετρία που να ικανοποιεί τα πρωταρχικά κριτήρια. Ορισμένοι από τους αλγορίθμους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν παρουσιάζονται στην συνέχεια.

4.3.1 Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms GA)

Οι αλγόριθμοι αυτοί είναι αλγόριθμοι επίλυσης προβλημάτων που βασίζονται στις αρχές της Βιολογικής Εξέλιξης. Είναι χρήσιμοι κυρίως σε προβλήματα που περιέχουν πολλές παραμέτρους και δεν υπάρχει αναλυτική μέθοδος που να μπορεί να βρει τον βέλτιστο συνδυασμό τιμών για τις μεταβλητές ώστε το υπό εξέταση σύστημα να αντιδρά με όσο το δυνατόν με το επιθυμητό τρόπο.

Στο σημείο αυτό αξίζει να γίνει αναφορά στην ορολογία που χρησιμοποιείται στους αλγορίθμους αυτούς η οποία είναι δανεισμένη από τον χώρο της γενετικής. Αναφερόμαστε σε **άτομα** μέσα σε ένα **πληθυσμό**. Τα άτομα αυτά πολλές φορές ονομάζονται **χρωμοσώματα**. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από διάφορα στοιχεία που ονομάζονται γονίδια. Κάθε γονίδιο επηρεάζει την **κληρονομικότητα** ενός η περισσότερων χαρακτηριστικών, είναι δηλαδή συνδεδεμένη με μία παράμετρο της λύσης.

Η λειτουργία ενός γενετικού αλγορίθμου είναι η ακόλουθη:

- Δημιουργούν έναν πληθυσμό κωδικοποιημένων πιθανών λύσεων
- Υπολογίζουν την αντικειμενική συνάρτηση για κάθε άτομο (λύση) του δημιουργούμενου πληθυσμού (fitness evaluation - επίδοση)
- Εξελίσσουν τον πληθυσμό εφαρμόζοντας γενετικές διαδικασίες που επηρεάζονται από την επίδοση :
 - Διαδικασίες επιλογής
 - Διαδικασίες διασταύρωσης, που εκφράζουν τη δημιουργία πληθυσμού με συνδυασμό χαρακτηριστικών (μεταβλητών απόφασης) των άλλων μελών του
 - Διαδικασίες μετάλλαξης, οι οποίες μετατρέπουν τα χαρακτηριστικά του (τις μεταβλητές απόφασής του)
- Δημιουργούν νέο πληθυσμό που αντικαθιστά τον προηγούμενο με βάση την επίδοση.

Για να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία των γενετικών αλγορίθμων περιγράφονται οι διαδικασίες επιλογής, διασταύρωσης και μετάλλαξης.

Για την διαδικασία επιλογής χρησιμοποιούνται διάφοροι τρόποι οι οποίοι είναι :

- Επιλογή Τροχός Ρουλέτας: Πρόκειται για εικονικό τροχό με πλήθος εγκοπών ίσο με τον αριθμό του πληθυσμού, ενώ το πλάτος τους είναι ανάλογο της ικανότητας επιβίωσης των στοιχείων
- Επιλογή "Τουρνουά" η Διαγωνισμού: Στην περίπτωση αυτή επιλέγονται τυχαία άτομα από τον πληθυσμό και το χρωμόσωμα με την μεγαλύτερη τιμή κόστους (επίλεκτος), αντιγράφεται σε ένα άλλο βοηθητικό σύνολο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου υπάρξει κατάληξη στον τελικό πληθυσμό.
- Επιλογή Ελιτισμού: Στην συγκεκριμένη επιλογή η τρέχουσα βέλτιστη λύση αντιγράφεται στην δεξαμενή ζευγαρώματος ώστε σε καμία περίπτωση να μην μπορεί να χαθεί ακόμα και αν πρόκειται για στοχαστική διεργασία.
- Επιλογή Βαθμολόγησης: Σε αυτή τη μέθοδο, θέλοντας να αποφευχθεί η πρόωμη σύγκλιση μειώνεται η πίεση της επιλογής όταν η διασπορά της συνάρτησης κόστους είναι πολύ μεγάλη, ενώ όταν είναι μικρή αυξάνεται.
- Σταθερής κατάστασης: Σε αυτή την περίπτωση, μόνο λίγα, τα πιο αδύναμα μέλη του πληθυσμού αντικαθίστανται σε κάθε επανάληψη, με τα "παιδιά" των πιο ισχυρών μελών του πληθυσμού

Ο τελεστής διασταύρωσης δέχεται σαν όρισμα τα χρωμοσώματα γονείς και παράγει τα χρωμοσώματα παιδιά. Η επίδραση της διασταύρωσης είναι ότι διαμορφώνει εκ νέου τα γονίδια με στόχο την δημιουργία καλύτερων χρωμοσωμάτων. Η διασταύρωση που αντιπροσωπεύει την επανασύνδεση αποτελεί τον πιο σημαντικό από τους τελεστές των γενετικών αλγορίθμων. Έχει παρατηρηθεί ότι οι τιμές της πιθανότητας από 0.6 έως 0.8 έχουν τα καλύτερα αποτελέσματα. Για την διαδικασία διασταύρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθένας από τις παρακάτω μεθόδους :

- Διασταύρωση ενός σημείου: Τα χαρακτηριστικά των γονιών ανταλλάσσονται και από ένα σημείο και μετά μεταφέρονται στα παιδιά.
- Αριθμητική Διασταύρωση: Στην περίπτωση αυτή, το γενετικό υλικό των δύο γονιών προκύπτει από μία αριθμητική σχέση, ώστε να δώσει τα τελικά γενετικά χα-

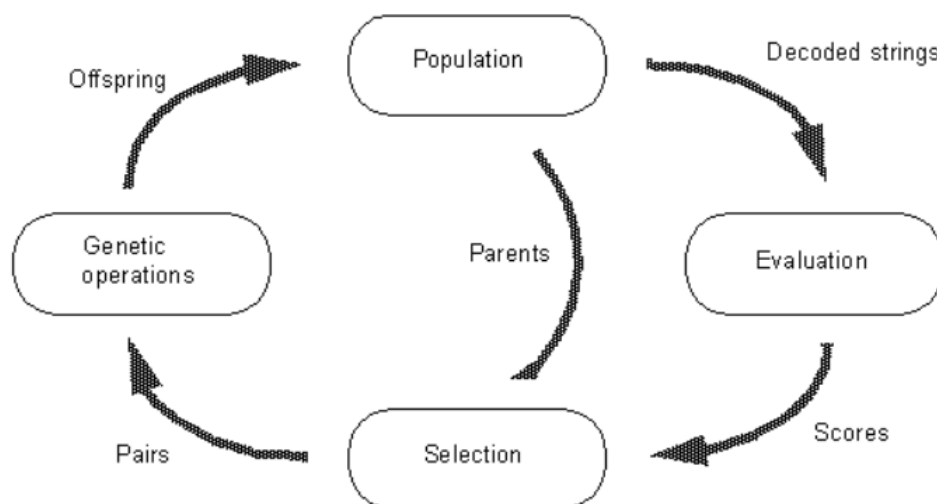
ρακτηριστικά των απογόνων. Τα συστήματα που χρησιμοποιούν την μέθοδο αυτή παρουσιάζουν γρηγορότερη σύγκλιση και είναι αρκετά σταθερά με χαμηλότερη τυπική απόκλιση.

- Ευριστική Διαμόρφωση: Ο τελεστής αυτός είναι μοναδικός καθώς χρησιμοποιεί τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης για να καθορίσει την κατεύθυνση της αναζήτησης, ενώ μπορεί να παράγει έναν μόνο απόγονο ή κανένα
- Διασταύρωση δέντρου: Ο τελεστής διασταύρωσης δέντρου επιλέγει δύο υποδέντρα από τα δύο δένδρα-γονείς και τα ανταλλάσσει δημιουργώντας δύο νέους απογόνους. Η επιλογή των δέντρων γίνεται στοχαστικά.

Στον υπόλοιπο πληθυσμό, εφαρμόζεται ένας τελεστής μετάλλαξης, που τροποποιεί κατά ένα μικρό ποσοστό τα χαρακτηριστικά της νέας γενιάς. Ο κύριος λόγος για τον οποίο ενσωματώνεται στον κώδικα η περίπτωση των μεταλλάξεων είναι η διασφάλιση ότι δεν θα κολλήσει ο αλγόριθμος σε τοπικά ακρότατα. Όμως μεγάλη τιμή στον τελεστή μετάλλαξης, επιβραδύνει δραματικά τη σύγκλιση. Για την διαδικασία μετάλλαξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθένας από τις παρακάτω μεθόδους:

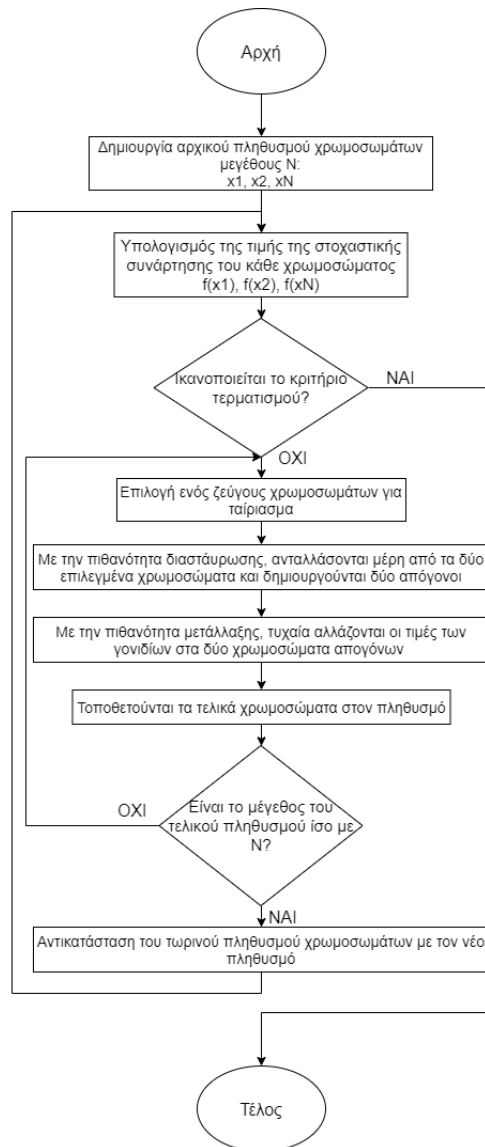
- Ομοιόμορφη μετάλλαξη: Αντικατάσταση χαρακτηριστικού με μία τιμή μεταξύ των ορίων του.
- Οριοθετημένη μετάλλαξη: Αντικατάσταση γενετικού χαρακτηριστικού με μία από τις τιμές των ορίων του.
- Ανομοιόμορφη μετάλλαξη: Η πιθανότητα της μη εμφάνισης μετάλλαξης αυξάνεται όσο προχωρούν οι επαναλήψεις, χρησιμοποιώντας έναν μη ομοιόμορφο συντελεστή μετάλλαξης.

Ο βασικός εξελικτικός κύκλος εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.1: Ο εξελικτικός κύκλος ενός γενετικού αλγορίθμου

Το διάγραμμα ροής που δείχνει την λειτουργία ενός τέτοιου αλγορίθμου είναι το ακόλουθο:



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα Ροής Γενετικών Αλγορίθμων

Ένας γενετικός αλγόριθμος που είναι χρήσιμος στην παρούσα διπλωματική είναι ο *NSGA – II* (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II) ο οποίος χρησιμοποιείται σε πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, δηλαδή σε συστήματα που πρέπει δύο η περισσότερα στοιχεία να βελτιστοποιηθούν.

4.3.2 Μέθοδος Προσομοιωμένη Ανόπτυση (Simulated - Annealing SA)

Πρόκειται για μία πιθανοτική τεχνική για την προσέγγιση της συνολικής βέλτιστης συνάρτησης μιας δεδομένης συνάρτησης. Συγκεκριμένα, είναι μεταχειριστικό να προσεγγίσουμε την παγκόσμια βελτιστοποίηση σε ένα μεγάλο χώρο αναζήτησης για ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Συχνά χρησιμοποιείται όταν ο χώρος αναζήτησης είναι διακριτός. Για προβλήματα όπου η εύρεση ενός κατά προσέγγιση σφαιρικού βέλτιστου

είναι πιο σημαντική από την εύρεση ενός ακριβούς τοπικού βέλτιστου σε ένα σταθερό χρονικό διάστημα, η Προσομοιωμένη Ανόπτωση (Simulated - Annealing SA) μπορεί να είναι προτιμότερη από εναλλακτικές λύσεις. Επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρεθεί μια προσέγγιση ενός παγκόσμιου ελαχίστου για μια συνάρτηση με πολλές μεταβλητές.

Πιο συγκεκριμένα η λειτουργία ενός τέτοιου αλγορίθμου είναι η ακόλουθη: Σε κάθε βήμα, ο αλγόριθμος επιλέγει τυχαία μια λύση κοντά στην τρέχουσα, μετρά την ποιότητά του και στη συνέχεια αποφασίζει να κινηθεί προς αυτήν ή να παραμείνει με την τρέχουσα λύση με βάση είτε μία από τις δύο πιθανότητες μεταξύ των οποίων επιλέγει είτε με το γεγονός ότι η νέα λύση είναι καλύτερη ή χειρότερη από την τρέχουσα. Σε κάθε βήμα, η πιθανότητα μετακίνησης σε μια καλύτερη νέα λύση είτε διατηρείται σε 1 είτε αλλάζει προς θετική τιμή. από την άλλη πλευρά, η πιθανότητα μετάβασης σε μια χειρότερη νέα λύση μεταβάλλεται προοδευτικά προς το μηδέν. Η προσομοίωση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με μια λύση κινητικών εξισώσεων για τις λειτουργίες πυκνότητας είτε με τη χρήση της μεθόδου στοχαστικής δειγματοληψίας.

“Η μέθοδος αυτή μοιάζει αρκετά με τη διαδικασία που ακολουθείται από τους γενετικούς αλγορίθμους όμως μεταξύ τους υπάρχει μία σημαντική διαφορά. Σε γενικές γραμμές, και τα δύο έχουν καλές ικανότητες αναζήτησης, ωστόσο, υπάρχει μια κύρια διαφορά μεταξύ τους. Ο SA είναι ένας μοναδικός αλγόριθμος βασισμένος σε λύσεις, ενώ ο GA είναι ένας αλγόριθμος με βάση τον πληθυσμό. Αυτό σημαίνει ότι ο πρώτος αρχίζει με μία μόνο λύση και προσπαθεί να την ενισχύσει, ενώ ο δεύτερος έχει πολλές λύσεις - ή ίσως εκατοντάδες λύσεις που βασίζονται στο μέγεθος του πληθυσμού. Με άλλα λόγια, η SA έχει μόνο (Εκμετάλλευση), ενώ η GA έχει και τα δύο (Εξερεύνηση και Εκμετάλλευση). Από την παραπάνω εξήγηση, και οι δύο αυτοί αλγόριθμοι εξαρτώνται από τη φύση του προβλήματος. Εάν το πρόβλημα έχει μόνο μία βέλτιστη λύση, τότε και τα δύο μπορούν να εφαρμοστούν. Εάν το πρόβλημα έχει περισσότερες από μία βέλτιστες λύσεις, ο γενετικός θα βρει καλύτερες λύσεις. Επειδή σε προβλήματα πολλαπλών μοντέλων όπως στο συγκεκριμένο, αναζητούμε και τις δύο δυνατότητες αναζήτησης (Εξερεύνηση και Εκμετάλλευση) επομένως όπως θα παρουσιαστεί και στη συνέχεια είναι λογικό να προτιμούνται οι γενετικοί αλγόριθμοι.

4.3.3 Μέθοδος Nelder-Mead (NMS)

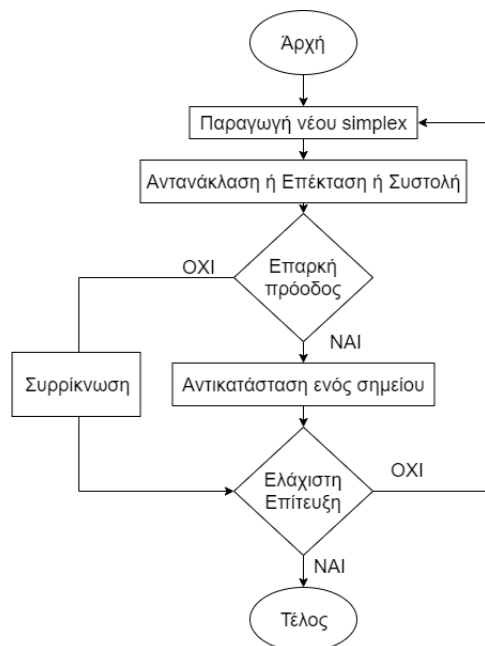
Η μέθοδος Nelder-Mead είναι μια συνήθως εφαρμοζόμενη αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την εύρεση της ελάχιστης ή μέγιστης αντικειμενικής συνάρτησης σε έναν πολυδιάστατο χώρο. Πρόκειται για μια μέθοδο άμεσης αναζήτησης (βασισμένη στη σύγκριση λειτουργιών) και εφαρμόζεται συχνά σε μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης για τα οποία τα παράγωγα ενδέχεται να μην είναι γνωστά. Ωστόσο, η τεχνική Nelder-Mead είναι μια ευρετική μέθοδος αναζήτησης που μπορεί να συγκλίνει σε μη στάσιμα σημεία.

Η μέθοδος αυτή λειτουργεί ως εξής:

Χρησιμοποιεί την έννοια ενός ειδικού γεωμετρικού αντικειμένου (simplex) $n + 1$ κορυφών σε n διαστάσεις. Παραδείγματα απλών στοιχείων περιλαμβάνουν ένα τμήμα γραμμής σε μια γραμμή, ένα τρίγωνο σε ένα επίπεδο, ένα τετράεδρο σε τρισδιάστατο χώρο και ούτω καθεξής. Η μέθοδος προσεγγίζει ένα τοπικό βέλτιστο πρόβλημα με n μεταβλητές όταν η αντικειμενική συνάρτηση ποικίλει ομαλά και είναι μονόδρομη. [10]

Πιο συγκεκριμένα η μέθοδος αυτή σε διαστάσεις n διατηρεί ένα σύνολο $n + 1$ σημείων δοκιμής διατεταγμένα με βάση ένα γεωμετρικό αντικείμενο όπως προαναφέρθηκε. Συμπληρώνει στη συνέχεια την συμπεριφορά της αντικειμενικής συνάρτησης που μετράται σε κάθε σημείο δοκιμής προκειμένου να βρεθεί ένα νέο σημείο δοκιμής και να αντικατασταθεί ένα από τα παλαιά με αυτό και έτσι η τεχνική εξελίσσεται. Η απλούστερη προσέγγιση είναι να αντικαταστήσουμε το χειρότερο σημείο με ένα σημείο που αντανάκλαται μέσω του κεντροειδούς των υπόλοιπων σημείων n . Εάν αυτό το νέο σημείο είναι καλύτερο από το καλύτερο τρέχον σημείο, τότε εκτείνεται εκθετικά έξω κατά μήκος αυτής της γραμμής. Από την άλλη πλευρά, εάν αυτό το νέο σημείο δεν είναι πολύ καλύτερο από την προηγούμενη τιμή, τότε βγαίνουμε σε μια κοιλάδα, έτσι συρρικνώνουμε το γεωμετρικό αντικείμενο προς ένα καλύτερο σημείο.

Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου Nelder-Mead δίνεται στην παρακάτω εικόνα :



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα Ροής Nelder-Mead Αλγορίθμου

Η παρακάτω μεθοδολογία προσεγγίζει αρκετά τον αλγόριθμο Nelder-Mead.

Έστω η συνάρτηση $f(\mathbf{x})$ όπου $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$. Τα τρέχον σημεία εξέτασης - δοκιμής είναι (test points) $\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{n+1}$

- **Ταξινόμηση (Order)** σύμφωνα με τις τιμές στις κορυφές:

$$f(\mathbf{x}_1) \leq f(\mathbf{x}_2) \leq \dots \leq f(\mathbf{x}_{n+1})$$

Ελέγχεται αν η μέθοδος πρέπει να σταματήσει.

- **Υπολογισμός (Calculate) \mathbf{x}_0** , το κέντρο όλων των σημείων εκτός του \mathbf{x}_{n+1}
- **Αντανάκλαση (Reflection)**. Υπολογίζεται το ανακλώμενο σημείο ως εξής:

$$\mathbf{x}_r = \mathbf{x}_0 + a(\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_{n+1})$$

Εάν το ανακλώμενο σημείο είναι καλύτερο από το δεύτερο χειρότερο, αλλά όχι καλύτερο από το καλύτερο, δηλαδή:

$$f(\mathbf{x}_1) \leq f(\mathbf{x}_r) \leq f(\mathbf{x}_n)$$

τότε δημιουργείται ένα νέο γεωμετρικό αντικείμενο αντικαθιστώντας το χειρότερο σημείο \mathbf{x}_{n+1} με το ανακλώμενο \mathbf{x}_r και επαναλαμβάνεται το βήμα 1.

- **Επέκταση (Expansion).** Αν το ανακλώμενο σημείο είναι το καλύτερο σημείο μέχρι στιγμής,

$$f(\mathbf{x}_r) < f(\mathbf{x}_1)$$

τότε υπολογίζεται το διευρυμένο σημείο με $\gamma > 1$

$$\mathbf{x}_e = \mathbf{x}_0 + \gamma(\mathbf{x}_r - \mathbf{x}_0)$$

Αν το διευρυμένο σημείο είναι καλύτερο από το ανακλώμενο σημείο, τότε αποκτάτε ένα νέο γεωμετρικό αντικείμενο αντικαθιστώντας το χειρότερο σημείο \mathbf{x}_{n+1} με το διευρυμένο σημείο \mathbf{x}_e και επαναλαμβάνεται το βήμα 1. αλλιώς αποκτάτε ένα νέο γεωμετρικό αντικείμενο αντικαθιστώντας το χειρότερο σημείο \mathbf{x}_{n+1} με το ανακλώμενο σημείο \mathbf{x}_r και επαναλαμβάνεται στο βήμα 1.

- **Συστολή (Contraction).** Εδώ είναι σίγουρο πια πως:

$$f(\mathbf{x}_r) \geq f(\mathbf{x}_n)$$

Υπολογίζεται λοιπόν το σημείο συστολής με $0 < \rho \leq 0.5$ ως εξής:

$$\mathbf{x}_c = \mathbf{x}_0 + \rho(\mathbf{x}_{n+1} - \mathbf{x}_0)$$

Αν το σημείο συστολής είναι καλύτερο από το χειρότερο σημείο, δηλαδή:

$$f(\mathbf{x}_c) < f(\mathbf{x}_{n+1})$$

τότε δημιουργείτε μία νέα γεωμετρία αντικαθιστώντας το χειρότερο σημείο \mathbf{x}_{n+1} με το \mathbf{x}_c και επαναλαμβάνεται το βήμα 1

- **Μάζεμα (Shrink).** Αντικαθίστανται όλοι οι πόντοι εκτός από τον καλύτερο \mathbf{x}_1 με τα εξής:

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_1 + \sigma(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_1)$$

και επανάλαβε το βήμα 1.

Για τον τερματισμό της παραπάνω επαναληπτικής διαδικασίας απαιτούνται κριτήρια. Οι Nelder και Mead χρησιμοποίησαν την τυπική απόκλιση του δείγματος των τιμών λειτουργίας της τρέχουσας γεωμετρίας. Αν αυτά πέσουν κάτω από κάποια ανοχή, τότε ο κύκλος σταματά και το χαμηλότερο σημείο στο simplex επιστρέφει ως προτεινόμενο βέλτιστο. Σημειώστε ότι μια πολύ "επίπεδη" συνάρτηση μπορεί να έχει σχεδόν ίσες τιμές λειτουργίας σε ένα μεγάλο πεδίο, έτσι ώστε η λύση να είναι ευαίσθητη στην ανοχή. Τα προγράμματα τερματίζονται, όταν οι επαναλήψεις ενδέχεται να συγκλίνουν. [10]

4.3.4 Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Partical Swarm Optimization PSO)

Είναι μία υπολογιστική μέθοδος που βελτιστοποιεί ένα πρόβλημα με την επανειλημμένη προσπάθεια βελτίωσης μίας υποψήφιας λύσης σε σχέση με ένα δεδομένο μέτρο ποιότητας. Λύει ένα πρόβλημα με το να έχει πληθυσμό υποψήφιας λύσεων, εδώ μεταγλωττισμένα σωματίδια και μετακίνηση αυτών των σωματιδίων γύρω από τον χώρο

αναζήτησης σύμφωνα με απλούς μαθηματικούς τύπους πάνω από τη θέση και την ταχύτητα του σωματιδίου. Η κίνηση κάθε σωματιδίου επηρεάζεται από την τοπική πιο γνωστή του θέση, αλλά οδηγείται επίσης προς τις πιο γνωστές θέσεις στον χώρο αναζήτησης, οι οποίες ενημερώνονται καθώς οι καλύτερες θέσεις εντοπίζονται από άλλα σωματίδια. Αυτό αναμένεται να μετακινήσει το σμήνος προς τις καλύτερες λύσεις. Είναι μεταχειριστικό, δεδομένου ότι κάνει ελάχιστες ή καθόλου υποθέσεις σχετικά με το πρόβλημα που έχει βελτιστοποιηθεί και μπορεί να αναζητήσει πολύ μεγάλους χώρους υποψήφιας λύσεων. Ωστόσο, ένας τέτοιου είδους αλγόριθμος δεν εγγυάται την βέλτιστη λύση. Επίσης, δεν χρησιμοποιεί τη διαβάθμιση του προβλήματος που έχει βελτιστοποιηθεί, πράγμα που σημαίνει ότι δεν απαιτεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης να είναι διαφορίσιμο.

4.3.5 Υβριδικός Αλγόριθμος SHERPA του Heeds

Ο υβριδικός αυτός αλγόριθμος χρησιμοποιείται στο λογισμικό πρόγραμμα βελτιστοποίησης Heeds και η λειτουργία του επεξηγείται εν συνεχεία.

Κατά τη διάρκεια μιας μόνο αναζήτησης, το SHERPA χρησιμοποιεί ταυτόχρονα πολλαπλές μεθόδους αναζήτησης (όχι διαδοχικά) κάποιες από τις οποίες περιγράφονται στις προηγούμενες υποενότητες. Αυτή η προσέγγιση εκμεταλλεύεται τα καλύτερα χαρακτηριστικά κάθε μεθόδου και μειώνει τη συμμετοχή της μεθόδου στην αναζήτηση εάν ή όταν αποφασισθεί να είναι αναποτελεσματική.

Χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός μεθόδων παγκόσμιας (global) και τοπικής (local) αναζήτησης, με τον αριθμό των διαφορετικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται ανά πάσα στιγμή να κυμαίνονται από δύο έως δέκα. Κάθε μέθοδος περιλαμβάνει παραμέτρους συντονισμού που τροποποιούνται αυτόματα κατά την αναζήτηση σύμφωνα με τις γνώσεις που αποκτώνται σχετικά με τη φύση του χώρου σχεδιασμού. Αυτή η εξελισσόμενη γνώση σχετικά με το χώρο σχεδιασμού καθορίζει επίσης πότε και σε ποιο βαθμό χρησιμοποιείται κάθε μέθοδος. Με άλλα λόγια, η SHERPA μαθαίνει αποτελεσματικά τον χώρο του σχεδιασμού και προσαρμόζεται έτσι ώστε να αναζητά αποτελεσματικά όλα τα είδη χώρων σχεδιασμού, ακόμη και πολύ περίπλοκα. Φυσικά, δεν υπάρχει κανένας ισχυρισμός ότι αυτή η προσέγγιση είναι καλύτερη για όλα τα προβλήματα από κάποια άλλη προσέγγιση ή ότι θα βρει πάντα μια βέλτιστη λύση σε παγκόσμιο επίπεδο, αλλά έχει αποδειχθεί ότι λειτουργεί πολύ αποτελεσματικά και αποτελεσματικά για πολλά πρακτικά προβλήματα σχεδιασμού μηχανικής.

4.4 Διαδικασία Βελτιστοποίησης Γεωμετρίας Κινητήρα

Επιλέγεται για την βελτιστοποίηση η χρήση του λογισμικού HEEDS μέσω του οποίου υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης διαφόρων αλγορίθμων βελτιστοποίησης μεταξύ των οποίων είναι και οι αλγόριθμοι που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Το λογισμικό αυτό αλληλεπιδρά με τον κώδικα που έχει υλοποιηθεί για την σχεδίαση και παρουσίαση των χαρακτηριστικών του κινητήρα στην MATLAB ως εξής:

- Ορίζεται στο Heeds ως κώδικας αλληλεπίδρασης εισόδου και εξόδου αυτός που υλοποιήθηκε στην MATLAB όπως υποδεικνύεται στο προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 3)

- Δημιουργούνται στο Heeds οι "παράμετροι (parameters)" οι οποίες μεταβάλλονται εντός ορίων που επίσης ορίζονται μέσα στο πρόγραμμα αυτό. Έπειτα οι παράμετροι αυτοί αντιστοιχίζονται ως ετικέτες με τις αντίστοιχες του κώδικα που έχει υλοποιηθεί στην MATLAB.
- Έπειτα δημιουργούνται οι "απαντήσεις (responses)" που αντιστοιχίζονται ως ετικέτες με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον κώδικα της MATLAB.
- Αφού λοιπόν οριστούν πλήρως οι είσοδοι και οι έξοδοι του συστήματος προς βελτιστοποίηση δημιουργείται μία "εργασία (Study)" στην οποία ορίζονται τα αντικείμενα προς βελτιστοποίηση (αύξηση η μείωση της τιμής τους), οι περιορισμοί σε κάποιες "απαντήσεις (responses)" που κρίνεται απαραίτητο αλλά και ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στην βελτιστοποίηση και ορίζονται τα χαρακτηριστικά του αλγορίθμου από τον χρήστη (πόσες επαναλήψεις, πληθυσμός, γενιές, σταθερές τιμές κλπ).

4.4.1 Μεταβλητοί Ανεξάρτητοι Παράμετροι Βελτιστοποίησης

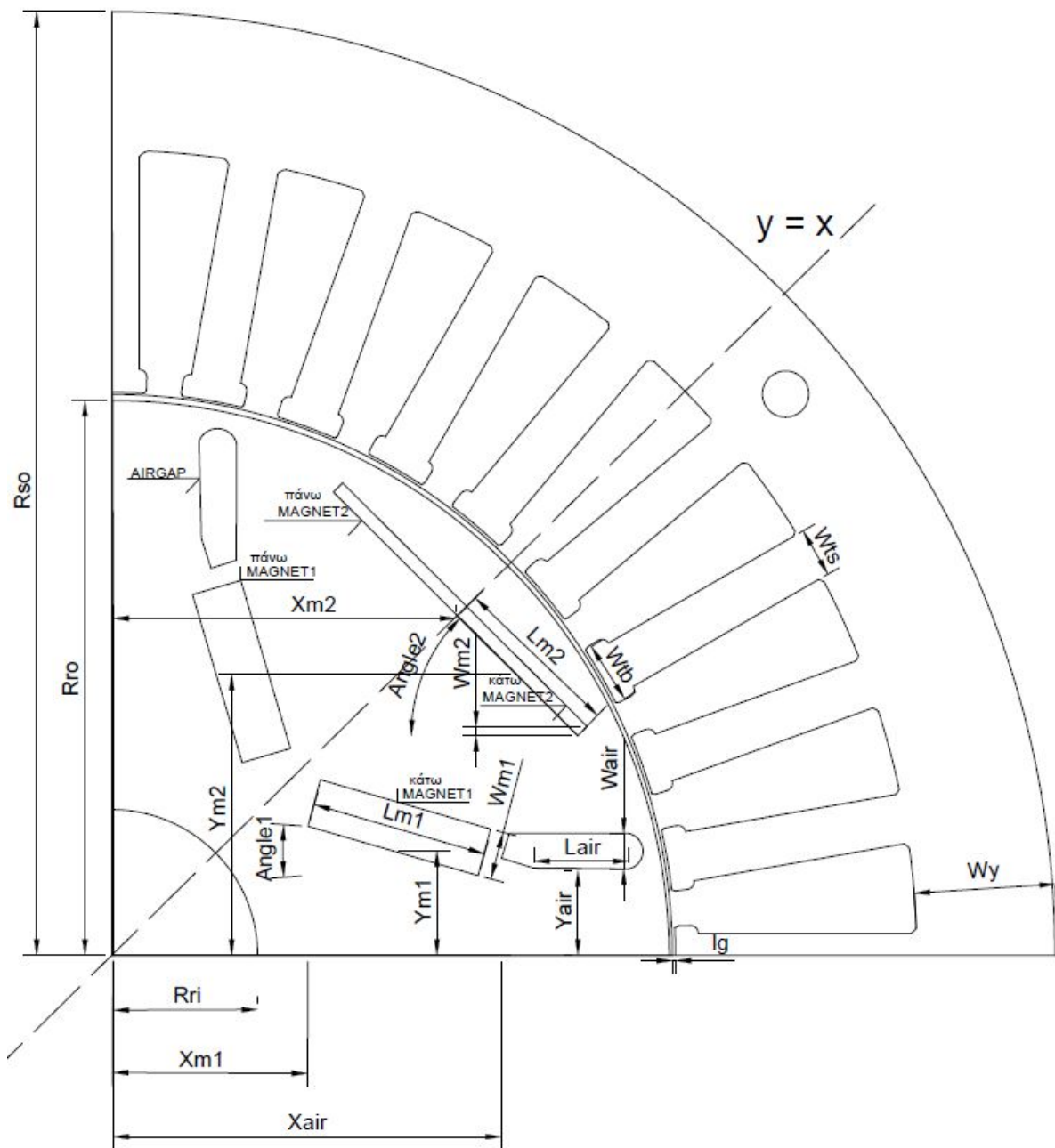
Οι κατά κύριο λόγο γεωμετρικοί παράμετροι του κινητήρα που μεταβάλλονται καθώς και τα όρια της μεταβολής τους προκειμένου να βελτιστοποιηθούν τα χαρακτηριστικά του είναι οι ακόλουθοι (Πίνακας 4.1) και η φυσική του σημασία φαίνεται στο Σχήμα 4.4.

Γενικά Στοιχεία Σχεδίασης					
Όνομα Παραμέτρου	Φυσική Σημασία Παραμέτρου	Είδος Μεταβολής Παραμέτρου	Τιμές Παραμέτρου	Τιμή Εκκίνησης	
Slots	Αριθμός Αυλάκων Κινητήρα	Διακριτή Μεταβολή	[12, 24, 36, 48, 56]	48	
AWG	American Wire Gauge (Εξίσωση 3.40)	Διακριτή Μεταβολή	[8, 10, 12, 14, 16, 18]	14	
Στοιχεία Σχεδίασης Δρομέα					
Όνομα Παραμέτρου	Φυσική Σημασία Παραμέτρου	Είδος Μεταβολής Παραμέτρου	Ελάχιστη Τιμή	Τιμή Εκκίνησης	Μέγιστη Τιμή
Rro	Εξωτερική Ακτίνα Δρομέα	Συνεχής Μεταβολή	50	53	60
Rri	Εσωτερική Ακτίνα Δρομέα	Συνεχής Μεταβολή	10	14	20
Wm1	Πάχος Μαγνήτη 1	Συνεχής Μεταβολή	3	4.5	8
Lm1	Μήκος Μαγνήτη 1	Συνεχής Μεταβολή	10	16.8	20
Xm1	Οριζόντια Μετατόπιση Μαγνήτη 1	Συνεχής Μεταβολή	15	18	20
Ym1	Κάθετη Μετατόπιση Μαγνήτη 1	Συνεχής Μεταβολή	8	9	10
Angle1	Γωνία Στροφής Μαγνήτη 1	Συνεχής Μεταβολή	5	8	10
Wm2	Πάχος Μαγνήτη 2	Συνεχής Μεταβολή	1	1.24	3
Lm2	Μήκος Μαγνήτη 2	Συνεχής Μεταβολή	10	16.4	20
Xm2	Οριζόντια Μετατόπιση Μαγνήτη 2	Συνεχής Μεταβολή	20	27.7932	40
Ym2	Κάθετη Μετατόπιση Μαγνήτη 2	Συνεχής Μεταβολή	15	21	25
Wair	Πάχος Τρύπας Αέρα	Συνεχής Μεταβολή	1	3.84	10
Lair	Μήκος Τρύπας Αέρα	Συνεχής Μεταβολή	5	9	15
Xair	Οριζόντια Μετατόπιση Τρύπας Αέρα	Συνεχής Μεταβολή	30	37.1178	50
Yair	Κάθετη Μετατόπιση Τρύπας Αέρα	Συνεχής Μεταβολή	5	9	15
Στοιχεία Σχεδίασης Δρομέα					
Όνομα Παραμέτρου	Φυσική Σημασία Παραμέτρου	Είδος Μεταβολής Παραμέτρου	Τιμές Παραμέτρου	Τιμή Εκκίνησης	
DirM1	Κατεύθυνση Μαγνήτισης Μαγνήτη 1	Διακριτή Μεταβολή	[0, 90, 180, 270]	90	
DirM2	Κατεύθυνση Μαγνήτισης Μαγνήτη 2	Διακριτή Μεταβολή	[0, 90, 180, 270]	90	
DirM3	Κατεύθυνση Μαγνήτισης Μαγνήτη 3	Διακριτή Μεταβολή	[0, 90, 180, 270]	90	
Στοιχεία Σχεδίασης Δρομέα					
Όνομα Παραμέτρου	Φυσική Σημασία Παραμέτρου	Είδος Μεταβολής Παραμέτρου	Ελάχιστη Τιμή	Τιμή Εκκίνησης	Μέγιστη Τιμή
Wtb	Μεγάλο Πάχος Δοντιού	Συνεχής Μεταβολή	5	6	9
Wts	Μικρό Πάχος Δοντιού	Συνεχής Μεταβολή	2	3	4
Wy	Πάχος Σώματος Στάτη	Συνεχής Μεταβολή	4	12	20

Πίνακας 4.1: Μεταβλητές Παράμετροι για βελτιστοποίηση

4.4.2 Γεωμετρικοί Περιορισμοί Ανεξάρτητων Μεταβλητών

Επειδή στις παραπάνω τιμές υπάρχει περίπτωση επικάλυψης του ενός στοιχείου με κάποιο άλλο το οποίο δεν οδηγεί σε επιθυμητή γεωμετρία δημιουργούνται ορισμένοι γεωμετρικοί περιορισμοί οι οποίοι εάν καταπατηθούν ο κώδικας που δημιουργήθηκε στην MATLAB δεν υλοποιεί τις δύο προσομοιώσεις δηλαδή την ανάλυση με σταθερό δρομέα και την ανάλυση με σύγχρονα στρεφόμενο δρομέα και επιστρέφει ως αποτελέσματα μη έγκυρες τιμές οι οποίες δεν λαμβάνονται υπόψιν στην βελτιστοποίηση. Για να γίνει καλύτερη κατανόηση των περιορισμών οι μεταβλητές εμφανίζονται στην παρακάτω εικόνα :



Σχήμα 4.4: Πόλος Μηχανής με όλα τα Γεωμετρικά της Χαρακτηριστικά

Οι περιορισμοί αυτοί και για τον δρομέα αλλά και για τον σάτη του κινητήρα είναι οι ακόλουθοι:

- Καταρχάς λόγω της μεταβολής του AWG μεταβάλλεται και η διάμετρος του καλωδίου επομένως πρέπει να ελεγχθεί αν το ρεύμα που περνάει από το καλώδιο, για $J = 4 \text{ A mm}^{-2}$ είναι εντός των ορίων του κάθε καλωδίου. [21]
- Πρέπει ο Μαγνήτης 2 (MAGNET2) να μην βρεθεί εκτός των ορίων του δρομέα επομένως ισχύει ο ακόλουθος περιορισμός:

$$\text{Constrain1} < 0.9 \cdot R_{ro} \quad (4.4)$$

όπου

$$\text{Constrain1} = \sqrt{(W_{m2} \cdot \cos \text{Angle}_2 + X_{m2} + L_{m2})^2 + (W_{m2} \cdot \sin \text{Angle}_2 + Y_{m2})^2} \quad (4.5)$$

- Όσον αφορά πάλι τον Μαγνήτη 2 (MAGNET2) πρέπει να βρίσκεται κάτω από την ευθεία $y = x$ δηλαδή κάτω από το μισό του πόλου της μηχανής προκειμένου να γίνει ο αντίστοιχος του στο πάνω μισό. Στην περίπτωση που είναι κάτω από την ευθεία και δεν "πατάει" πάνω σε αυτή όπως συμβαίνει στην πρώτη μηχανή και φαίνεται και στο Σχήμα 4.4 δημιουργείται ένα κενό σιδήρου μεταξύ αυτού και του mirror του. Επομένως ισχύει η ακόλουθη συνθήκη:

$$\text{Constrain2} \leq 1 \quad (4.6)$$

όπου

$$\text{Constrain2} = \frac{Y_{m2} + L_{m2} \sin \text{Angle}_2}{X_{m2} - L_{m2} \cos \text{Angle}_2 + L_{m2}} \quad (4.7)$$

- Πρέπει ακόμα ο Μαγνήτης 2 να είναι πάνω από τον Μαγνήτη 1. Άρα:

$$Y_{m2} > Y_{m1} \quad (4.8)$$

- Επίσης πρέπει ο Μαγνήτης 1 (MAGNET1) να είναι εντός ορίων του δρομέα και πιο κοντά στον άξονα του κινητήρα από τον Μαγνήτη 2 (MAGNET2). Επομένως πρέπει να ισχύουν τα ακόλουθα:

$$X_{m1} > R_{ri} \quad (4.9)$$

και

$$\text{Constrain3} < 0.9 \cdot R_{ro} \quad (4.10)$$

όπου

$$Constrain3 = L_{m1} + L_{air} + R_{ri} \quad (4.11)$$

- Ακόμα όσον αφορά τον Μαγνήτη 1 (MAGNET1) πρέπει να βρίσκεται κάτω από την ευθεία $y = x$ δηλαδή κάτω από το μισό του πόλου της μηχανής προκειμένου να γίνει ο αντίστοιχος του στο πάνω μισό. Δηλαδή στην σχεδίαση σχεδιάζεται ο κάτω μαγνήτης 1 και έπειτα δημιουργείται ο πάνω με mirror ως προς την εξίσωση $y = x$. Επομένως ο περιορισμός που χρειάζεται εδώ είναι ο ακόλουθος:

$$Constrain4 < 1 \quad (4.12)$$

όπου

$$Constrain4 = \frac{Y_{m1} + W_{m1} \cdot \sin Angle_1}{X_{m1} + W_{m1} \cdot \cos Angle_1} \quad (4.13)$$

- Όσον αφορά τώρα τη σχέση μεταξύ του Μαγνήτη 1 (MAGNET1) και του αέρα ισχύει ο ακόλουθος περιορισμός:

$$X_{air} > X_{m1} + L_{m1} \quad (4.14)$$

- Όσον αφορά τώρα την τρύπα αέρα πρέπει να ισχύει ο ακόλουθος περιορισμός έτσι ώστε να μην ξεφεύγει από τα όρια του δρομέα.

$$Constrain5 < R_{ro} \quad (4.15)$$

όπου

$$Constrain5 = \sqrt{(X_{air} + L_{air})^2 + (Y_{air} + W_{air})^2} \quad (4.16)$$

- Οι περιορισμοί από αυτόν και κάτω αφορούν τον στήλη του κινητήρα και κυρίως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοντιών του. Επομένως ισχύουν οι περιορισμοί:

$$W_{ts} < W_{tb} < SlotPitch \quad (4.17)$$

όπου $SlotPitch = \frac{360}{Slots}$, δηλαδή το πολικό βήμα μεταξύ των αυλάκων

και

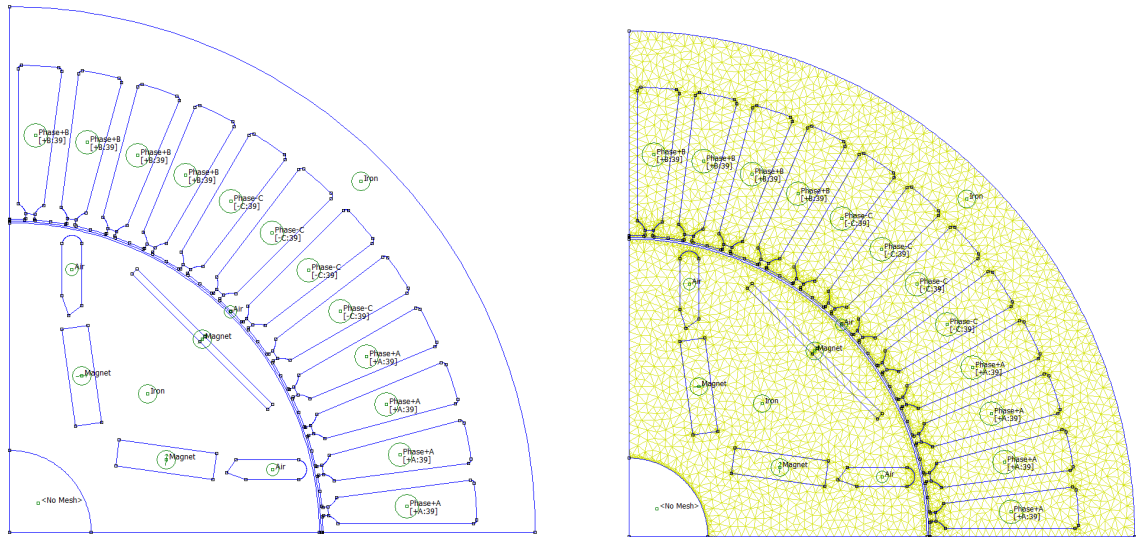
$$W_{ts} < W_y < R_{so} - R_{si} \quad (4.18)$$

και

$$R_{so} > 1.5 \cdot R_{si} \quad (4.19)$$

4.4.3 Αποτελέσματα Πρώτου Κινητήρα (Κινητήρας 1)

Στην ενότητα αυτή καταγράφονται τα χαρακτηριστικά εκείνα που προκύπτουν από την γεωμετρία της πρώτης μηχανής με βάση και τα οποία στη συνέχεια θα τεθούν οι περιορισμοί αυτοί που αφορούν τα στοιχεία αξιολόγησης. Ο κινητήρας αυτός αποτελεί ουσιαστικά τον **Κινητήρα Ορόσημο** για όλους τους υπόλοιπους που θα ακολουθήσουν. Επομένως ακολουθεί η σχεδίαση της εν λόγω μηχανής (οι τιμές των γεωμετρικών της στοιχείων είναι εκείνες που καταγράφονται ως τιμή εκκίνησης στον Πίνακα 4.1).

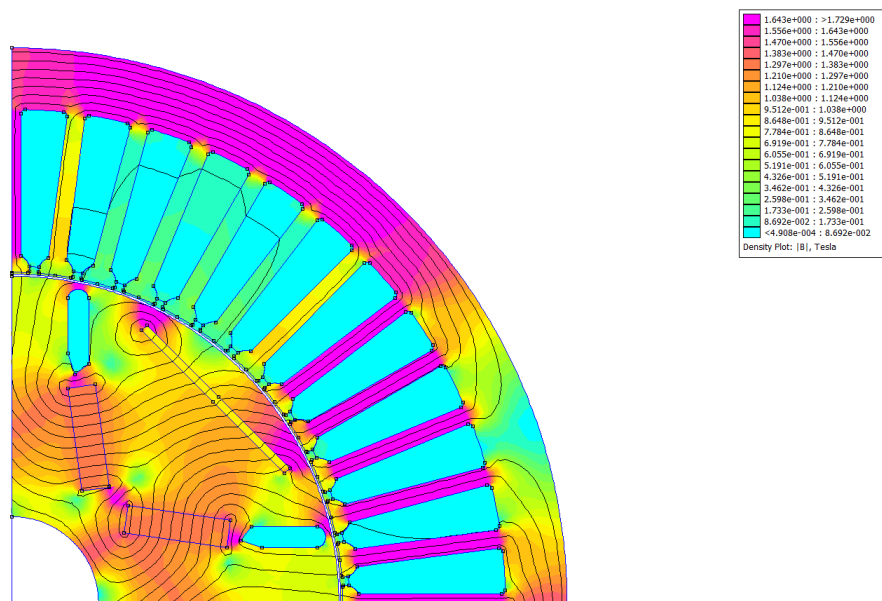


(α) Σχεδίαση Πόλου Κινητήρα 1 στο λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων FEMM

(β) Τριγωνικό Πλέγμα Πόλου Κινητήρα 1 στο λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων FEMM

Σχήμα 4.5: Σχεδίαση και Πλέγμα Κινητήρα 1

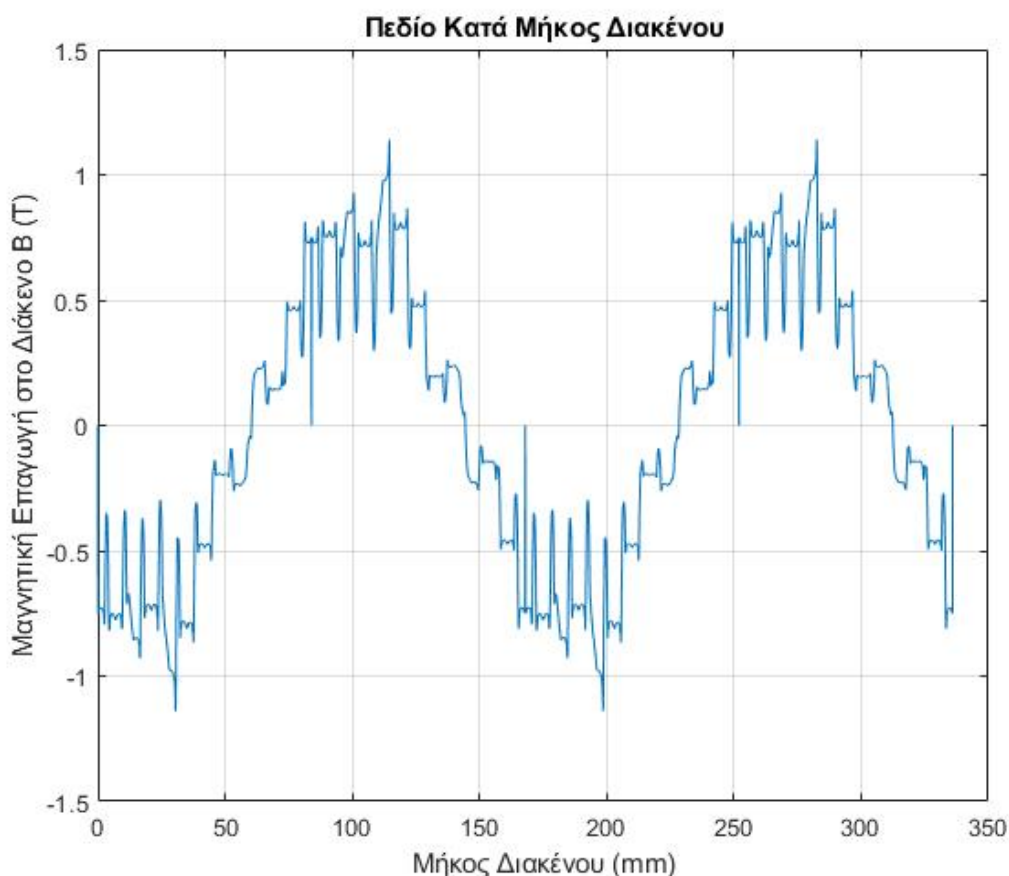
Το μαγνητικό πεδίο της παραπάνω σχεδίασης σε μία συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας όπου $J = 4 \text{ A mm}^{-2}$ και $\gamma = 0$ παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Μαγνητικό Πεδίο 1ου Κινητήρα

Αποτελέσματα Ανάλυσης με Σταθερό δρομέα (Κινητήρας 1)

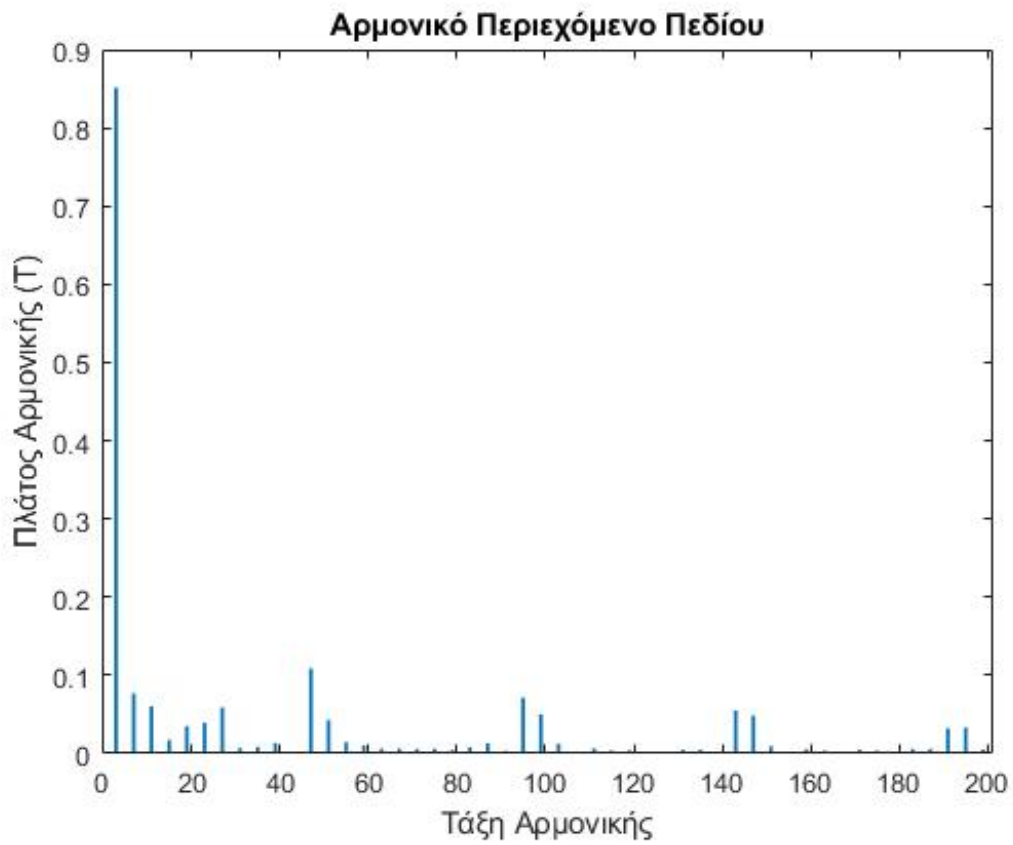
Η καμπύλη $B - length$ που δείχνει ουσιαστικά την κατανομή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο εμφανίζεται στην συνέχεια (Σχήμα 4.7) για την παραπάνω κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα με αυτό το μαγνητικό πεδίο που φαίνεται στο Σχήμα 4.6. Το πεδίο αυτό παρουσιάζει μία ημιτονικότητα έχοντας πλήθος αρμονικών συνιστωσών. Αυτές οφείλονται κυρίως στο τύλιγμα το οποίο και εισάγει κάποιο αρμονικό περιεχόμενο αλλά και στην αλληλουχία δοντιού αύλακας του στάτη (tooth - slot harmonics).



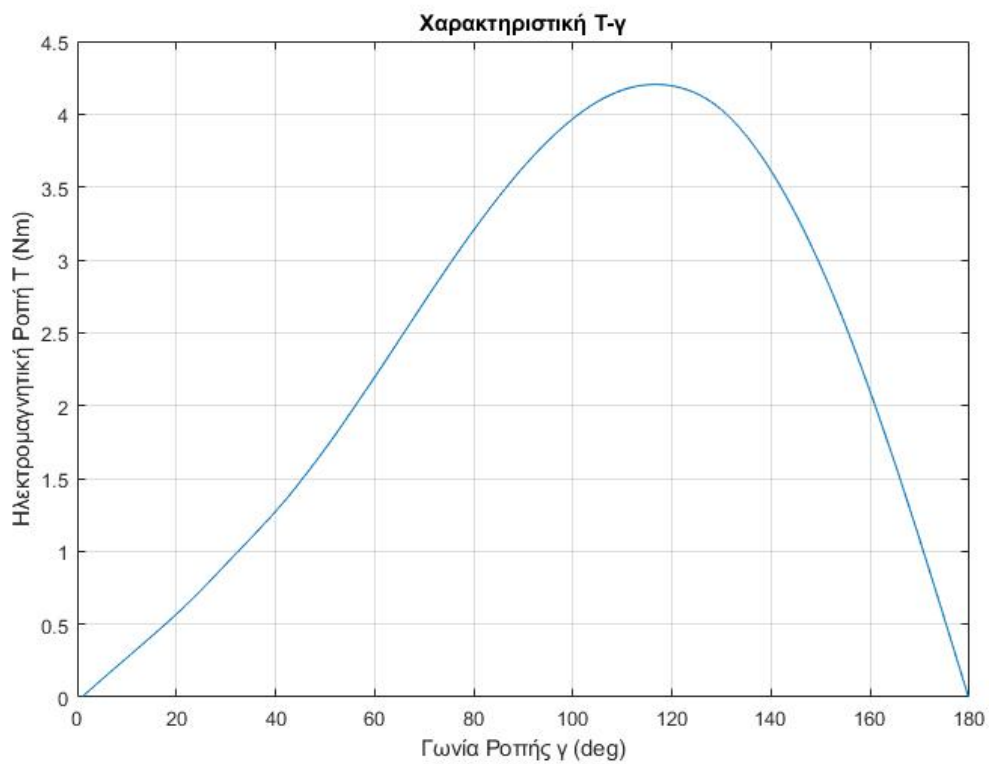
Σχήμα 4.7: Πεδίο στο διάκενο του Κινητήρα 1 κατά μήκος αυτού

Στην συνέχεια από ανάλυση Fourier φαίνεται το αρμονικό περιεχόμενο του πεδίου (Σχήμα 4.8). Αυτή η αρμονική συνιστώσα που κυριαρχεί είναι και η θεμελιώδης, ενώ τα πλάτη των υπολοίπων είναι μικρότερα της. Αυτό είναι και ένα από τα πλεονεκτήματα από τη χρήση κατανεμημένου τυλίγματος, το οποίο βοηθά σημαντικά στην ημιτονικότητα του πεδίου. Από το πεδίο απουσιάζουν οι ζυγές αρμονικές, καθώς υπάρχει περιοδικότητα ημίσεος κύματος.

Στην ανάλυση αυτή υπολογίζεται κατά κύριο λόγο η καμπύλη που υποδεικνύει τη σχέση μεταξύ ηλεκτρομαγνητικής ροπής στο διάκενο και της ηλεκτρικής γωνίας στα τυλίγματα του στάτη. Η καμπύλη αυτή υπολογίζεται μεταβάλλοντας την γωνία γ από 0 έως 180 ηλεκτρικές μοίρες με βήμα 1 και παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 4.9 για μικρό ρεύμα στα τυλίγματα δηλαδή για $J = 2 \text{ A mm}^{-2}$.



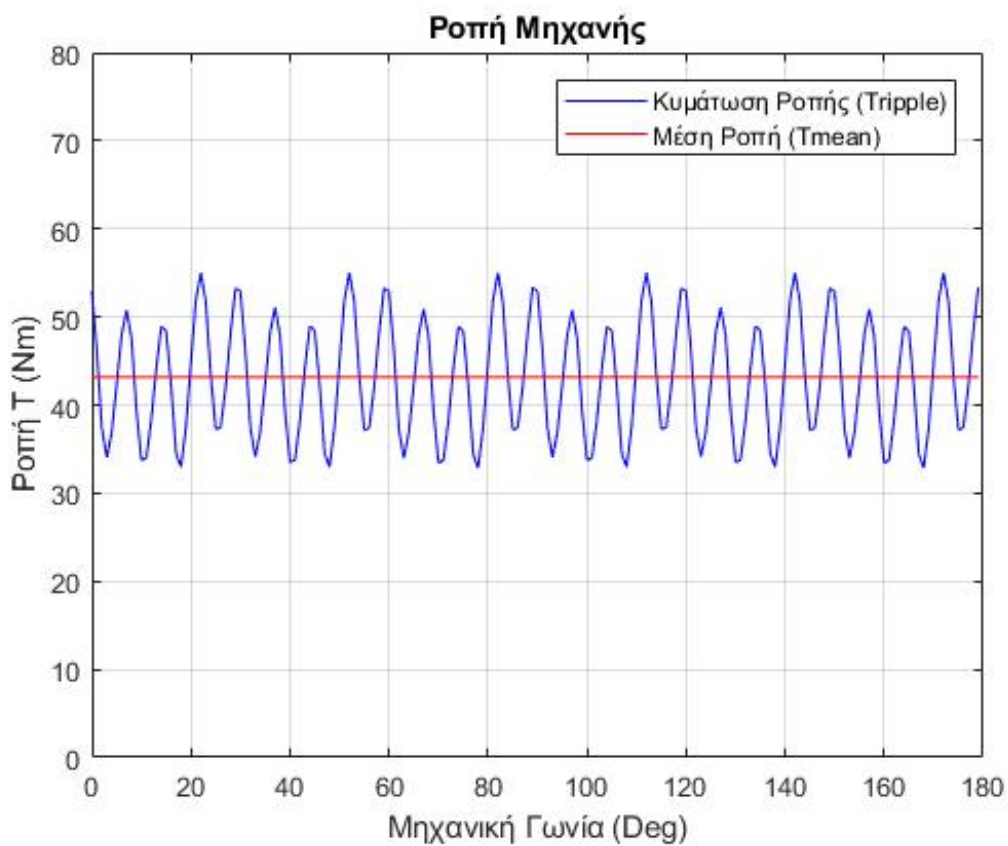
Σχήμα 4.8: Αρμονικό περιεχόμενο πεδίου στο διάκενο του Κινητήρα 1



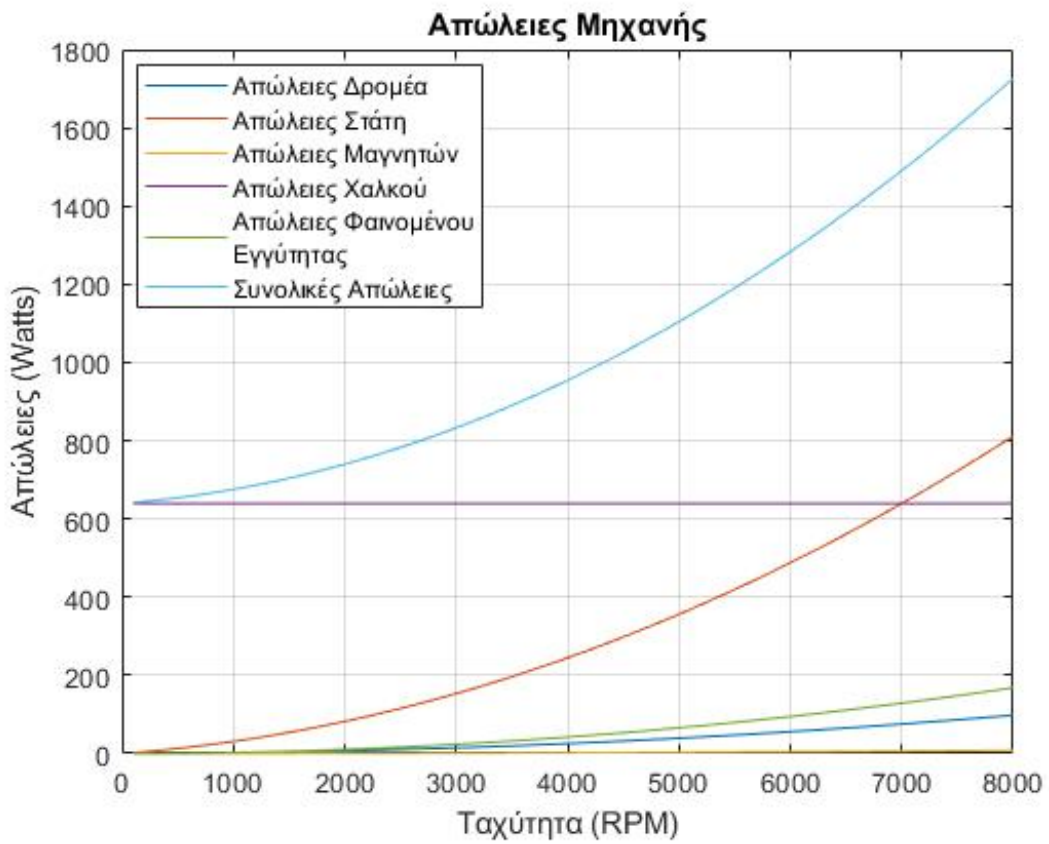
Σχήμα 4.9: Χαρακτηριστική Καμπύλη T-γ του Κινητήρα 1

Αποτελέσματα Ανάλυσης Σύγχρονης Περιστροφής Στάτη Δρομέα (Κινητήρας 1)

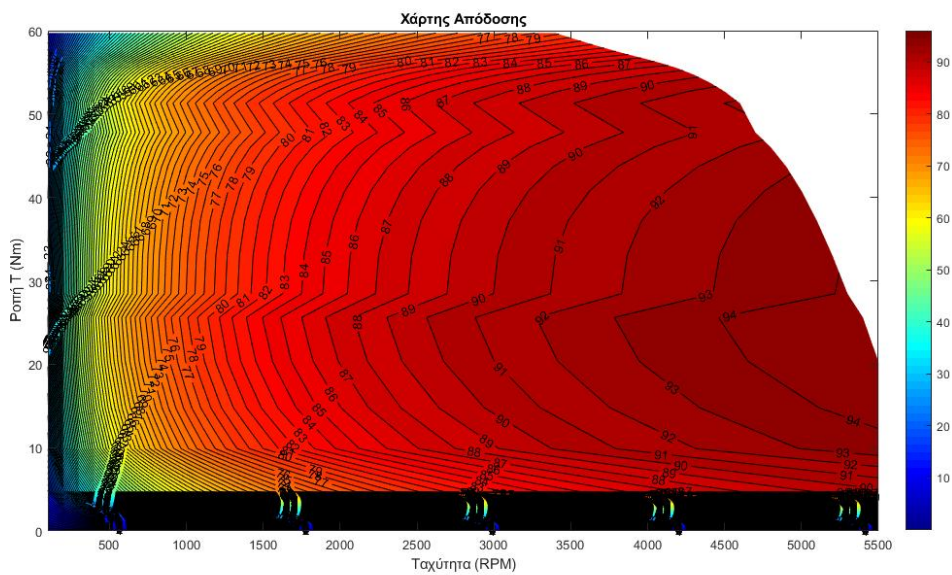
Από την σύγχρονη περιστροφή προκύπτουν οι γραφικές της διακύμανσης της ροπής συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής (Σχήμα 4.10) αλλά και των απωλειών συναρτήσει επίσης των διάφορων ταχυτήτων της μηχανής (Σχήμα 4.11). Επίσης προκύπτει ένας χάρτης απόδοσης (Σχήμα 4.12), ο οποίος υλοποιείται ως εξής. Δίνονται διάφορες τιμές ρεύματος εντός των ορίων που επιτρέπει το καλώδιο και υπολογίζεται για κάθε μία από αυτές η ροπή και η απόδοση με τον τρόπο που περιγράφεται στην ενότητα 3.5.3. Επίσης υπολογίζεται η τάση για κάθε μία από τις ταχύτητες από 0 έως 5500 ΣΑΛ και όσες είναι άνω των 200 V το σημείο του χάρτη δεν λαμβάνει τιμή που να αφορά την ροπή και την απόδοση. Με βάση αυτόν επιλέγεται εκείνο το σημείο λειτουργίας ($n = 3000$ ΣΑΛ) όπου βελτιστοποιείται η γεωμετρία του κινητήρα.



Σχήμα 4.10: Διακύμανση Ροπής Κινητήρα 1



Σχήμα 4.11: Απώλειες Κινητήρα 1



Σχήμα 4.12: Χάρτης Απόδοσης Κινητήρα 1

Επομένως στην ταχύτητα $n = 3000$ ΣΑΛ για $J = 4 \text{ A mm}^{-2}$ προκύπτουν τα χαρακτηριστικά για τον **Κινητήρα 1** που παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 4.2:

Αποτελέσματα για Κινητήρα 1	
Απόδοση $\eta(\%)$	89.2
Μέση Ροπή $T_{mean}(\text{N m})$	44.2
Κυμάτωση Ροπής $T_{ripple}(\%)$	41
Επίδοση $P_{out}(\text{kW})$	17.2
Αρμονικό Περιεχόμενο $THD(\%)$	25.2
Ρεύμα δ άξονα $I_d(\text{A})$	0
Ρεύμα χ άξονα $I_q(\text{A})$	14.97
Τάση $V_{rms}(\text{V})$	184
Τυλίγματα Ανά Φάση (<i>turns</i>)	39

Πίνακας 4.2: Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Κινητήρα 1

4.4.4 Περιορισμοί στα Λειτουργικά Χαρακτηριστικά για Βελτιστοποίηση

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω λειτουργικά χαρακτηριστικά του **Κινητήρα 1** πριν υλοποιηθεί η βελτιστοποίηση τίθενται κάποιοι πρωταρχικοί περιορισμοί για τα χαρακτηριστικά αυτά στο Heeds. Όταν παραβιαστεί κάποιος από αυτούς τους περιορισμούς ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψιν τα αποτελέσματα αυτά προκειμένου να αποφευχθούν. Επομένως και μέσα από αυτά τα "άκυρα" με βάση τους περιορισμούς που θέτουμε οι αλγόριθμοι μπορούν να βοηθηθούν για την εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας (σημείο Pareto). Οι περιορισμοί αυτοί είναι:

- $\eta > 89\%$
- $THD < 26\%$
- $T_{mean} > 44 \text{ N m}$
- $T_{ripple} < 41\%$
- $V_{rms} < 200 \text{ V}$

4.4.5 Εναλλακτικές Περιπτώσεις Κινητήρων

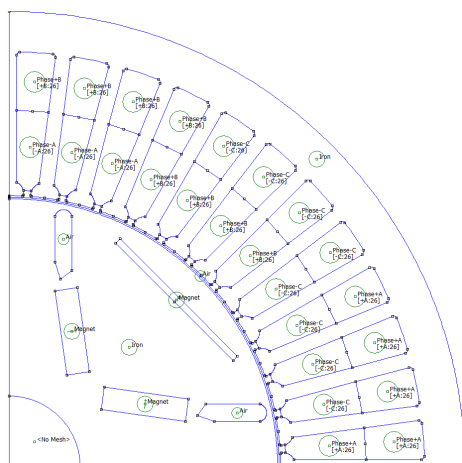
Σε προηγούμενη Ενότητα 4.4 παρουσιάστηκε μία πρόταση όσον αφορά την γεωμετρία ενός κινητήρα τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του οποίου είναι αποδεκτά και χρειάζονται βελτίωση. Εκτός όμως από την γεωμετρικές αλλαγές που υλοποιούνται με χρήση των διάφορων αλγορίθμων (γενετικοί, Nelder-Mead (NMS), SHERPA) πραγματοποιείται και μία αλλαγή στα τυλίγματα του στάτη η οποία είναι η κατανομή των πηνίων μίας φάσης σε πολλαπλά στρώματα εντός μίας αύλακας. Αυτή η διαμόρφωση οδηγεί σε μία υποκατηγορία του κατανεμημένου τυλίγματος η οποία ονομάζεται κατανεμημένο τύλιγμα κλασματικού βήματος. Επίσης από τους γεωμετρικούς περιορισμούς που αναφέρονται συγκεκριμένα στην Υποενότητα 4.4.2 μπορεί να προκύψει άλλη μία εναλλακτική διαμόρφωση όπου ο Μαγνήτης 2 (magnet2) χωρίζεται σε δύο τμήματα μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται σίδηρος.

Επομένως οι εναλλακτικές περιπτώσεις κινητήρων που εξετάζονται είναι:

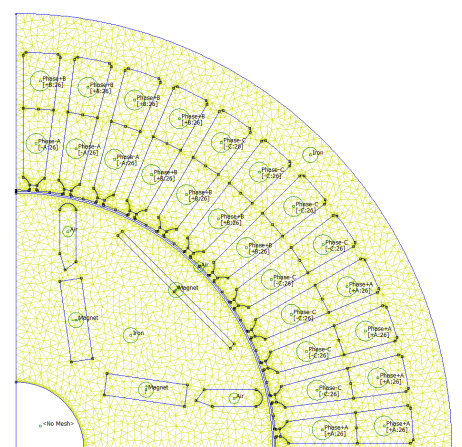
- Μονή Στρώση Τυλίγματος
- Διπλή Στρώση Τυλίγματος
- Ολόσωμος Μαγνήτης 2
- Τμηματικός Μαγνήτης 2

4.4.6 Σχεδίαση και Αποτελέσματα Δεύτερου Κινητήρα (Κινητήρας 2)

Ο Κινητήρας 2 η σχεδίαση του οποίου υλοποιείται στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων FEMM παρουσιάζεται εν συνεχεία. Σημειώνεται πως έχει τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με τον Κινητήρα 1 με τη μόνη διαφορά πως έχει διπλή στρώση τυλίγματος στον στάτη. Η διαφορά όμως αυτή είναι και αυτή που βελτιώνει την ημιτονικότητα του πεδίου. Επομένως ακολουθεί η σχεδίαση της εν λόγω μηχανής.



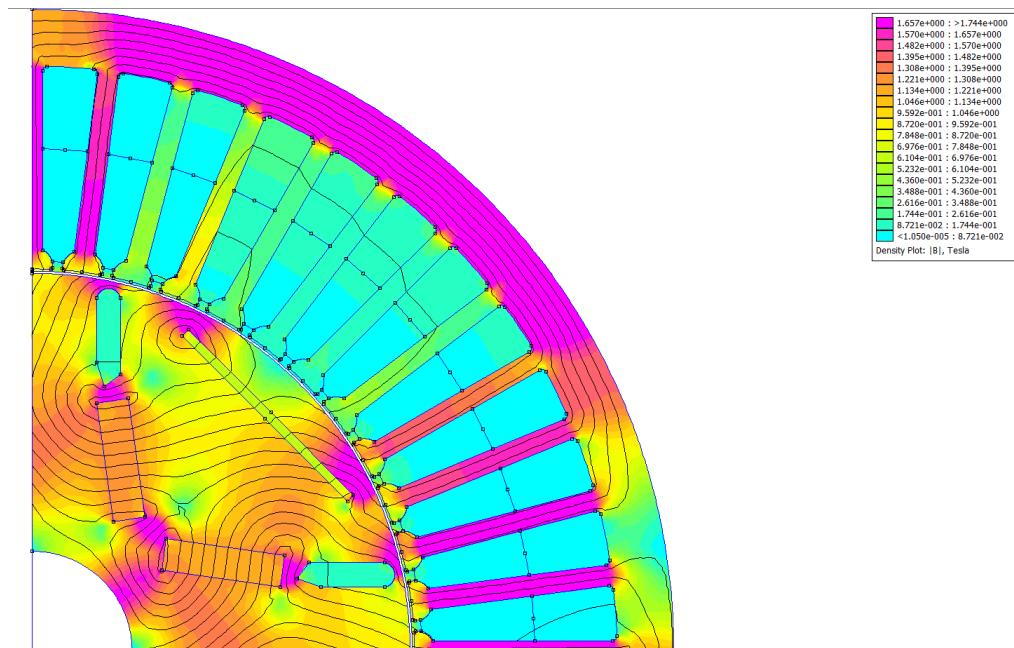
(α) Σχεδίαση Πόλου Κινητήρα 2 στο λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων FEMM



(β) Τριγωνικό Πλέγμα Πόλου Κινητήρα 2 στο λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων FEMM

Σχήμα 4.13: Σχεδίαση και Πλέγμα Κινητήρα 2

Το μαγνητικό πεδίο της παραπάνω σχεδίασης σε μία συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας όπου $J = 4 \text{ A mm}^{-2}$ και $\gamma = 0$ παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 4.14.

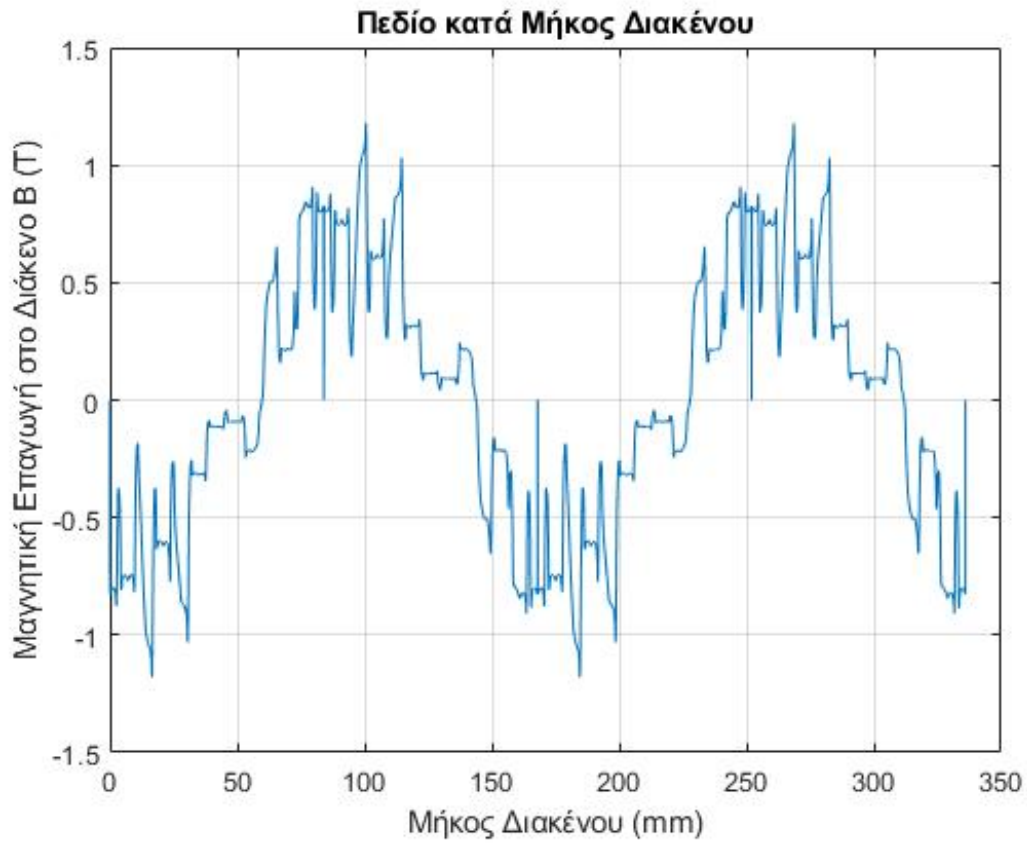


Σχήμα 4.14: Μαγνητικό Πεδίο 2ου Κινητήρα

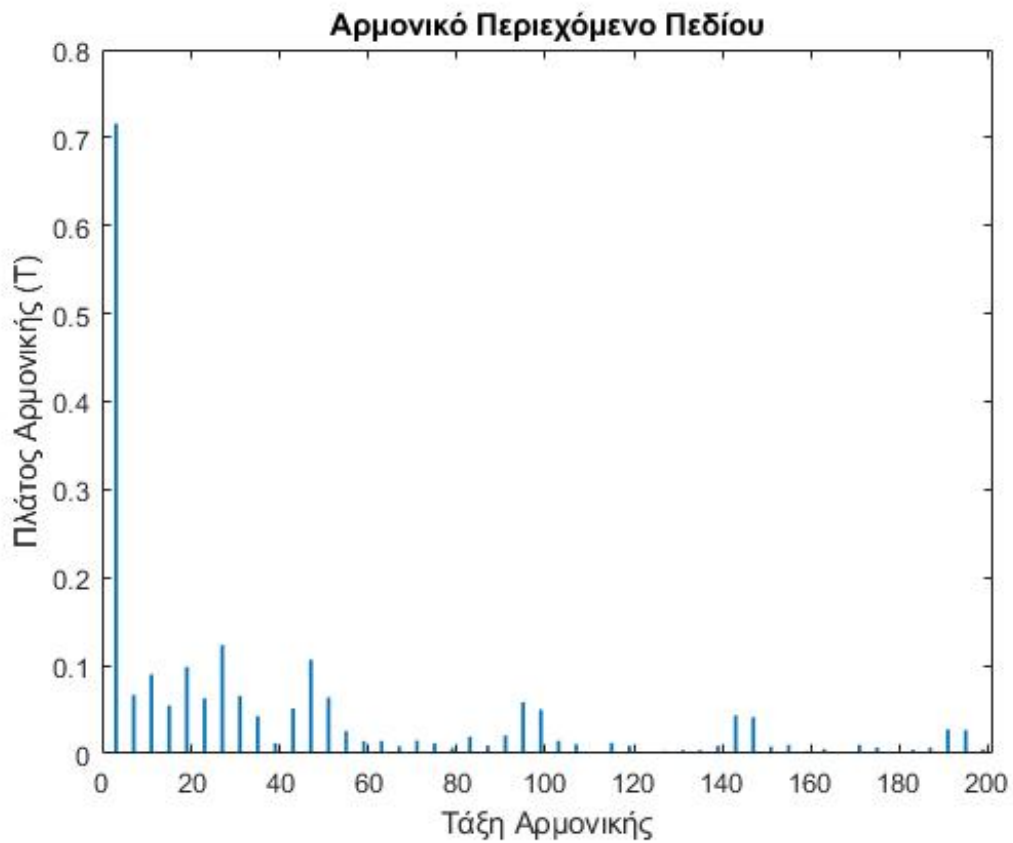
Αποτελέσματα Ανάλυσης με Σταθερό δρομέα (Κινητήρας 2)

Η καμπύλη $B - length$ που δείχνει ουσιαστικά την κατανομή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο εμφανίζεται στην συνέχεια (Σχήμα 4.15) για την παραπάνω κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα με αυτό το μαγνητικό πεδίο που φαίνεται στο Σχήμα 4.14. Το πεδίο αυτό παρουσιάζει μία ημιτονικότητα έχοντας πλήθος αρμονικών συνιστωσών. Αυτές οφείλονται κυρίως στο τύλιγμα το οποίο και εισάγει κάποιο αρμονικό περιεχόμενο αλλά και στην αλληλουχία δοντιού αύλακας του στάτη (tooth - slot harmonics).

Στην συνέχεια από ανάλυση Fourier φαίνεται το αρμονικό περιεχόμενο του πεδίου (Σχήμα 4.16). Αυτή η αρμονική συνιστώσα που κυριαρχεί είναι και η θεμελιώδης, ενώ τα πλάτη των υπολοίπων είναι μικρότερα της. Αυτό είναι και ένα από τα πλεονεκτήματα από τη χρήση κατανεμημένου τυλίγματος και μάλιστα διπλής στρώσης, το οποίο βοηθά σημαντικά στην ημιτονικότητα του πεδίου. Από το πεδίο απουσιάζουν οι ζυγές αρμονικές, καθώς υπάρχει περιοδικότητα ημίσεος κύματος.



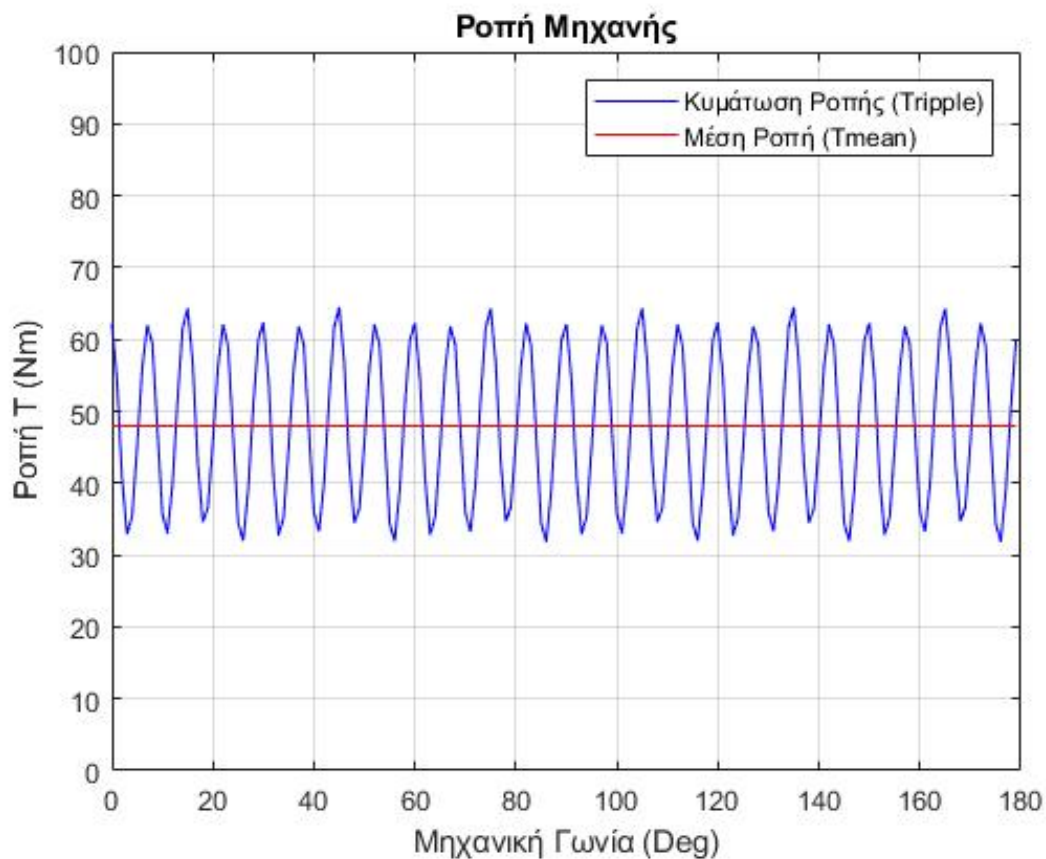
Σχήμα 4.15: Πεδίο στο διάκενο του Κινητήρα 2 κατά μήκος αυτού



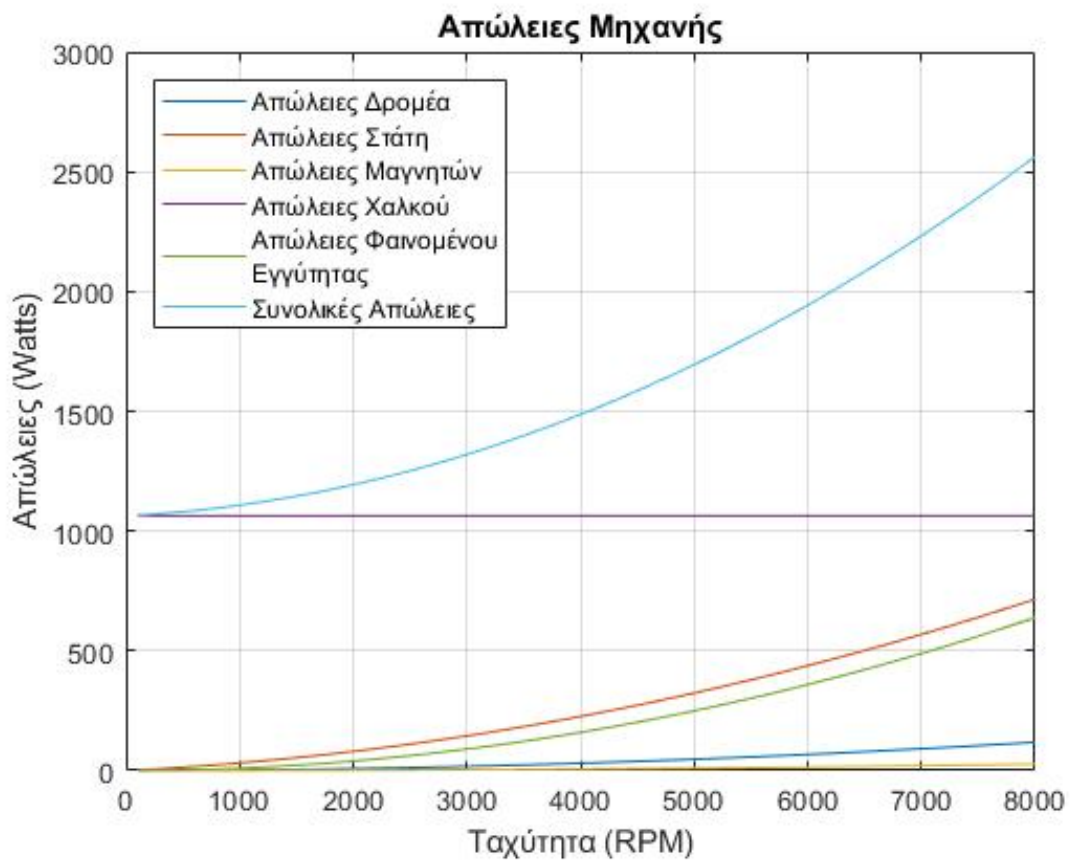
Σχήμα 4.16: Αρμονικό περιεχόμενο πεδίου στο διάκενο του Κινητήρα 2

Αποτελέσματα Ανάλυσης Σύγχρονης Περιστροφής Στάτη Δρομέα (Κινητήρας 2)

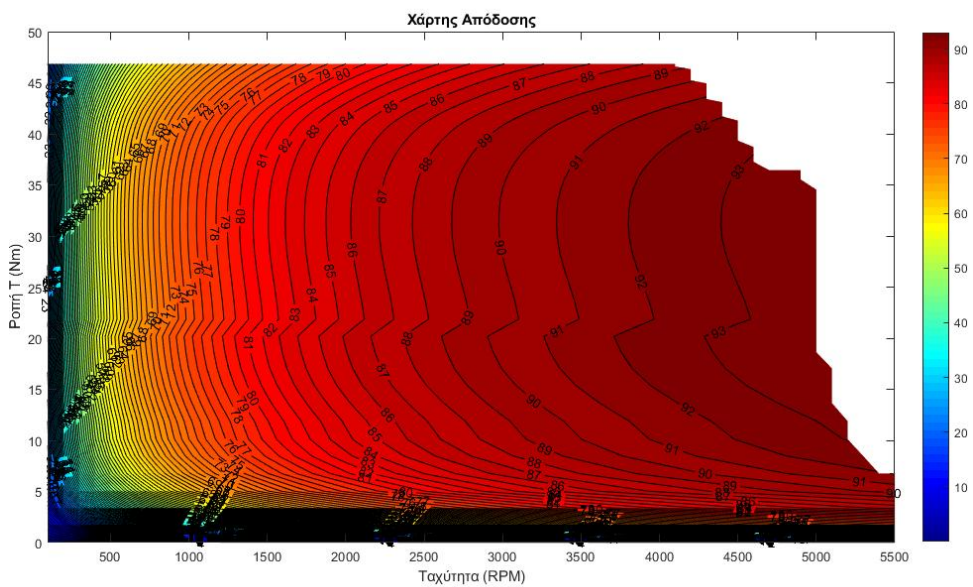
Από την σύγχρονη περιστροφή προκύπτουν οι γραφικές της διακύμανσης της ροπής συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής (Σχήμα 4.17) αλλά και των απωλειών συναρτήσει επίσης των διάφορων ταχυτήτων της μηχανής (Σχήμα 4.18). Επίσης προκύπτει ένας χάρτης απόδοσης (Σχήμα 4.19), ο οποίος υλοποιείται ως εξής. Δίνονται διάφορες τιμές ρεύματος εντός των ορίων που επιτρέπει το καλώδιο και υπολογίζεται για κάθε μία από αυτές η ροπή και η απόδοση με τον τρόπο που περιγράφεται στην ενότητα 3.5.3. Επίσης υπολογίζεται η τάση για κάθε μία από τις ταχύτητες από 0 έως 5500 ΣΑΛ και όσες είναι άνω των 200 V το σημείο του χάρτη δεν λαμβάνει τιμή που να αφορά την ροπή και την απόδοση. Με βάση αυτόν επιλέγεται εκείνο το σημείο λειτουργίας ($n = 3000$ ΣΑΛ) όπου βελτιστοποιείται η γεωμετρία του κινητήρα.



Σχήμα 4.17: Διακύμανση Ροπής Κινητήρα 2



Σχήμα 4.18: Απώλειες Κινητήρα 2



Σχήμα 4.19: Χάρτης Απόδοσης Κινητήρα 2

Επομένως στην ταχύτητα $n = 3000$ ΣΑΛ για $J = 4 \text{ A mm}^{-2}$ προκύπτουν τα χαρακτηριστικά για τον **Κινητήρα 2** που παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 4.3:

Αποτελέσματα για Κινητήρα 2	
Απόδοση $\eta(\%)$	92.94
Μέση Ροπή $T_{mean}(\text{N m})$	47.95
Κυμάτωση Ροπής $T_{ripple}(\%)$	38.11
Επίδοση $P_{out}(\text{kW})$	15.7
Αρμονικό Περιεχόμενο $THD(\%)$	28.52
Ρεύμα δ άξονα $I_d(\text{A})$	0
Ρεύμα χ άξονα $I_q(\text{A})$	24.81
Τάση $V_{rms}(\text{V})$	169
Τυλίγματα Ανά Φάση (<i>turns</i>)	26

Πίνακας 4.3: Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Κινητήρα 2

4.4.7 Υλοποίηση Βελτιστοποίησης

Στην βελτιστοποίηση αρχικά τοποθετείται ο κώδικας για την παραπάνω μηχανή (Κινητήρας 1) Σχήμα 4.5α' που σχεδιάζεται στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων FEMM. **Ο κινητήρας αυτός (Κινητήρας 1) έχει Ολόσωμο τον Μαγνήτη 2 και Μονή Στρώση Τυλίγματος.** Αρχικά χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Nelder-Mead (NMS) και η συνάρτηση βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση της απόδοσης με τους περιορισμούς που φαίνονται στην Υποενότητα 4.4.4. Επιλέγεται ο αλγόριθμος αυτός καθώς μετά από δοκιμές φαίνεται πως συγκλίνει πιο γρήγορα σε καλύτερη απόδοση δηλαδή χρειάζεται λιγότερες επαναλήψεις. Δεν υλοποιούνται πολλές επαναλήψεις κάθε φορά και η προσομοίωση σταματάει προκειμένου να αλλάξουν οι τιμές των περιορισμών προς το καλύτερο (αύξηση περιορισμού απόδοσης, αύξηση περιορισμού ροπής και μείωση περιορισμού κυμάτωσης ροπής), καθώς με αυτόν τον τρόπο αλλάζοντας τους περιορισμούς μπορεί να ευρεθεί το σημείο Pareto το οποίο με βάση τα υποκειμενικά κριτήρια αυτής της εργασίας είναι και ο καλύτερος δυνατός κινητήρας. Όταν ο αλγόριθμος αυτός συγκλίνει χρησιμοποιείται ο υβριδικός SHERPA του HEEDS προκειμένου να είναι πιο ακριβές το αποτέλεσμα καθώς βρίσκει ουσιαστικά την βέλτιστη γεωμετρία κοντά στην γεωμετρία που προκύπτει από τον Nelder-Mead (NMS). Όταν βρεθεί η καλύτερη δυνατή απόδοση τίθεται ως περιορισμό προκειμένου να μην μειωθεί και ορίζεται ως υποκειμενική συνάρτηση η αύξηση της ροπής και η ταυτόχρονη μείωση της κυμάτωσης ροπής. Η βελτιστοποίηση αυτή υλοποιείται με γενετικούς αλγορίθμους αλλά και με τον υβριδικό. Ουσιαστικά η διαδικασία βελτιστοποίησης που ακολουθείται είναι η εξής: **Η βελτιστοποίηση ξεκινά με αλγορίθμους που ακολουθούν μία στοχαστική διαδικασία (Γενετικοί, Nelder-Mead) και τέλος συγκλίνει στην τελική γεωμετρία με χρήση ενός αλγορίθμου που αναζητά τοπικά την βέλτιστη λύση (SHERPA).** Αφού υλοποιηθούν όλες οι παραπάνω βελτιστοποιήσεις με τον σειριακό αυτό τρόπο που αναγράφονται προκύπτει και η βέλτιστη γεωμετρία του κινητήρα που θα αναλυθεί πλήρως στο επόμενο Κεφάλαιο 5. **Η ίδια ακριβώς διαδικασία υλοποιείται και για τον Κινητήρα 2 (Σχήμα 4.13α') ο οποίος έχει τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με τον Κινητήρα 1 άρα και Ολόσωμο Μαγνήτη 2 με τη μόνη διαφορά πως έχει Διπλή Στρώση Τυλίγματος στον Στάτη.** Από τους δύο αυτούς κινητήρες προκύπτουν βελτιωμένες εκδοχές τους (**Επιλεγμένες Διαμορφώσεις Κινητήρων**) μέσω της παραπάνω διαδικασίας. Τα χαρακτηριστικά αυτών περιγράφονται στο επόμενο Κεφάλαιο 5. Όσον αφορά τώρα τους ορισμούς πληθυσμών και παραμέτρων που δίνονται στους παραπάνω αλγορίθμους ισχύουν τα εξής:

Αλγόριθμος\Χαρακτηριστικά	Πληθυσμός	Γενιές	Επαναλήψεις	Simplex
Γενετικοί	40-50	1000	-	-
Nelder - Mean	-	-	1000 - 3000	0.3 - 0.6
SHERPA	-	-	1000 - 3000	-

Πίνακας 4.4: Τα χαρακτηριστικά των αλγορίθμων βελτιστοποίησης

Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης και Συγκριτική Μελέτη Διαμορφώσεων

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό με βάση την σχεδίαση του Κινητήρα 1, της διαδικασίας βελτιστοποίησης και των περιορισμών που αναλύθηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια 3, 4 προκύπτουν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης. Επομένως, γίνεται μία ανάλυση όλων εκείνων των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την βελτιστοποίηση και προτείνονται οι γεωμετρικές εκείνες που είναι οι αποδεκτές με βάση τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί για την παρούσα διπλωματική. Μεταξύ των επιλεγμένων διαμορφώσεων δημιουργείται μία σύγκριση όσον αφορά τα χαρακτηριστικά τους.

5.2 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Κινητήρα Μονής Στρώσης

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την βελτιστοποίηση φαίνονται στις παρακάτω εικόνες. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται κάποιες γραφικές αναπαραστάσεις που δείχνουν την πορεία της βελτιστοποίησης. Τα παρακάτω διαγράμματα αναπαριστούν την σχέση μεταξύ της χαρακτηριστικής συνάρτησης προς βελτιστοποίηση και των διαφορετικών γεωμετριών κινητήρων που δημιουργούνται μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη λύση.

5.2.1 Κινητήρας 1 - Βελτιστοποίηση Απόδοσης

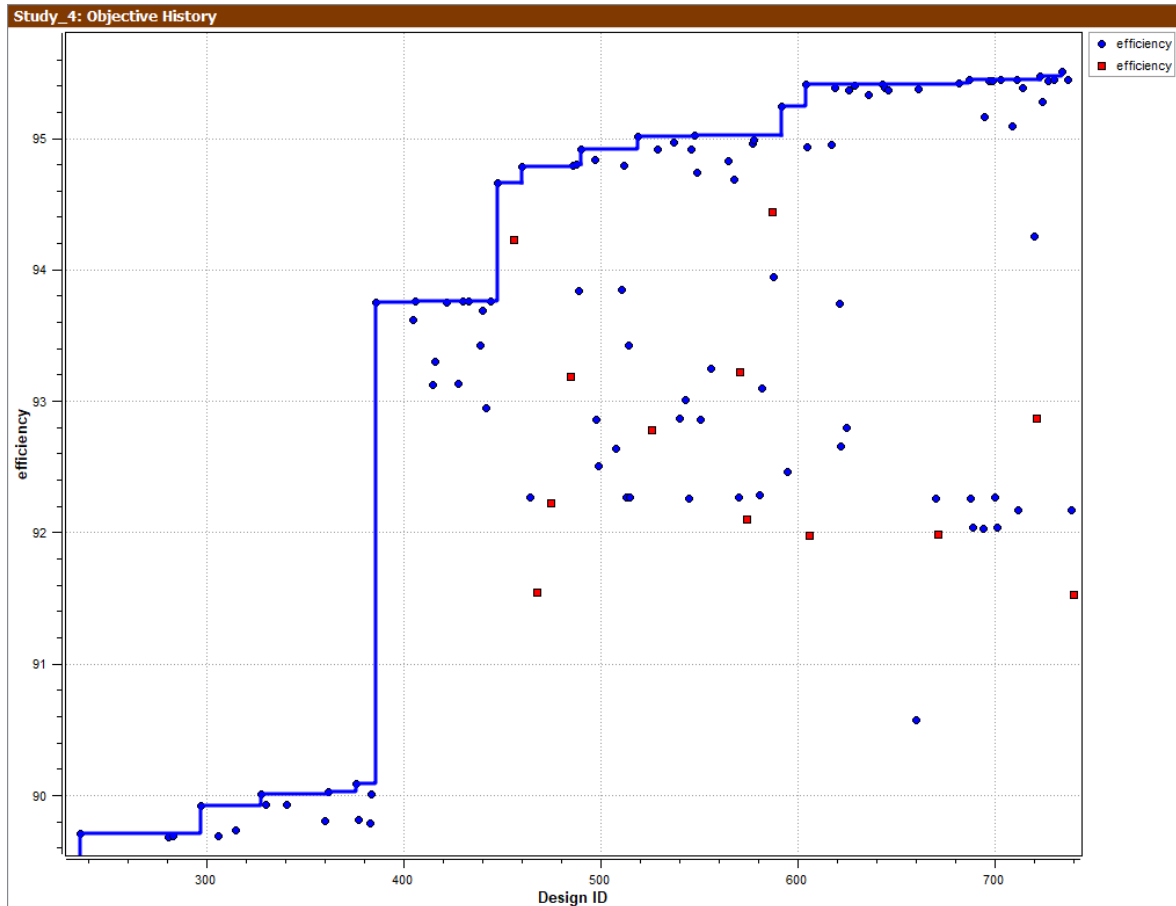
Βελτιστοποίηση Απόδοσης 1

Αρχικά χρησιμοποιείται όπως προαναφέρεται ο αλγόριθμος Nelder - Mead από όπου και προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα (Σχήμα 5.1). Η συνάρτηση που βελτιστοποιείται στο σημείο αυτό είναι η ακόλουθη:

$$f1(x) = \max(\text{efficiency}(\eta)) \quad (5.1)$$

για

$$T_{mean} > 30 \text{ N m}, T_{ripple} < 41\%, V_{rms} < 200 \text{ V}, THD < 26\% \quad (5.2)$$



Σχήμα 5.1: Βελτιστοποίηση με τον αλγόριθμο Nelder-Mead ως προς την απόδοση

Ο κινητήρας που προκύπτει επομένως από την παραπάνω βελτιστοποίηση έχει τα ακόλουθα λειτουργικά χαρακτηριστικά με βάση τα οποία τίθενται οι περιορισμοί για την ακόλουθη βελτιστοποίηση. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.1) υλοποιείται και μία σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα πρωταρχικά.

Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Κινητήρα	Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Απόδοσης 1		
	Πριν τη Βελτιστοποίηση	Μετά τη Βελτιστοποίηση	Σύγκριση Αύξηση ή Μείωση (%)
Απόδοση η (%)	89.20	95.38	Αύξηση κατά 6.94 %
Μέση Ροπή T_{mean} (N m)	44.20	32.69	Μείωση κατά 26.0 %
Κυμάτωση Ροπής T_{ripple} (%)	41	18	Μείωση κατά 56.1 %
Επίδοση P_{out} (kW)	17.20	10.27	Μείωση κατά 40%
Αρμονικό Περιεχόμενο THD (%)	25.20	21.40	Μείωση κατά 15.1%
Τάση V_{rms} (V)	184	199	Αύξηση κατά 8.15%

Πίνακας 5.1: Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Κινητήρα 1 μετά τη Βελτιστοποίηση Απόδοσης 1

Βελτιστοποίηση Απόδοσης 2

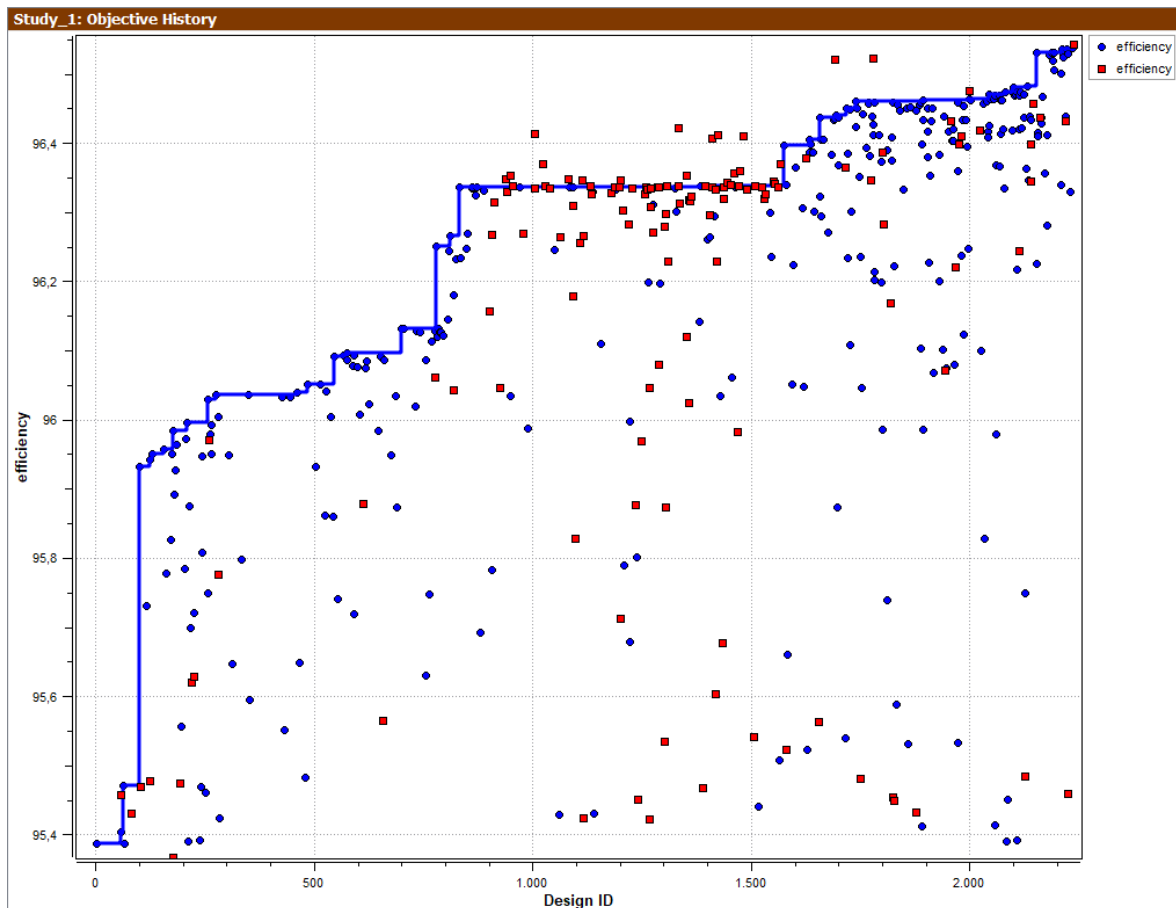
Έπειτα με τον υβριδικό SHERPA γίνεται και η τελική βελτιστοποίηση από όπου προκύπτει ένας βελτιστοποιημένος κινητήρας όσον αφορά την απόδοση (Σχήμα 5.2). Στη συνέχεια εξετάζεται αν χωρίς να μειωθεί αυτή η απόδοση του κινητήρα είναι δυνατό να

αυξηθεί η ροπή του και να μειωθεί η κυμάτωση της. Στο σημείο αυτό η συνάρτηση βελτιστοποίησης είναι:

$$f2(x) = \max(\text{efficiency}(\eta)) \quad (5.3)$$

για

$$T_{\text{mean}} > 30 \text{ N m}, T_{\text{ripple}} < 18\%, V_{\text{rms}} < 200 \text{ V}, \text{THD} < 26\% \quad (5.4)$$



Σχήμα 5.2: Βελτιστοποίηση με τον υβριδικό αλγόριθμο Sheptra ως προς την απόδοση

Ο κινητήρας που προκύπτει επομένως από την παραπάνω βελτιστοποίηση έχει τα ακόλουθα λειτουργικά χαρακτηριστικά με βάση τα οποία τίθενται οι περιορισμοί για την ακόλουθη βελτιστοποίηση. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.2) υλοποιείται και μία σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα πρωταρχικά.

5.2.2 Κινητήρας 1 - Βελτιστοποίηση Ροπής και Κυμάτωσης Ροπής

Εδώ η συνάρτηση βελτιστοποίησης απαρτίζεται από δύο χαρακτηριστικά την ροπή και την κυμάτωση αυτής. Τίθεται ως όριο η απόδοση να μην μειωθεί κάτω από 95% καθώς από την προηγούμενη βελτιστοποίηση ξεπερνούσε την τιμή αυτή. Με βάση αυτά λοιπόν προκύπτει η συνάρτηση βελτιστοποίησης και τα αποτελέσματα αυτής (Σχήμα 5.3):

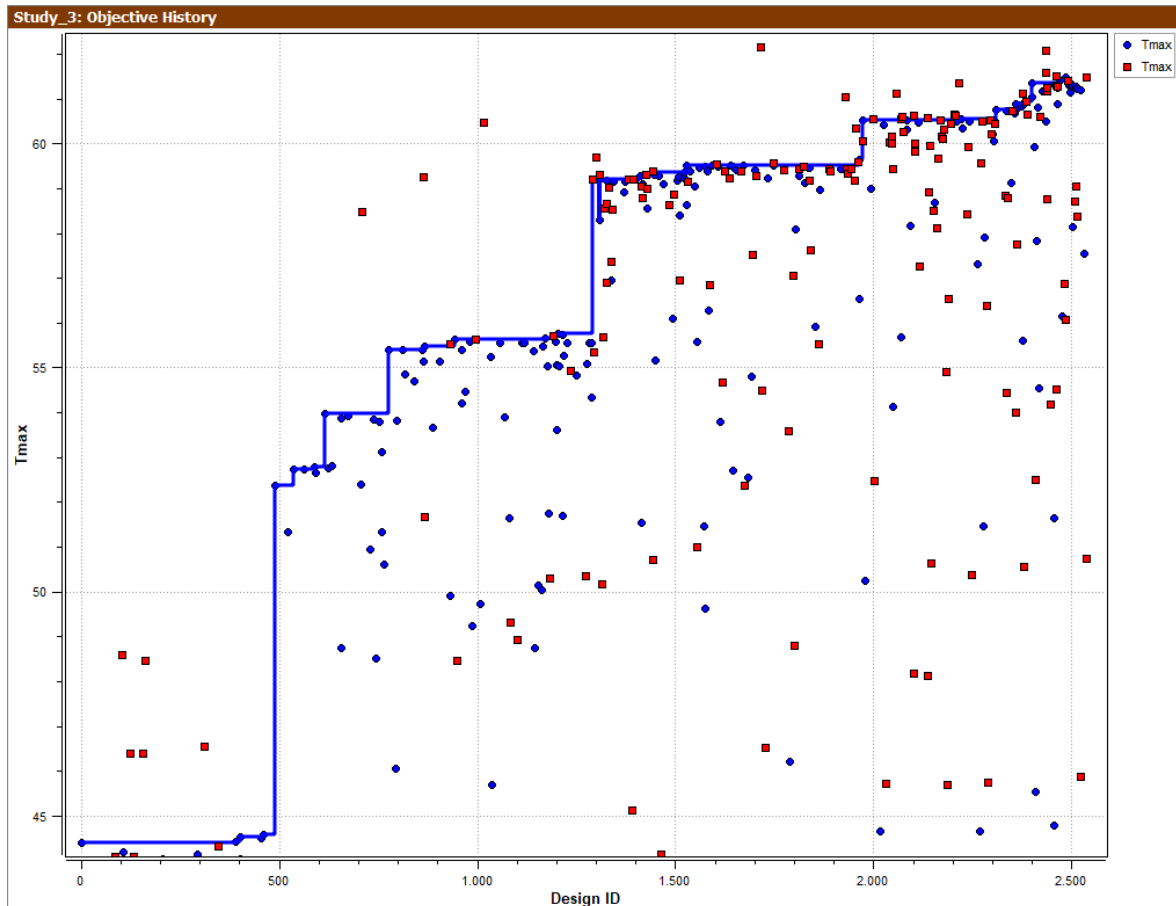
Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Απόδοσης 1			
Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Κινητήρα	Πριν τη Βελτιστοποίηση	Μετά τη Βελτιστοποίηση	Σύγκριση Αύξηση η Μείωση (%)
Απόδοση η (%)	89.20	96.53	Αύξηση κατά 7.60 %
Μέση Ροπή T_{mean} (N m)	44.20	33.70	Μείωση κατά 23.75%
Κυμάτωση Ροπής T_{ripple} (%)	41.00	16.86	Μείωση κατά 58.85 %
Επίδοση P_{out} (kW)	17.20	11.58	Μείωση κατά 32.67 %
Αρμονικό Περιεχόμενο THD (%)	25.20	25.21	Παραμένει Ίδιο
Τάση V_{rms} (V)	184	157	Μείωση κατά 14.67 %

Πίνακας 5.2: Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Κινητήρα 1 μετά τη Βελτιστοποίηση Απόδοσης 1

$$f1(x) = \max(T_{max}), \min(T_{ripple}) \quad (5.5)$$

για

$$efficiency(\eta) > 95\%, T_{mean} > 30 \text{ N m}, T_{ripple} < 18\%, V_{rms} < 200 \text{ V}, THD < 26\% \quad (5.6)$$



Σχήμα 5.3: Βελτιστοποίηση με Γενετικούς ως προς την Ροπή και την Κυμάτωση της

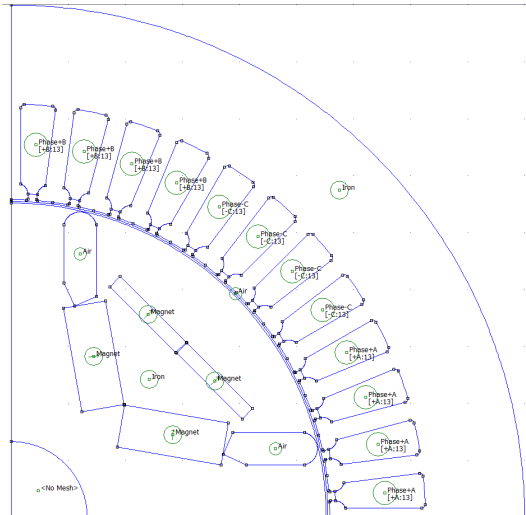
5.2.3 Επιλεγμένος Κινητήρας 1

Στο σημείο αυτό με βάση το αποτέλεσμα των βελτιστοποιήσεων που υλοποιήθηκαν προκειμένου ουσιαστικά να βρεθεί το σημείο Pareto δηλαδή η γεωμετρία εκείνης της μηχανής που ικανοποιεί κριτήρια που τέθηκαν όσον αφορά την απόδοση, την ροπή και την κυμάτωση της. Τα στοιχεία λοιπόν της γεωμετρίας αυτής είναι τα ακόλουθα (Πίνακας 5.3). Σημειώνεται πως η φυσική σημασία των στοιχείων γεωμετρίας που καταγράφονται σημειώνεται σε προηγούμενη εικόνα του Σχήματος 4.4.

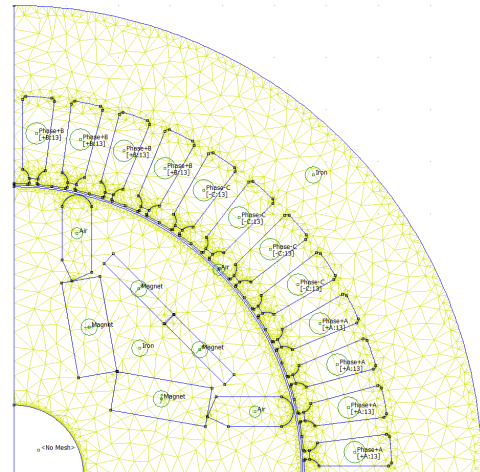
Γενικά Στοιχεία Σχεδίασης		
Όνομα Παραμέτρου	Φυσική Σημασία Παραμέτρου	Τιμές Παραμέτρου
Slots	Αριθμός Αυλάκων Κινητήρα	48
AWG	American Wire Gauge 3.40	14
Στοιχεία Σχεδίασης Δρομέα		
Όνομα Παραμέτρου	Φυσική Σημασία Παραμέτρου	Τιμές Παραμέτρου
Rro	Εξωτερική Ακτίνα Δρομέα	55.2
Rri	Εσωτερική Ακτίνα Δρομέα	13.3
Wm1	Πάχος Μαγνήτη 1	7.5
Lm1	Μήκος Μαγνήτη 1	18.5
Xm1	Οριζόντια Μετατόπιση Μαγνήτη 1	18.25
Ym1	Κάθετη Μετατόπιση Μαγνήτη 1	9.16
Angle1	Γωνία Στροφής Μαγνήτη 1	10
Wm2	Πάχος Μαγνήτη 2	2.54
Lm2	Μήκος Μαγνήτη 2	16.3
Xm2	Οριζόντια Μετατόπιση Μαγνήτη 2	24.2
Ym2	Κάθετη Μετατόπιση Μαγνήτη 2	17.3
Wair	Πάχος Τρύπας Αέρα	5.85
Lair	Μήκος Τρύπας Αέρα	10.2
Xair	Οριζόντια Μετατόπιση Τρύπας Αέρα	41.2
Yair	Κάθετη Μετατόπιση Τρύπας Αέρα	9.2
DirM1	Κατεύθυνση Μαγνήτισης Μαγνήτη 1	90
DirM2	Κατεύθυνση Μαγνήτισης Μαγνήτη 2	90
DirM3	Κατεύθυνση Μαγνήτισης Μαγνήτη 3	90
Στοιχεία Σχεδίασης Δρομέα		
Όνομα Παραμέτρου	Φυσική Σημασία Παραμέτρου	Τιμές Παραμέτρου
Wtb	Μεγάλο Πάχος Δοντιού	5.92
Wts	Μικρό Πάχος Δοντιού	3.2
Wy	Πάχος Σώματος Στάτη	17.44

Πίνακας 5.3: Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Επιλεγμένου Κινητήρα 1

Η σχεδίαση του **Επιλεγμένου Κινητήρα 1** υλοποιείται στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων FEMM και παρουσιάζεται εν συνεχεία (Σχήμα 5.4α). Γίνεται αντιληπτό και στο παρακάτω σχήμα πως η βέλτιστη γεωμετρία που προτάθηκε έχει τμηματοποιήσει τον Μαγνήτη 2(4.4) σε πάνω και κάτω από την ευθεία $y = x$ ενώ ο μεταξύ τους χώρος αποτελείται από σίδηρο. **Επομένως ο Επιλεγμένος Κινητήρας 1 έχει Τμηματικό Μαγνήτη 2 και Μονή Στρώση Τυλίγματος στον Στάτη.**



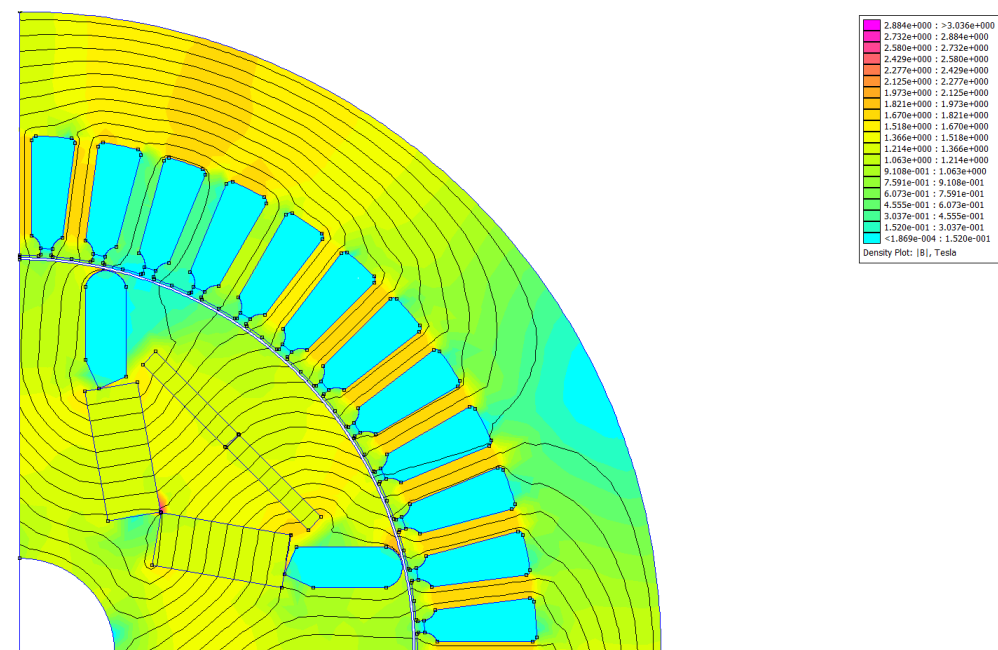
(α) Σχεδίαση Πόλου Επιλεγμένου Κινητήρα 1 στο λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων FEMM



(β) Τριγωνικό Πλέγμα Πόλου Επιλεγμένου Κινητήρα 1 στο λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων FEMM

Σχήμα 5.4: Σχεδίαση και Πλέγμα Επιλεγμένου Κινητήρα 1

Το μαγνητικό πεδίο της παραπάνω σχεδίασης σε μία συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας όπου $J = 4 \text{ A mm}^{-2}$ και $\gamma = 0$ παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 5.5.

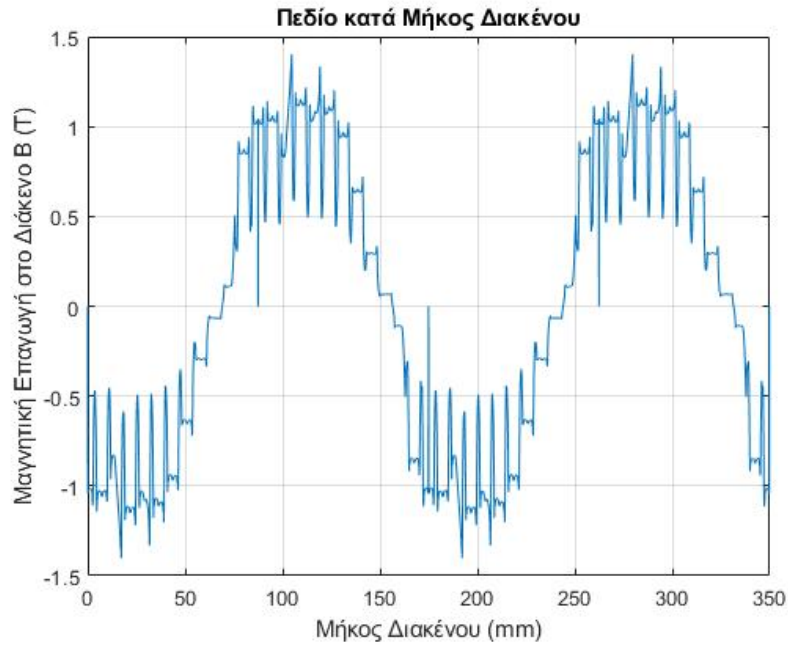


Σχήμα 5.5: Μαγνητικό Πεδίο Επιλεγμένου Κινητήρα 1

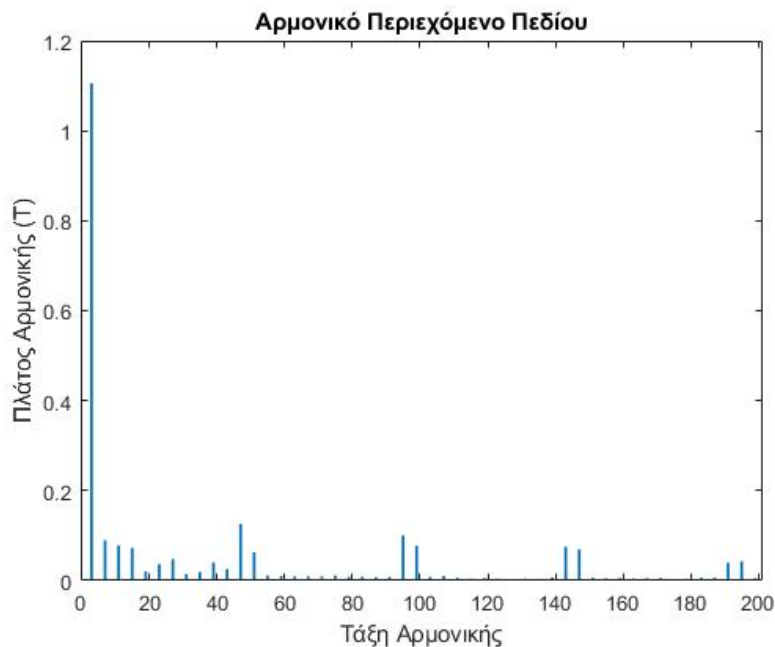
Αποτελέσματα Ανάλυσης με Σταθερό δρομέα (Επιλεγμένος Κινητήρας 1)

Η καμπύλη $B - length$ που δείχνει ουσιαστικά την κατανομή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο εμφανίζεται στην συνέχεια (Σχήμα 5.6) για την παραπάνω κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα με αυτό το μαγνητικό πεδίο που φαίνεται στο Σχήμα 5.5. Το πεδίο αυτό παρουσιάζει μία ημιτονικότητα έχοντας πλήθος αρμονικών συνιστωσών. Αυτές οφείλονται κυρίως στο τύλιγμα το οποίο και εισάγει κάποιο αρμονικό περιεχόμενο αλλά και στην αλληλουχία δοντιού αύλακας του στάτη (tooth - slot harmonics).

Στην συνέχεια από ανάλυση Fourier φαίνεται το αρμονικό περιεχόμενο του πεδίου (Σχήμα 5.7). Αυτή η αρμονική συνιστώσα που κυριαρχεί είναι και η θεμελιώδης, ενώ τα πλάτη των υπολοίπων είναι μικρότερα της. Αυτό είναι και ένα από τα πλεονεκτήματα από τη χρήση κατανεμημένου τυλίγματος και μάλιστα διπλής στρώσης, το οποίο βοηθά σημαντικά στην ημιτονικότητα του πεδίου. Από το πεδίο απουσιάζουν οι ζυγές αρμονικές, καθώς υπάρχει περιοδικότητα ημίσεος κύματος.



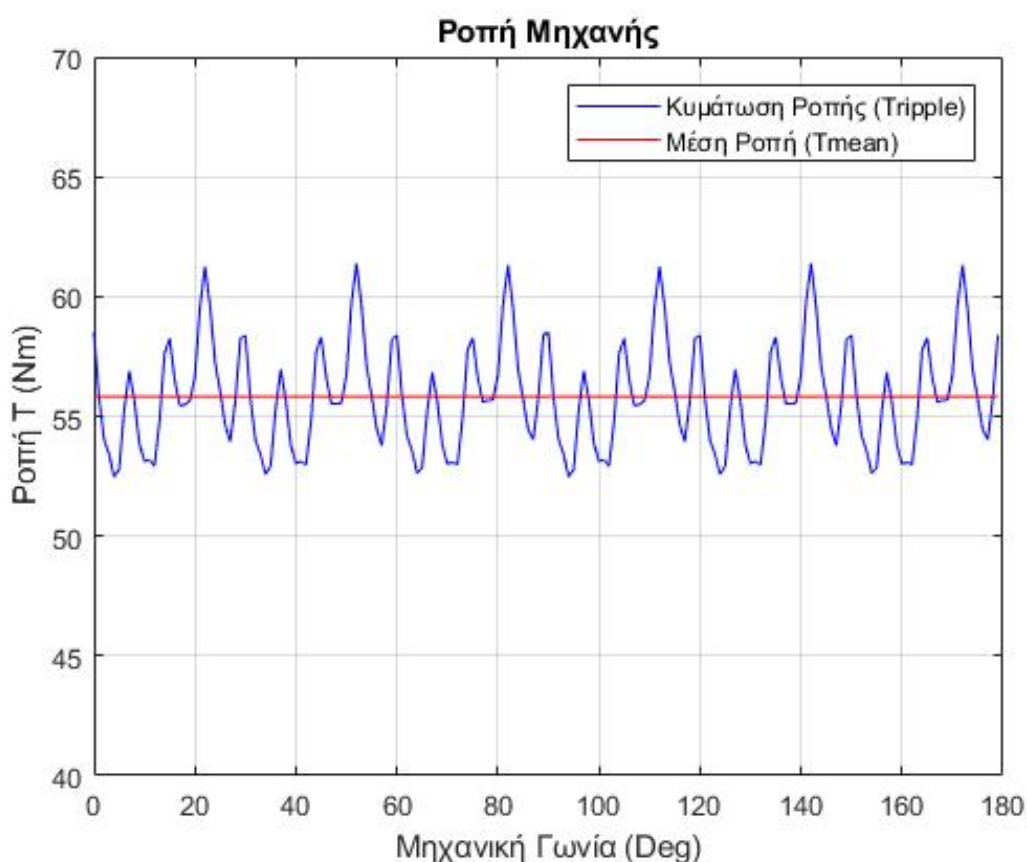
Σχήμα 5.6: Πεδίο στο διάκενο του Επιλεγμένου Κινητήρα 1 κατά μήκος αυτού



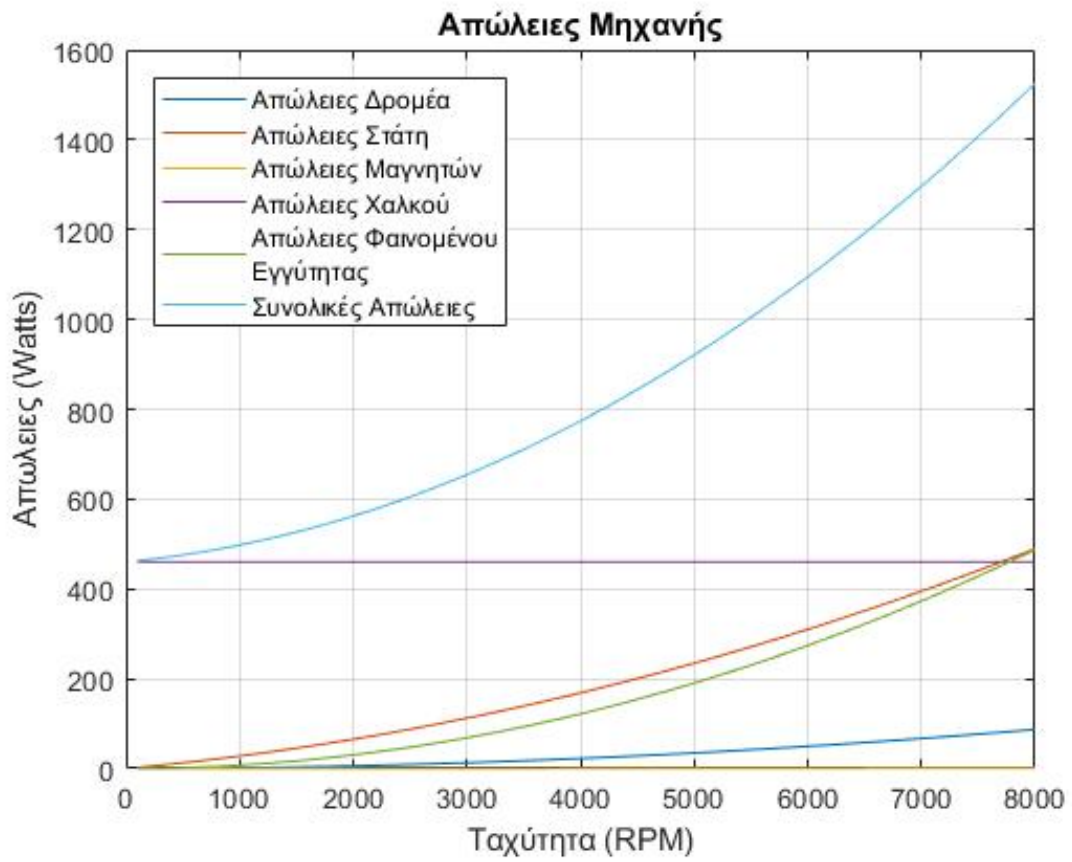
Σχήμα 5.7: Αρμονικό περιεχόμενο πεδίου στο διάκενο του Επιλεγμένου Κινητήρα 1

Αποτελέσματα Ανάλυσης Σύγχρονης Περιστροφής Στάτη Δρομέα Επιλεγμένου Κινητήρα 1

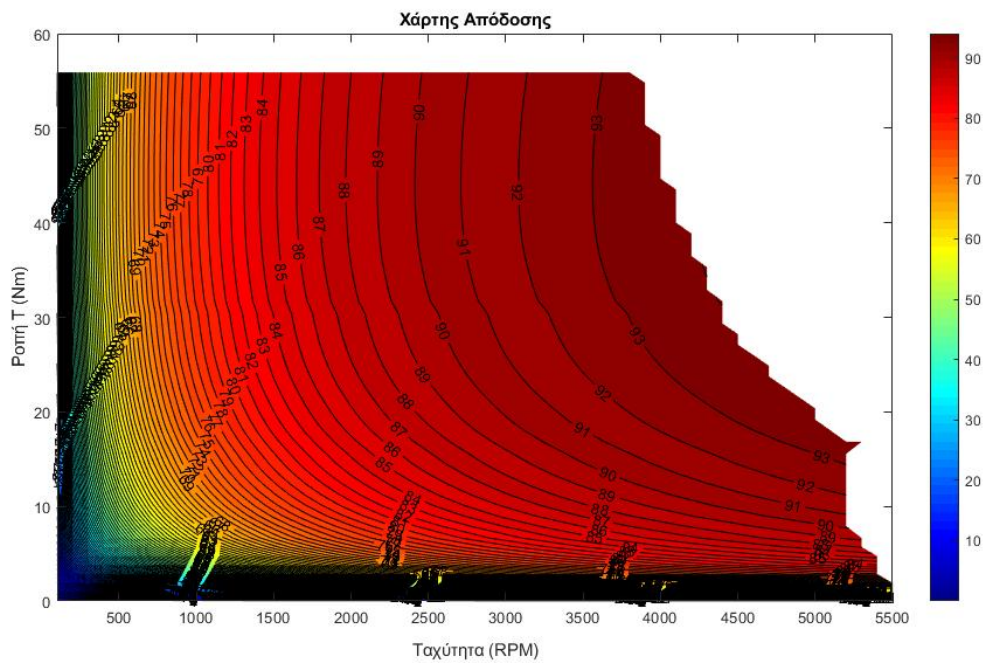
Από την σύγχρονη περιστροφή προκύπτουν οι γραφικές της διακύμανσης της ροπής συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής (Σχήμα 5.8) αλλά και των απωλειών συναρτήσει επίσης των διάφορων ταχυτήτων της μηχανής (Σχήμα 5.9). Επίσης προκύπτει ένας χάρτης απόδοσης (Σχήμα 5.10), ο οποίος υλοποιείται ως εξής. Δίνονται διάφορες τιμές ρεύματος εντός των ορίων που επιτρέπει το καλώδιο και υπολογίζεται για κάθε μία από αυτές η ροπή και η απόδοση με τον τρόπο που περιγράφεται στην ενότητα 3.5.3. Επίσης υπολογίζεται η τάση για κάθε μία από τις ταχύτητες από 0 έως 5500 ΣΑΛ και όσες είναι άνω των 200 V το σημείο του χάρτη δεν λαμβάνει τιμή που να αφορά την ροπή και την απόδοση. Με βάση αυτόν επιλέγεται εκείνο το σημείο λειτουργίας ($n = 3000$ ΣΑΛ) όπου βελτιστοποιείται η γεωμετρία του κινητήρα.



Σχήμα 5.8: Διακύμανση Ροπής Επιλεγμένου Κινητήρα 1



Σχήμα 5.9: Απώλειες Επιλεγμένου Κινητήρα 1



Σχήμα 5.10: Χάρτης Απόδοσης Επιλεγμένου Κινητήρα 1

Επομένως στην ταχύτητα $n = 3000$ ΣΑΛ για $J = 4 \text{ A mm}^{-2}$ προκύπτουν τα χαρακτηριστικά για τον **Επιλεγμένου Κινητήρα 1** που παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 5.4:

Αποτελέσματα για Επιλεγμένο Κινητήρα 1

Απόδοση $\eta(\%)$	96.40
Μέση Ροπή $T_{mean}(\text{N m})$	55.81
Κυμάτωση Ροπής $T_{ripple}(\%)$	15.97
Επίδοση $P_{out}(\text{kW})$	17.52
Αρμονικό Περιεχόμενο $THD(\%)$	23.45
Ρεύμα δ άξονα $I_d(\text{A})$	0
Ρεύμα χ άξονα $I_q(\text{A})$	24.31
Τάση $V_{rms}(\text{V})$	167
Τυλίγματα Ανά Φάση (<i>turns</i>)	17

Πίνακας 5.4: Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Επιλεγμένου Κινητήρα 1

Στην συνέχεια στον Πίνακα 5.5 υλοποιείται και μία σύγκριση των αποτελεσμάτων του **Επιλεγμένου Κινητήρα 1** με αυτά του **Κινητήρα 1**.

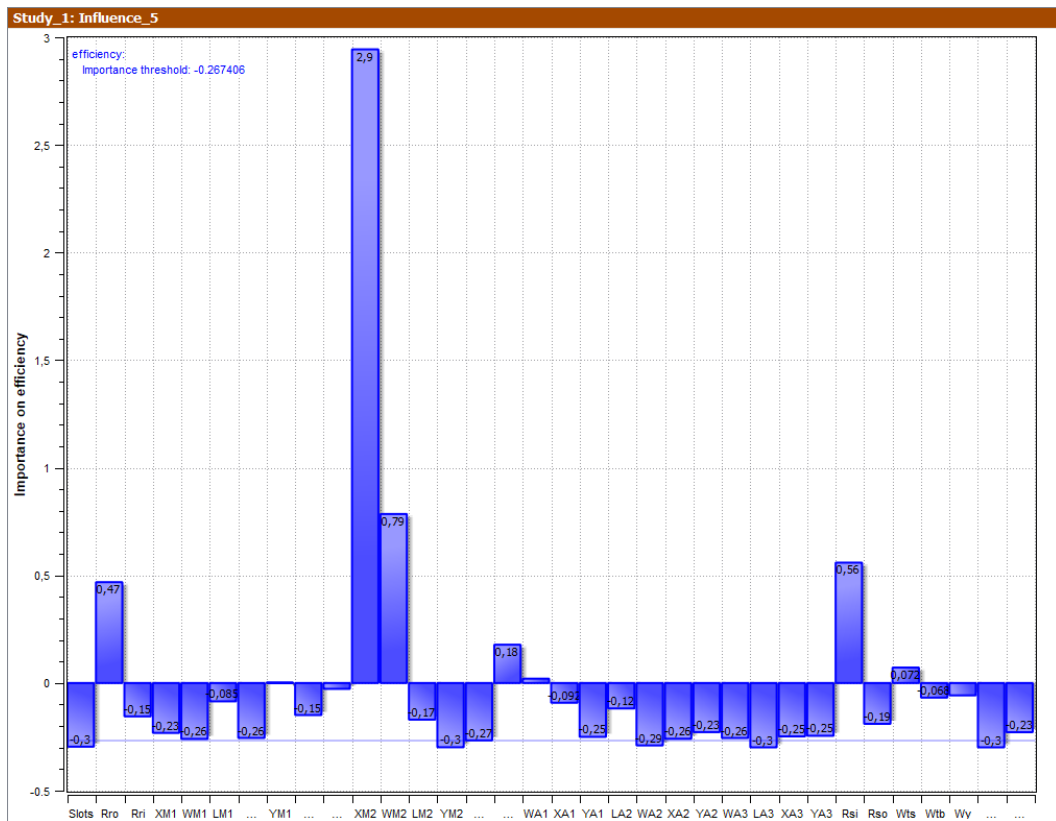
Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Κινητήρα	Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Απόδοσης 1		
	Πριν τη Βελτιστοποίηση	Μετά τη Βελτιστοποίηση	Σύγκριση Αύξηση η Μείωση (%)
Απόδοση $\eta(\%)$	89.20	96.40	Αύξηση κατά 8.07 %
Μέση Ροπή $T_{mean}(\text{N m})$	44.20	55.81	Αύξηση κατά 26.3 %
Κυμάτωση Ροπής $T_{ripple}(\%)$	41.00	15.97	Μείωση κατά 61.1 %
Επίδοση $P_{out}(\text{kW})$	17.20	17.52	Αύξηση κατά 1.8 %
Αρμονικό Περιεχόμενο $THD(\%)$	25.20	23.45	Μείωση κατά 6.9 %
Τάση $V_{rms}(\text{V})$	184	167	Μείωση κατά 9.23 %

Πίνακας 5.5: Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Επιλεγμένου Κινητήρα 1 μετά τη Βελτιστοποίηση Απόδοσης, Ροπής, Κυμάτωσης Ροπής

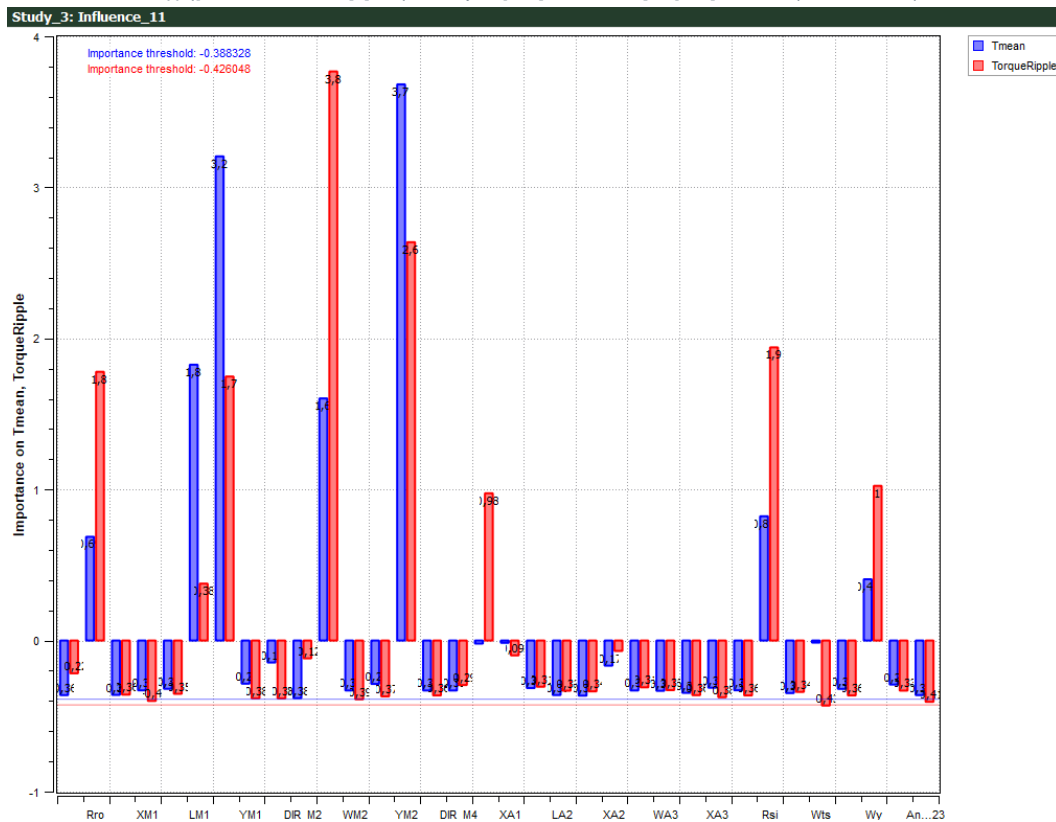
5.2.4 Επιρροή Παραμέτρων Βελτιστοποίησης

Σε όλες τις παραπάνω προσομοιώσεις που υλοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων μεταβάλλονταν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα. Η μεταβολή τους αυτή αλλάζει τις τιμές της απόδοσης, της ροπής και της κυμάτωσης της. Στη συνέχεια εμφανίζονται ορισμένα διαγράμματα τα οποία δείχνουν ποιες από τις μεταβλητές που μεταβάλλονται στην βελτιστοποίηση επηρεάζει περισσότερο πιο αποτέλεσμα αλλά και με ποιον τρόπο το επηρεάζει.

Φαίνεται λοιπόν στα παρακάτω Σχήματα 5.11, 5.12 πως οι μεταβλητές που επηρεάζουν περισσότερο την απόδοση είναι αυτές που σχετίζονται με την γεωμετρία του Μαγνήτη 2 και ιδιαίτερος η μεταβλητή X_{m2} που είναι η οριζόντια μετατόπιση του μαγνήτη αυτού. Είναι λογικό επομένως να υπάρξει και στη βελτιστοποίηση μία "ελευθερία" στην παράμετρο αυτή και γιαυτό ο Μαγνήτης 2 τμηματοποιείται κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης προκειμένου να βρεθεί και καλύτερο αποτέλεσμα. Όσον αφορά τώρα τη ροπή οι παράμετροι που την επηρεάζουν είναι κυρίως οι ακτίνες, του δρομέα η εξωτερική και του στάτη η εσωτερική καθώς και τα χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν τις γεωμετρίες των δύο μαγνητών (πάχος, μήκος και θέση).

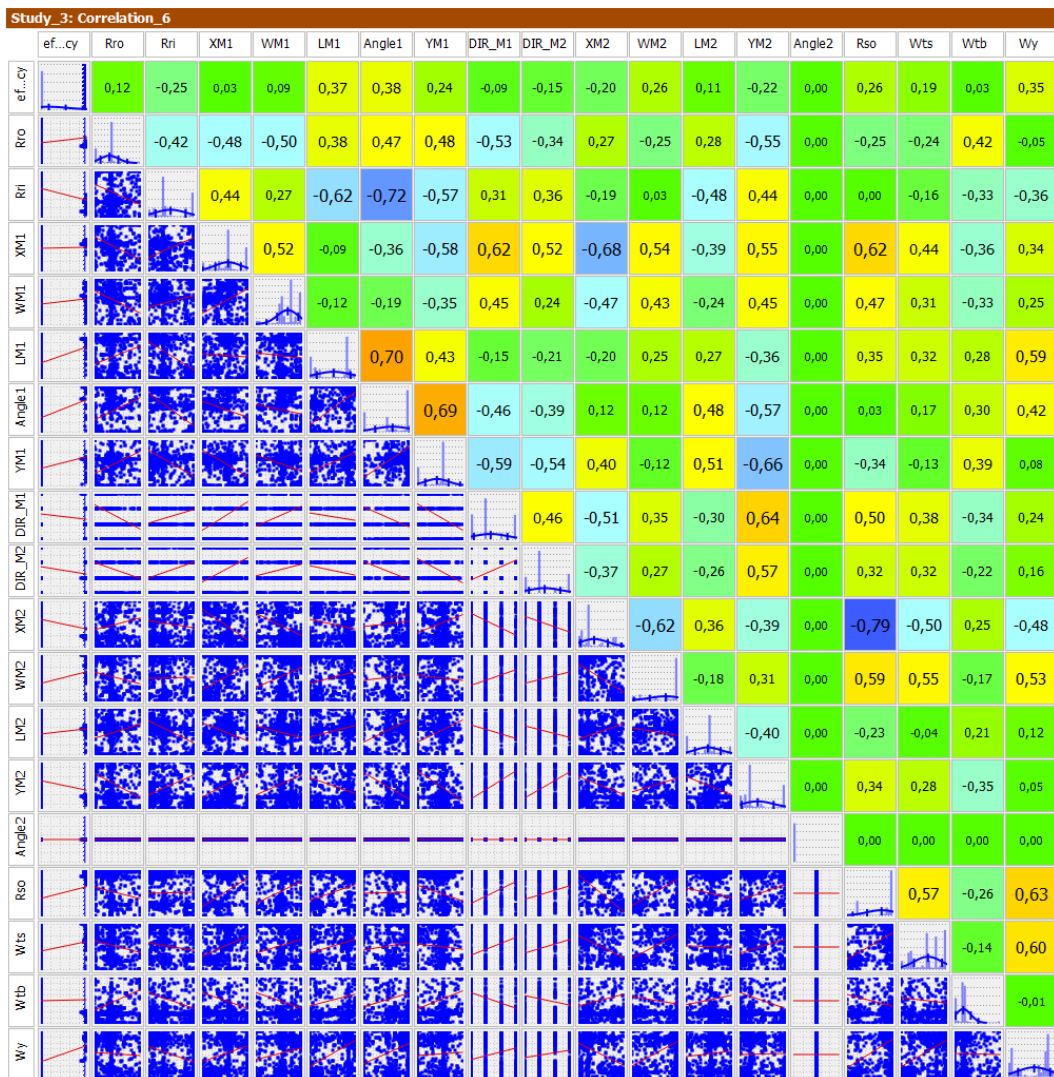


Σχήμα 5.11: Επιρροή των γεωμετρικών παραμέτρων στην απόδοση

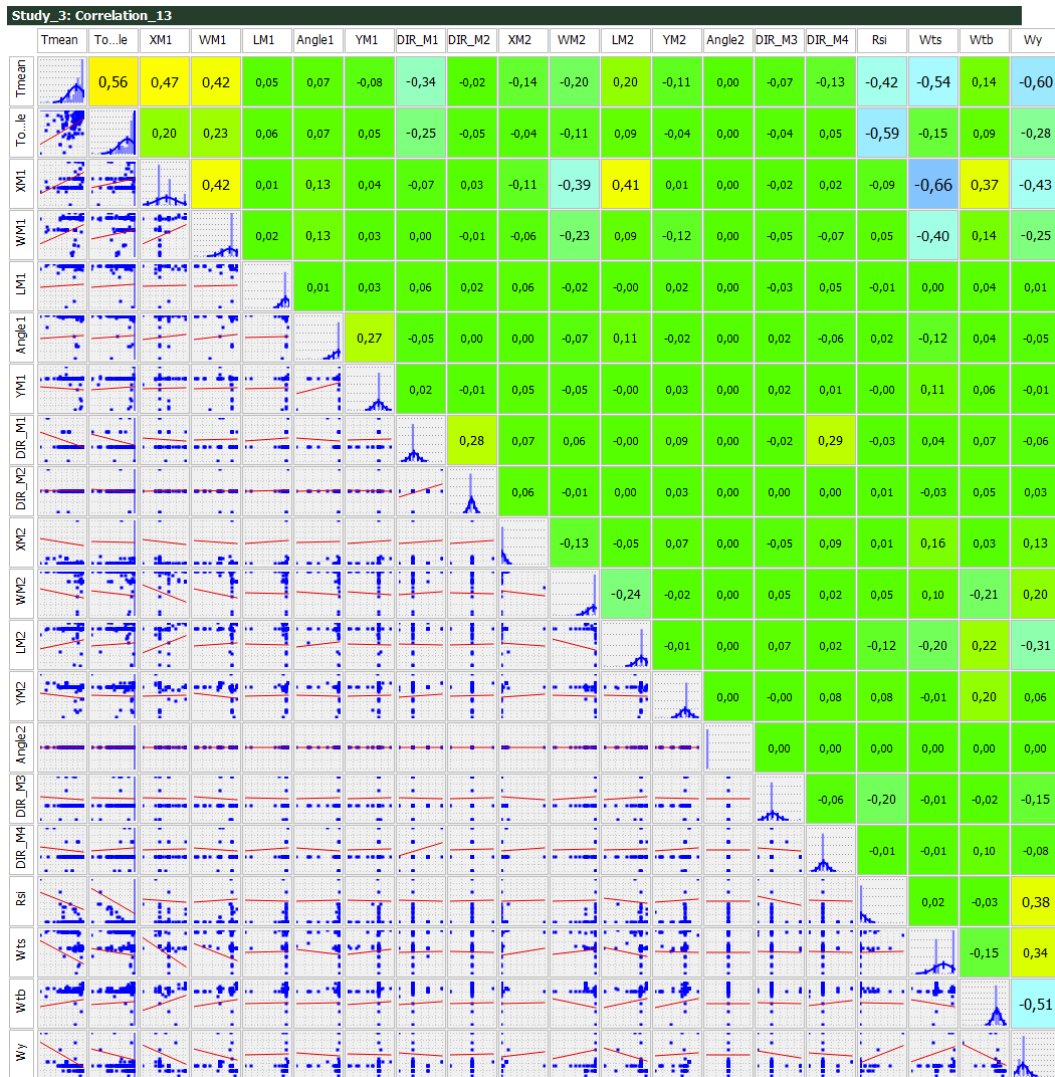


Σχήμα 5.12: Επιρροή των γεωμετρικών παραμέτρων στην ροπή και την κυμάτωση της

Όσον αφορά τώρα την συσχέτιση που έχουν οι παράμετροι γεωμετρίας που μεταβάλλονται με τις υπόλοιπες παραμέτρους αλλά και με τα αποτελέσματα που είναι η απόδοση και η ροπή εμφανίζεται στα δύο επόμενα διαγράμματα. Σημειώνεται πως από την κάτω διαγώνιο των πινάκων που ακολουθούν φαίνεται η σχέση μεταξύ κάθε φορά των δύο μεταβλητών ή αποτελεσμάτων ενώ πάνω από τη διαγώνιο η σχέση αυτή χαρακτηρίζεται από ένα νούμερο συσχέτισης. Επομένως στα παρακάτω Σχήματα 5.13, 5.14 φαίνεται κυρίως τα χαρακτηριστικά που έχουν την μεγαλύτερη επιρροή στα αποτελέσματα (Σχήματα 5.11, 5.12) με ποιόν τρόπο τα επηρεάζουν αλλά και πως μπορεί αυτά να επηρεάζονται από τη μεταβολή άλλων γεωμετρικών παραμέτρων. Η συσχέτιση αυτή πραγματοποιείται τόσο στην βελτιστοποίηση της απόδοσης όσο και στην βελτιστοποίηση της ροπής και κυμάτωσης όπως φαίνεται και στην συνέχεια.



Σχήμα 5.13: Συσχέτιση των γεωμετρικών παραμέτρων μεταξύ τους και με την απόδοση



Σχήμα 5.14: Συσχέτιση των γεωμετρικών παραμέτρων μεταξύ τους και με ροπή

5.3 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Κινητήρα Διπλής Στρώσης

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την βελτιστοποίηση φαίνονται στις παρακάτω εικόνες. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται κάποιες γραφικές αναπαραστάσεις που δείχνουν την πορεία της βελτιστοποίησης. Τα παρακάτω διαγράμματα αναπαριστούν την σχέση μεταξύ της χαρακτηριστικής συνάρτησης προς βελτιστοποίηση και των διαφορετικών γεωμετρικών κινητήρων που δημιουργούνται μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη λύση.

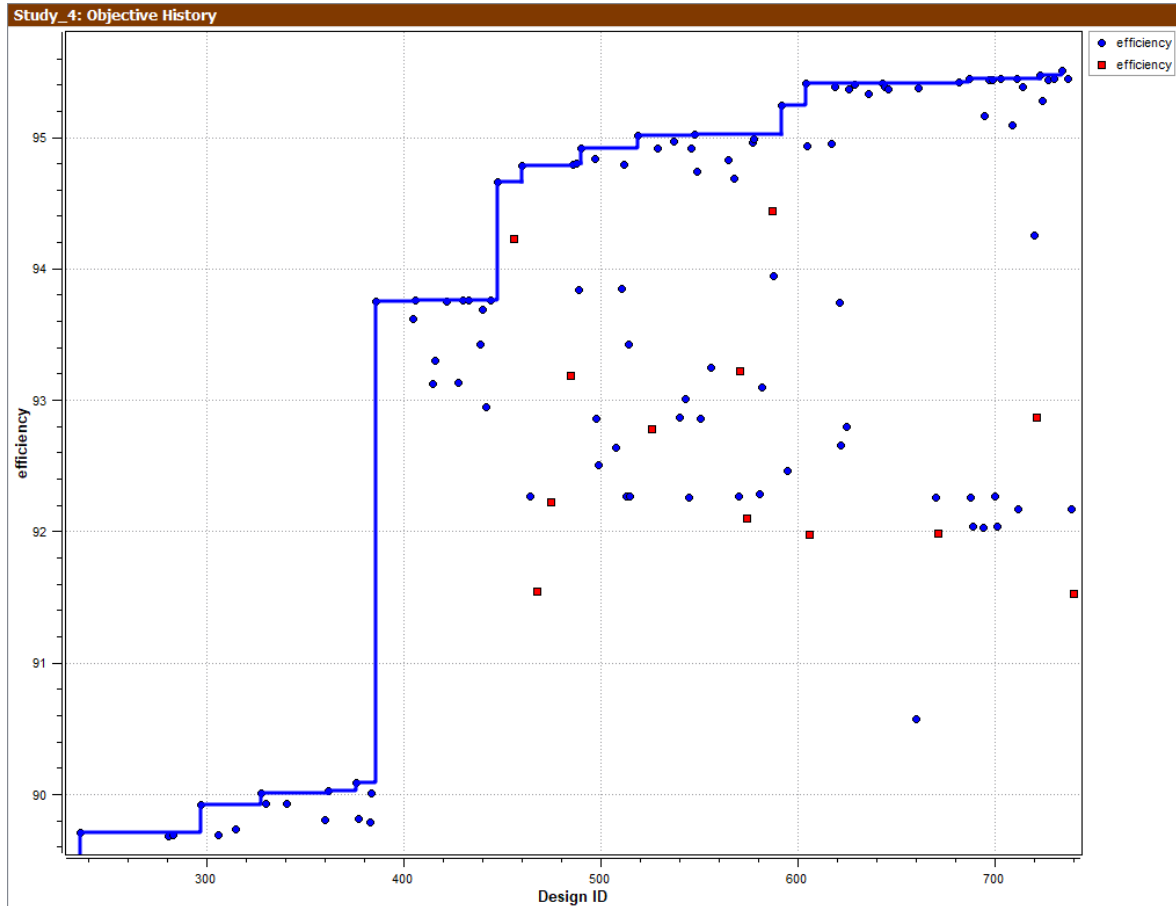
5.3.1 Κινητήρας 2 - Βελτιστοποίηση

Αρχικά χρησιμοποιείται όπως προαναφέρεται ο αλγόριθμος Nelder - Mead από όπου και προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα (Σχήμα 5.15). Η συνάρτηση που βελτιστοποιείται στο σημείο αυτό είναι η ακόλουθη:

$$f3(x) = \max(\text{efficiency}(\eta)) \quad (5.7)$$

για

$$T_{mean} > 40 \text{ N m}, T_{ripple} < 40\%, V_{rms} < 200 \text{ V}, THD < 29\% \quad (5.8)$$



Σχήμα 5.15: Βελτιστοποίηση με τον αλγόριθμο *Nelder-Mead* ως προς την απόδοση

Στην περίπτωση αυτή πραγματοποιείται μία ακόμα βελτιστοποίηση τα αποτελέσματα της οποίας εμφανίζονται στην συνέχεια. Στην βελτιστοποίηση αυτή μεγιστοποιείται ταυτόχρονα η ροπή και μειώνεται η κυμάτωση της. Υλοποιεί 3000 επαναλήψεις προκειμένου να βρει την βέλτιστη γεωμετρία και είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα.



Σχήμα 5.16: Βελτιστοποίηση Γεωμετρίας με Διπλή Στρώνση Τυλίγματος με τον υβριδικό αλγόριθμο SHERPA

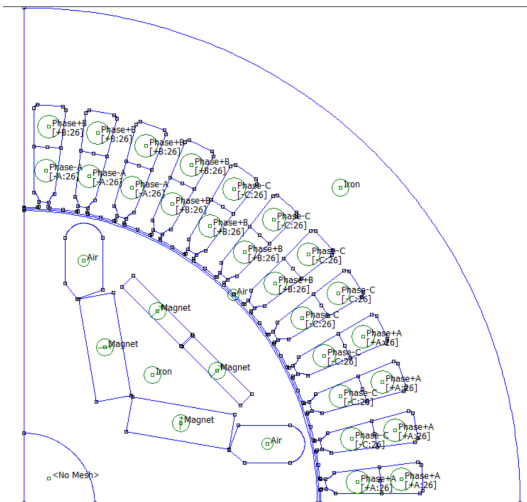
5.3.2 Επιλεγμένος Κινητήρας 2

Στο σημείο αυτό με βάση το αποτέλεσμα των βελτιστοποιήσεων που υλοποιήθηκαν προκειμένου ουσιαστικά να βρεθεί το σημείο Pareto δηλαδή η γεωμετρία εκείνης της μηχανής που ικανοποιεί κριτήρια που τέθηκαν όσον αφορά την απόδοση, την ροπή και την κυμάτωση της. Τα στοιχεία λοιπόν της γεωμετρίας αυτής είναι τα ακόλουθα (Πίνακας 5.6). Επισημαίνεται πως η φυσική σημασία των στοιχείων γεωμετρίας που καταγράφονται σημειώνεται σε προηγούμενη εικόνα του Σχήματος 4.4.

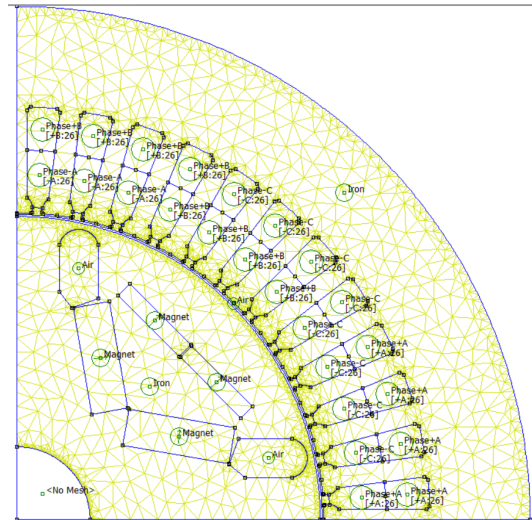
Η σχεδίαση του **Επιλεγμένου Κινητήρα 2** υλοποιείται στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων FEMM παρουσιάζεται εν συνεχεία (Σχήμα 5.17α). Γίνεται αντιληπτό και στο παρακάτω σχήμα πως η βέλτιστη γεωμετρία που προτάθηκε έχει τμηματοποιήσει τον Μαγνήτη 2(4.4) σε πάνω και κάτω από την ευθεία $y = x$ ενώ ο μεταξύ τους χώρος αποτελείται από σίδηρο. **Επομένως ο Επιλεγμένος Κινητήρας 2 έχει Τμηματικό Μαγνήτη 2 και Διπλή Στρώνση Τυλίγματος στον Στάτη.**

Γενικά Στοιχεία Σχεδίασης		
Όνομα Παραμέτρου	Φυσική Σημασία Παραμέτρου	Τιμές Παραμέτρου
Slots	Αριθμός Αυλάκων Κινητήρα	48
AWG	American Wire Gauge 3.40	14
Στοιχεία Σχεδίασης Δρομέα		
Όνομα Παραμέτρου	Φυσική Σημασία Παραμέτρου	Τιμές Παραμέτρου
Rro	Εξωτερική Ακτίνα Δρομέα	53.2
Rri	Εσωτερική Ακτίνα Δρομέα	12.3
Wm1	Πάχος Μαγνήτη 1	6.4
Lm1	Μήκος Μαγνήτη 1	18.9
Xm1	Οριζόντια Μετατόπιση Μαγνήτη 1	18.25
Ym1	Κάθετη Μετατόπιση Μαγνήτη 1	9.86
Angle1	Γωνία Στροφής Μαγνήτη 1	9.9
Wm2	Πάχος Μαγνήτη 2	2.88
Lm2	Μήκος Μαγνήτη 2	15.1
Xm2	Οριζόντια Μετατόπιση Μαγνήτη 2	24.2
Ym2	Κάθετη Μετατόπιση Μαγνήτη 2	17.8
Wair	Πάχος Τρύπας Αέρα	6.85
Lair	Μήκος Τρύπας Αέρα	8.2
Xair	Οριζόντια Μετατόπιση Τρύπας Αέρα	40
Yair	Κάθετη Μετατόπιση Τρύπας Αέρα	7.4
DirM1	Κατεύθυνση Μαγνήτισης Μαγνήτη 1	90
DirM2	Κατεύθυνση Μαγνήτισης Μαγνήτη 2	90
DirM3	Κατεύθυνση Μαγνήτισης Μαγνήτη 3	90
Στοιχεία Σχεδίασης Δρομέα		
Όνομα Παραμέτρου	Φυσική Σημασία Παραμέτρου	Τιμές Παραμέτρου
Wtb	Μεγάλο Πάχος Δοντιού	3.72
Wts	Μικρό Πάχος Δοντιού	5.72
Wy	Πάχος Σώματος Στάτη	17.6

Πίνακας 5.6: Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Επιλεγμένου Κινητήρα 2



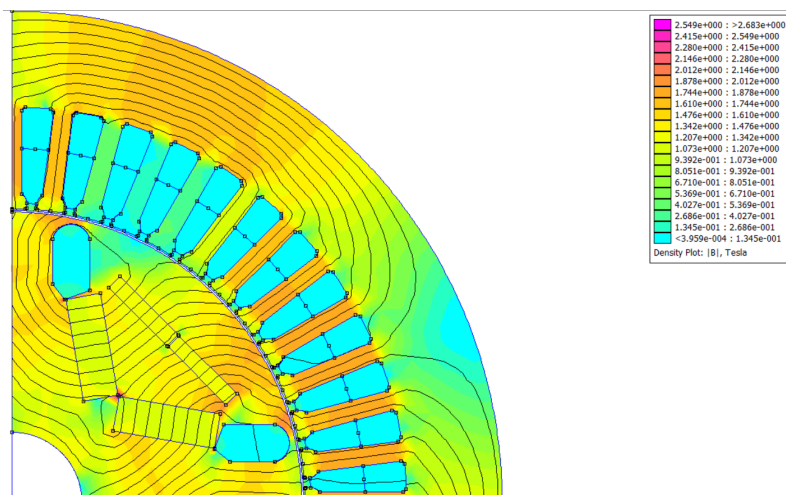
(α) Σχεδίαση Πόθου Επιλεγμένου Κινητήρα 2 στο λογαριθμικό Πεπερασμένων Στοιχείων FEMM



(β') Τριγωνικό Πλέγμα Πόθου Επιλεγμένου Κινητήρα 2 στο λογαριθμικό Πεπερασμένων Στοιχείων FEMM

Σχήμα 5.17: Σχεδίαση και Πλέγμα Επιλεγμένου Κινητήρα 2

Το μαγνητικό πεδίο της παραπάνω σχεδίασης σε μία συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας όπου $J = 4 \text{ A mm}^{-2}$ και $\gamma = 0$ παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 5.18.



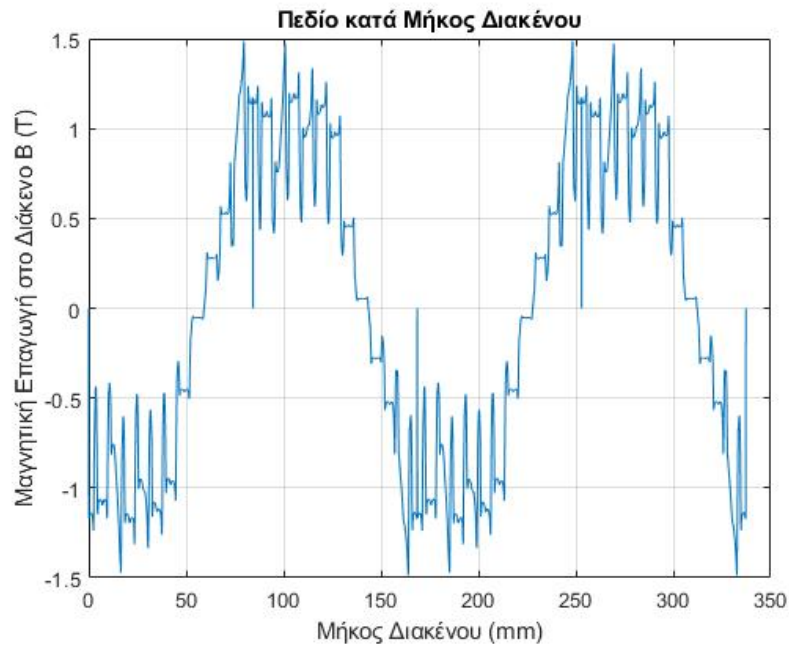
Σχήμα 5.18: Μαγνητικό Πεδίο Επιλεγμένου Κινητήρα 2

Αποτελέσματα Ανάλυσης με Σταθερό δρομέα του Επιλεγμένου Κινητήρα 2

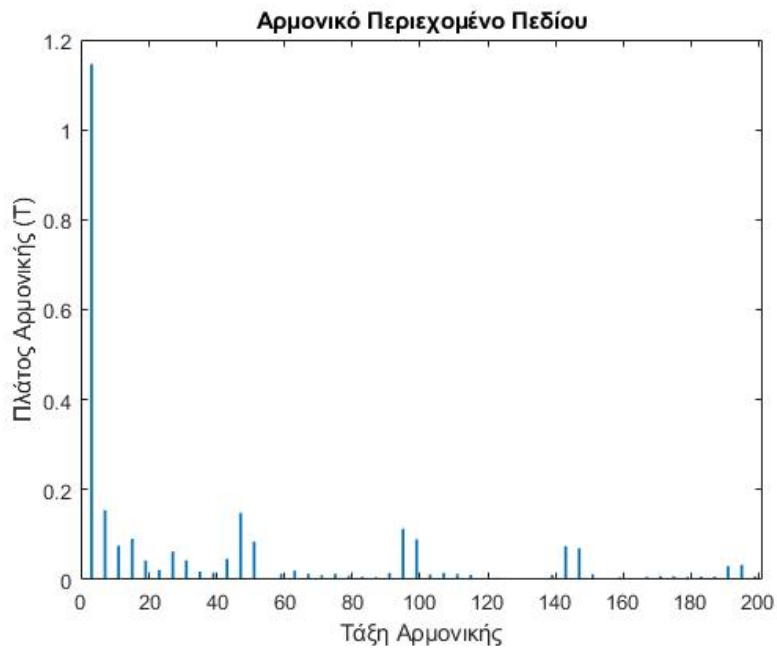
Η καμπύλη B -length που δείχνει ουσιαστικά την κατανομή της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο εμφανίζεται στην συνέχεια (Σχήμα 5.19) για την παραπάνω κατάσταση λειτουργίας του κινητήρα με αυτό το μαγνητικό πεδίο που φαίνεται στο Σχήμα 5.18. Το πεδίο αυτό παρουσιάζει μία ημιτονικότητα έχοντας πλήθος αρμονικών συνιστωσών. Αυτές οφείλονται κυρίως στο τύλιγμα το οποίο και εισάγει κάποιο αρμονικό περιεχόμενο αλλά και στην αλληλουχία δοντιού αύλακας του στάτη (tooth - slot harmonics).

Στην συνέχεια από ανάλυση Fourier φαίνεται το αρμονικό περιεχόμενο του πεδίου (Σχήμα 5.20). Αυτή η αρμονική συνιστώσα που κυριαρχεί είναι και η θεμελιώδης, ενώ τα πλάτη των υπολοίπων είναι μικρότερα της. Αυτό είναι και ένα από τα πλεονεκτήματα από τη χρήση κατανεμημένου τυλίγματος και μάλιστα διπλής στρώσης, το οποίο

βοηθά σημαντικά στην ημιτονικότητα του πεδίου. Από το πεδίο απουσιάζουν οι ζυγές αρμονικές, καθώς υπάρχει περιοδικότητα ημίσεος κύματος.

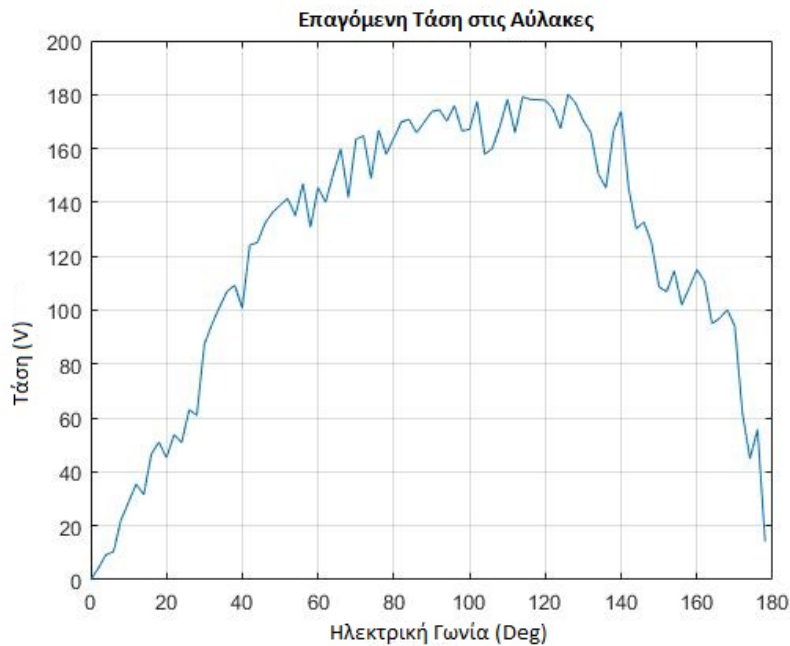


Σχήμα 5.19: Πεδίο στο διάκενο του *Επιβεγμένου Κινητήρα 2* κατά μήκος αυτού



Σχήμα 5.20: Αρμονικό περιεχόμενο πεδίου στο διάκενο του *Επιβεγμένου Κινητήρα 2*

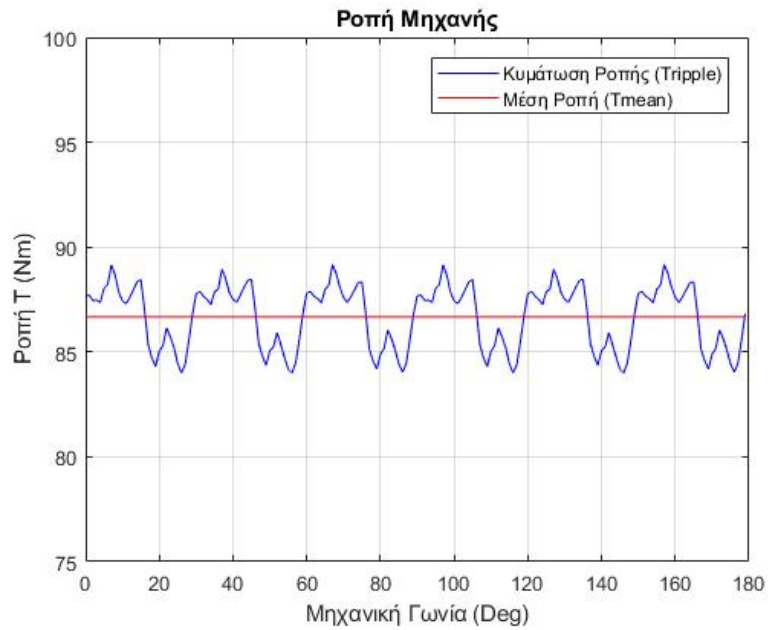
Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται επίσης το διάγραμμα τάσης της εν λόγω μηχανής συναρτήσει της ηλεκτρικής γωνίας στα τυλίγματα του στάτη.



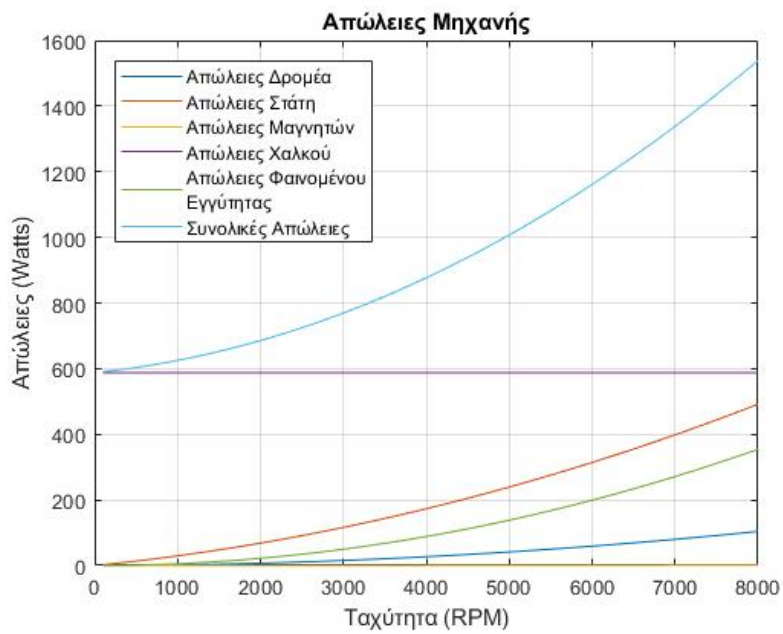
Σχήμα 5.21: Επαγόμενη αντί-ΗΕΔ

Αποτελέσματα Ανάλυσης Σύγχρονης Περιστροφής Στάτη Δρομέα Επιλεγμένου Κινητήρα 2

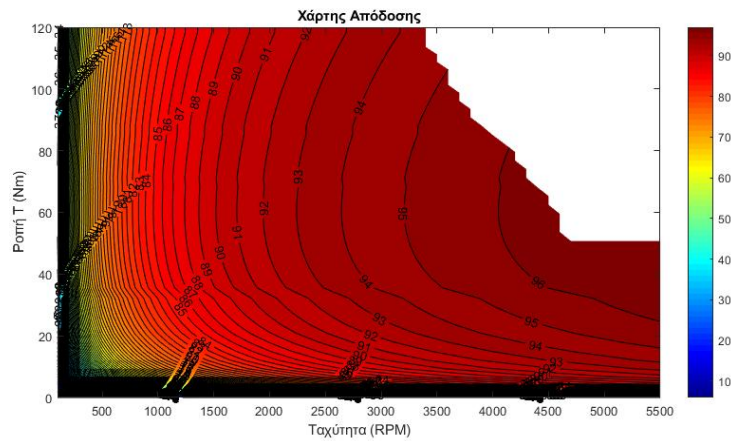
Από την σύγχρονη περιστροφή προκύπτουν οι γραφικές της διακύμανσης της ροπής συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής (Σχήμα 5.22) αλλά και των απωλειών συναρτήσει επίσης των διάφορων ταχυτήτων της μηχανής (Σχήμα 5.23). Επίσης προκύπτει ένας χάρτης απόδοσης (Σχήμα 5.24), ο οποίος υλοποιείται ως εξής. Δίνονται διάφορες τιμές ρεύματος εντός των ορίων που επιτρέπει το καλώδιο και υπολογίζεται για κάθε μία από αυτές η ροπή και η απόδοση με τον τρόπο που περιγράφεται στην ενότητα 3.5.3. Επίσης υπολογίζεται η τάση για κάθε μία από τις ταχύτητες από 0 έως 5500 ΣΑΛ και όσες είναι άνω των 200 V το σημείο του χάρτη δεν λαμβάνει τιμή που να αφορά την ροπή και την απόδοση. Με βάση αυτόν επιλέγεται εκείνο το σημείο λειτουργίας ($n = 3000$ ΣΑΛ) όπου βελτιστοποιείται η γεωμετρία του κινητήρα.



Σχήμα 5.22: Διακύμανση Ροπής Επιλεγμένου Κινητήρα 2



Σχήμα 5.23: Απώλειες Επιλεγμένου Κινητήρα 2



Σχήμα 5.24: Χάρτης Απόδοσης Επιλεγμένου Κινητήρα 2

Επομένως στην ταχύτητα $n = 3000$ ΣΑΛ για $J = 4 \text{ A mm}^{-2}$ προκύπτουν τα χαρακτηριστικά για τον **Επιλεγμένου Κινητήρα 2** που παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 5.4:

Αποτελέσματα για Επιλεγμένο Κινητήρα 2

Απόδοση η (%)	97.25
Μέση Ροπή T_{mean} (N m)	86.67
Κυμάτωση Ροπής T_{ripple} (%)	5.97
Επίδοση P_{out} (kW)	17.85
Αρμονικό Περιεχόμενο THD (%)	22.84
Ρεύμα δ άξονα I_d (A)	0
Ρεύμα χ άξονα I_q (A)	24.31
Τάση V_{rms} (V)	177
Τυλίγματα Ανά Φάση (<i>turns</i>)	26

Πίνακας 5.7: Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Επιλεγμένου Κινητήρα 2

Στην συνέχεια στον Πίνακα 5.8 υλοποιείται και μία σύγκριση των αποτελεσμάτων του **Επιλεγμένου Κινητήρα 2** με αυτά του **Κινητήρα 1**.

Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης Απόδοσης 1			
Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Κινητήρα	Πριν τη Βελτιστοποίηση	Μετά τη Βελτιστοποίηση	Σύγκριση Αύξηση η Μείωση (%)
Απόδοση η (%)	89.20	97.25	Αύξηση κατά 9.03 %
Μέση Ροπή T_{mean}(N m)	44.20	86.67	Αύξηση κατά 96 %
Κυμάτωση Ροπής T_{ripple} (%)	41.00	5.97	Μείωση κατά 85.4 %
Επίδοση P_{out}(kW)	17.20	17.85	Αύξηση κατά 3.7 %
Αρμονικό Περιεχόμενο THD (%)	25.20	22.84	Μείωση κατά 9.3 %
Τάση V_{rms}(V)	184	177	Μείωση κατά 3.8 %

Πίνακας 5.8: Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Επιλεγμένου Κινητήρα 2 μετά τη Βελτιστοποίηση Απόδοσης, Ροπής, Κυμάτωσης Ροπής

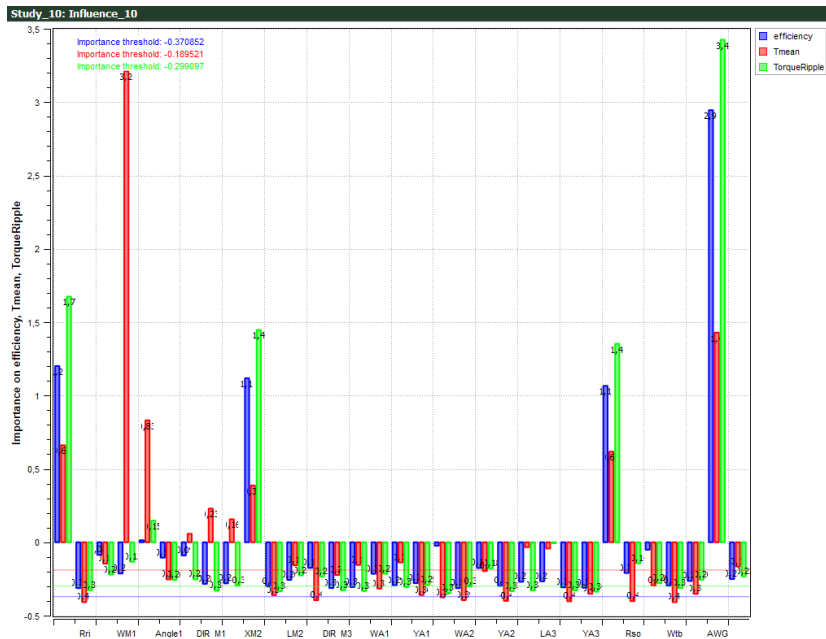
5.3.3 Επιρροή Παραμέτρων Βελτιστοποίησης

Σε όλες τις παραπάνω προσομοιώσεις που υλοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης μεταβάλλονταν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα. Η μεταβολή τους αυτή αλλάζει τις τιμές της απόδοσης, της ροπής και της κυμάτωσης της. Στη συνέχεια εμφανίζονται ορισμένα διαγράμματα τα οποία δείχνουν ποιες από τις μεταβλητές που μεταβάλλονται στην βελτιστοποίηση επηρεάζει περισσότερο πιο αποτέλεσμα αλλά και με ποιον τρόπο το επηρεάζει.

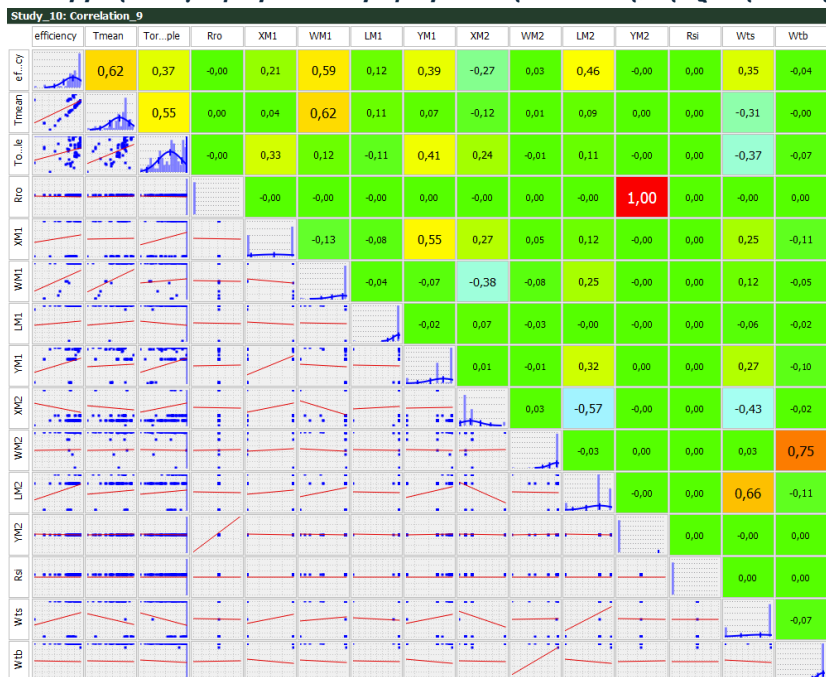
Φαίνεται λοιπόν στο παρακάτω Σχήμα 5.25 πως οι μεταβλητές που επηρεάζουν περισσότερο την απόδοση είναι αυτές που σχετίζονται με την γεωμετρία του Μαγνήτη 2 και ιδιαίτερος η μεταβλητή X_{m2} που είναι η οριζόντια μετατόπιση του μαγνήτη αυτού. Είναι λογικό επομένως να υπάρξει και στη βελτιστοποίηση μία "ελευθερία" στην παράμετρο αυτή και γιαυτό ο Μαγνήτης 2 τμηματοποιείται κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης προκειμένου να βρεθεί και καλύτερο αποτέλεσμα. Όσον αφορά τώρα τη ροπή οι παράμετροι που την επηρεάζουν είναι κυρίως οι ακτίνες του δρομέα η εξωτερική και του στάτη η εσωτερική καθώς και τα χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν τις γεωμετρίες των δύο μαγνητών (πάχος, μήκος και θέση).

Σε σχέση τώρα με την συσχέτιση που έχουν οι παράμετροι γεωμετρίας που μεταβάλλονται με τις υπόλοιπες παραμέτρους αλλά και με τα αποτελέσματα που είναι η απόδοση

και η ροπή εμφανίζεται σε επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 5.26). Σημειώνεται πως από την κάτω διαγώνιο των πινάκων που ακολουθούν φαίνεται η σχέση μεταξύ κάθε φορά των δύο μεταβλητών ή αποτελεσμάτων ενώ πάνω από τη διαγώνιο η σχέση αυτή χαρακτηρίζεται από ένα νούμερο συσχέτισης. Επομένως στο παρακάτω Σχήμα 5.26 φαίνεται κυρίως τα χαρακτηριστικά που έχουν την μεγαλύτερη επιρροή στα αποτελέσματα (Σχήμα 5.25) με ποιόν τρόπο τα επηρεάζουν αλλά και πως μπορεί αυτά να επηρεάζονται από τη μεταβολή άλλων γεωμετρικών παραμέτρων. Η συσχέτιση αυτή πραγματοποιείται τόσο στην βελτιστοποίηση της απόδοσης όσο και στην βελτιστοποίηση της ροπής και κυμάτωσης όπως φαίνεται και στην συνέχεια.



Σχήμα 5.25: Επιρροή των γεωμετρικών παραμέτρων στην απόδοση, την ροπή και την κυμάτωση



Σχήμα 5.26: Συσχέτιση των γεωμετρικών και λειτουργικών παραμέτρων

5.4 Συγκριτική Μελέτη Κινητήρων

Στο σημείο αυτό υλοποιείται μία σύγκριση μεταξύ κάποιων από τους κινητήρες που υλοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Η σύγκριση γίνεται μεταξύ κάποιων λειτουργικών χαρακτηριστικών και δημιουργείται έτσι το διάγραμμα Taguchi με βάση το οποίο γίνεται και κατανοητή η επιλογή των **Επιλεγμένων Κινητήρων** που προκύπτουν από τις βελτιστοποιήσεις και εμφανίζονται παραπάνω. Ουσιαστικά οι Κινητήρες αυτοί αποτελούν τα σημεία Pareto της βελτιστοποίησης καθώς από τον ορισμό του σημείου αυτού είναι οι βέλτιστες γεωμετρίες καθώς εντός των ορίων των κριτηρίων δεν υπάρχουν άλλες που να κυριαρχούν επί αυτών.

Πέρα λοιπόν από τους τέσσερις κινητήρες που αναγράφονται και αναλύονται κατά τη διάρκεια της παρούσας διπλωματικής, δηλαδή τους:

- **Κινητήρας 1:** Πρωταρχικός Κινητήρας με Ολόσωμο Μαγνήτη 2 και Απλή Στρώση Τυλίγματος.
- **Κινητήρας 2:** Κινητήρας με τα Ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με τον Κινητήρα 1, δηλαδή με Ολόσωμο Μαγνήτη 2, έχοντας όμως Διπλή Στρώση Τυλίγματος.
- **Επιλεγμένος Κινητήρας 1:** Κινητήρας που επιλέχθηκε μετά την διαδικασία βελτιστοποίησης της απόδοσης, της ροπής και της κυμάτωσης με πρωταρχικό τον Κινητήρα 1. Είναι κινητήρας με Τμηματοποιημένο Μαγνήτη 2 και Απλή Στρώση Τυλίγματος.
- **Επιλεγμένος Κινητήρας 2:** Κινητήρας που επιλέχθηκε μετά την διαδικασία βελτιστοποίησης της απόδοσης, της ροπής και της κυμάτωσης με πρωταρχικό τον Κινητήρα 2. Είναι κινητήρας με Τμηματοποιημένο Μαγνήτη 2 και Διπλή Στρώση Τυλίγματος.

στην σύγκριση αυτή χρησιμοποιούνται και κινητήρες που υλοποιούνται κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης προκειμένου να γίνει αντιληπτή η επιλογή των παραπάνω. Ορισμένοι από τους κινητήρες που χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση εμφανίζονται στις ενότητες 5.2, 5.3, είτε στα διαγράμματα που δείχνουν την πορεία της βελτιστοποίησης είτε στους πίνακες που υλοποιείται μία σύγκριση με την αρχική μηχανή.

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά ορισμένων κινητήρων.

	Κινητήρας 1 (Ολόσωμος Μαγνήτης και Μονή Στρώση)	Κινητήρας 1a	Κινητήρας 1b	Επιλεγμένος Κινητήρας 1 (Τμηματικός Μαγνήτης και Μονή Στρώση)
Απόδοση η (%)	89,19	95,38	96,53	96,41
Επίδοση P_{out} (kW)	17,2	10,27	11,58	17,52
THD (%)	25,2	21,4	25,21	23,45
T_{mean} (Nm)	44,2	32,69	33,7	55,81
T_{ripple} (%)	41	18	16,86	15,97
V(V)	184	199	157	167

Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης για Μονή Στρώση

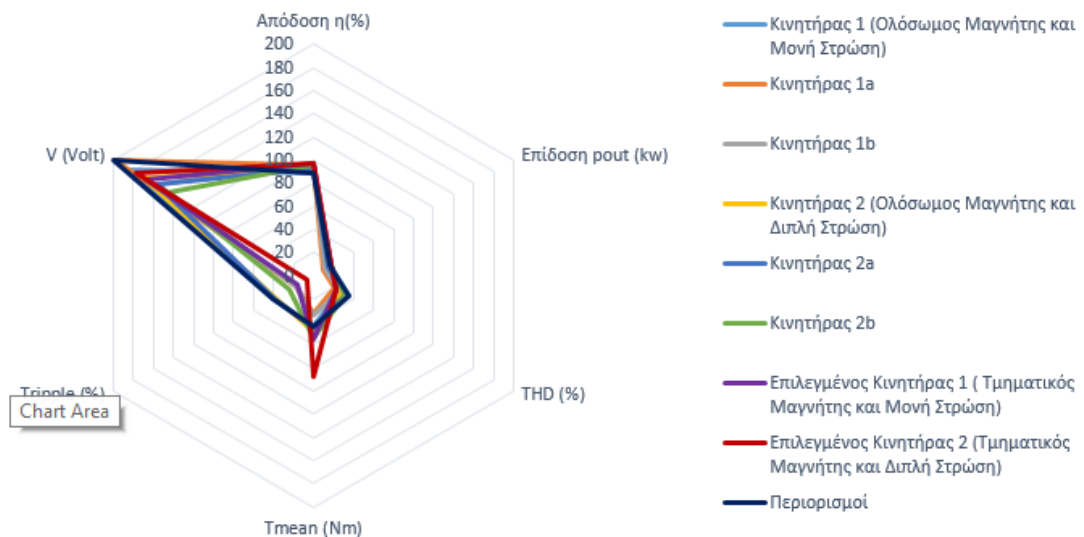
	Κινητήρας 2 (Ολόσωμος Μαγνήτης και Διπλή Στρώση)	Κινητήρας 2a	Κινητήρας 2b	Επιλεγμένος Κινητήρας 2 (Τμηματικός Μαγνήτης και Διπλή Στρώση)
Απόδοση η(%)	92,94	93,57	96,03	97,25
Επίδοση P_{out}(kW)	15,7	14	16,98	17,85
THD (%)	28,52	32,1	32,61	22,84
T_{mean}(N m)	47,95	45,08	54,04	86,68
T_{ripple} (%)	38,11	39,25	23,45	5,97
V(V)	169	157	145	177

Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης για Διπλή Στρώση

Οι δύο παραπάνω πίνακες αναπαριστώνται σε κοινό διάγραμμα προκειμένου να επιλεγεί ο καλύτερος κινητήρας. Σημειώνεται πως τα παραπάνω λειτουργικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση έχουν διαφορετική συμπεριφορά όσον αφορά τη βελτιστοποίησή τους. Δηλαδή σε μία μηχανή ζητείται:

- Αύξηση της απόδοσης η (%)
- Αύξηση της επίδοσης P_{out} (kW)
- Μείωση του THD (%)
- Αύξηση της μέσης ροπής T_{mean} (N m)
- Μείωση της κυμάτωσης ροπής T_{ripple} (%)
- Μείωση της τάσης V_{rms} (V)

Αναπαράσταση Αποτελεσμάτων



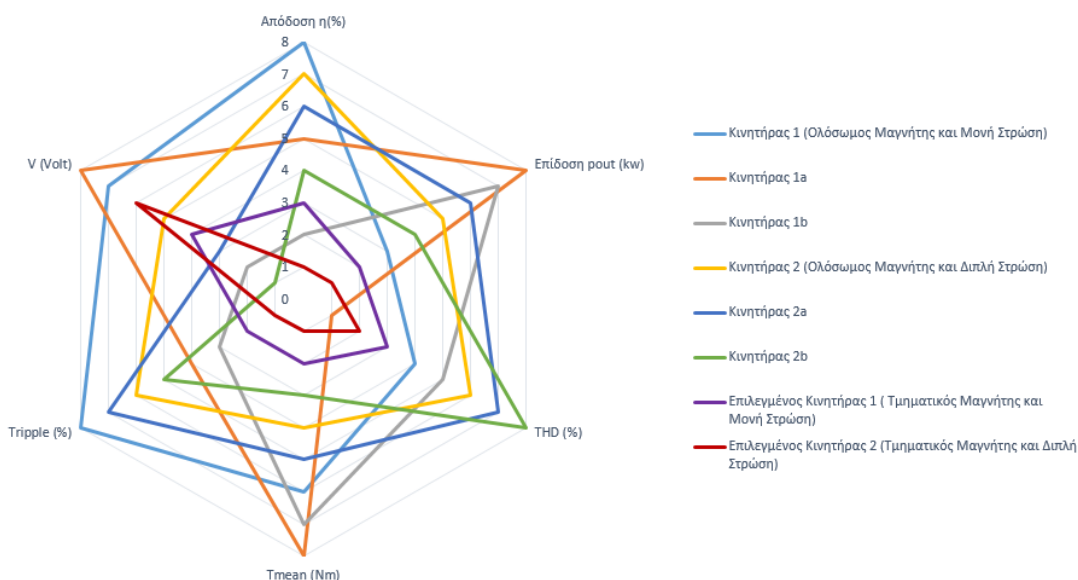
Σχήμα 5.27: Διάγραμμα Taguchi

Από το παραπάνω διάγραμμα και με βάση αυτά που ζητούνται να βελτιστοποιηθούν στον κινητήρα επιλέγεται ως καλύτερος ο Επιλεγμένος Κινητήρας 2 με Τμηματικό Μα-

γνήτη 2 και Διπλή Στρώση Τυλίγματος στον στάτη, διότι έχει μεγαλύτερη απόδοση, μεγαλύτερη ροπή και μικρότερη κυμάτωση. Αν είχαν επιλεγθεί κάποια άλλα κριτήρια είναι πιθανή η επιλογή μιας διαφορετικής γεωμετρίας.

Για να γίνει πιο κατανοητή η επιλογή συγκριτικά με τους κινητήρες των οποίων τα λειτουργικά χαρακτηριστικά εμφανίζονται στους παραπάνω Πίνακες 5.9, 5.10 γίνεται η εξής ταξινόμηση. Σε κάθε λειτουργικό χαρακτηριστικό ο κινητήρας με την καλύτερη τιμή λαμβάνει την τιμή 1 και αυτός με την χειρότερη την τιμή 8. Οι ενδιάμεσες τιμές δίνονται ανάλογα. Επομένως καλύτερος είναι ο κινητήρας εκείνος που τα στοιχεία του βρίσκονται πιο κοντά στο κέντρο του παρακάτω διαγράμματος (Σχήμα 5.27). Για παράδειγμα αυτός που έχει την μεγαλύτερη απόδοση θα γίνει η τιμή της απόδοσης 1, αυτός με τη δεύτερη καλύτερη 2 κ.ο.κ. Στην κυμάτωση ροπής όμως που επιζητήτε η μείωση, η ελάχιστη κυμάτωση θα πάρει την τιμή 1 κ.ο.κ.

Διαγραμμα Αποτελεσμάτων με Διαβάθμιση



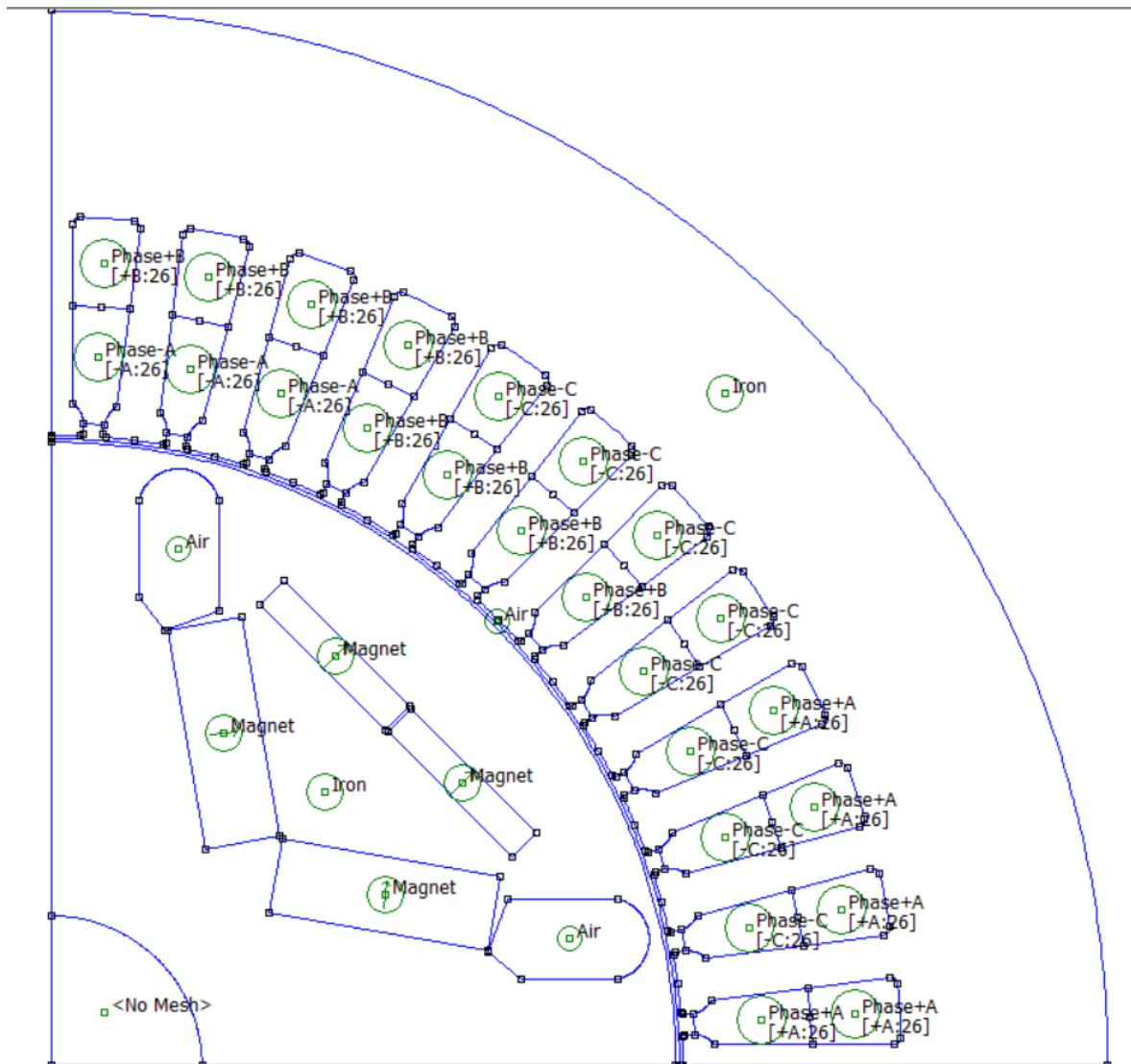
Σχήμα 5.28: Κανονικοποιημένο Διάγραμμα Σχήματος 5.27

5.5 Χαρακτηριστικά Τελικής Επιλογής Κινητήρα

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του Κινητήρα που επιλέγεται από όλους που υλοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης. Πρόκειται για έναν **Κινητήρα Εσωτερικά Μόνιμων Μαγνητών Διπλής Στρώσης Τύπου V-I με Τμηματοποιημένο τον Δεύτερο Μαγνήτη και Διπλή Στρώση Τυλίγματος Στάτη**. Τα χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.11 και η σχεδίαση ενός πόλου του στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων FEMM φαίνεται στο Σχήμα 5.29.

Γενικά Στοιχεία Σχεδίασης				
Όνομα Παραμέτρου	Φυσική Σημασία Παραμέτρου	Τιμές Παραμέτρου	Τιμές Ιου Κινητήρα	Διαφορά Τιμών (%)
Poles	Αριθμός Πόλων Κινητήρα	4	4	-
Slots	Αριθμός Αυλάκων Κινητήρα	48	48	-
AWG	American Wire Gauge 3.40	14	14	-
lg	Πάχος Διακένου	0.6	0.6	-
L	Ενεργό Μήκος Κινητήρα	120	120	-
m	Αριθμός Φάσεων	3	3	-
Στοιχεία Σχεδίασης Δρομέα				
Όνομα Παραμέτρου	Φυσική Σημασία Παραμέτρου	Τιμές Παραμέτρου	Τιμές Ιου Κινητήρα	Διαφορά Τιμών (%)
Rro	Εξωτερική Ακτίνα Δρομέα	53.2	53	0.37 %
Rri	Εσωτερική Ακτίνα Δρομέα	12.3	14	12.14 %
Wm1	Πάχος Μαγνήτη 1	6.4	4.5	42.2 %
Lm1	Μήκος Μαγνήτη 1	18.9	16.8	12.5 %
Xm1	Οριζόντια Μετατόπιση Μαγνήτη 1	18.25	18	1.38 %
Ym1	Κάθετη Μετατόπιση Μαγνήτη 1	9.86	9	9.5 %
Angle1	Γωνία Στροφής Μαγνήτη 1	9.9	8	23.75 %
Wm2	Πάχος Μαγνήτη 2	2.88	1.24	132 %
Lm2	Μήκος Μαγνήτη 2	15.1	16.4	7.92 %
Xm2	Οριζόντια Μετατόπιση Μαγνήτη 2	24.2	27.7932	12.92 %
Ym2	Κάθετη Μετατόπιση Μαγνήτη 2	17.8	21	15.23 %
Wair	Πάχος Τρύπας Αέρα	6.85	3.84	78.38 %
Lair	Μήκος Τρύπας Αέρα	8.2	9	8.8 %
Xair	Οριζόντια Μετατόπιση Τρύπας Αέρα	40	37.1178	7.76%
Yair	Κάθετη Μετατόπιση Τρύπας Αέρα	7.4	9	17.7 %
DirM1	Κατεύθυνση Μαγνήτισης Μαγνήτη 1	90	90	-
DirM2	Κατεύθυνση Μαγνήτισης Μαγνήτη 2	90	90	-
DirM3	Κατεύθυνση Μαγνήτισης Μαγνήτη 3	90	90	-
Στοιχεία Σχεδίασης Δρομέα				
Όνομα Παραμέτρου	Φυσική Σημασία Παραμέτρου	Τιμές Παραμέτρου	Τιμές Ιου Κινητήρα	Διαφορά Τιμών (%)
Wtb	Μεγάλο Πάχος Δοντιού	5.72	6	4.6 %
Wts	Μικρό Πάχος Δοντιού	3.72	3	24 %
Wy	Πάχος Σώματος Στάτη	17.6	12	46.6 %
Rsi	Εσωτερική Ακτίνα Στάτη	Pro+lg=53.8	53.6	0.37 %
Rso	Εξωτερική Ακτίνα Στάτη	90	90	-
Λειτουργικά Χαρακτηριστικά Κινητήρα				
Όνομα Χαρακτηριστικού	Φυσική Σημασία Χαρακτηριστικού	Αποτέλεσμα	Αποτέλεσμα Ιου Κινητήρα	Διαφορά Τιμών (%)
Id	Ρεύμα d - άξονα	0	0	-
Iq	Ρεύμα q - άξονα	24.31	14.97	-
turns	Τυλίγματα ανά φάση	26	39	-
η (%)	Απόδοση	97.25	89.2	9.03 %
Tmean (Nm)	Μέση Ροπή	86.67	44.2	96 %
Tripple (%)	Κυμάτωση Ροπής	5.97	41	85.4 %
Pout (kW)	Επίδοση	17.85	17.2	3.7 %
THD	Αρμονικό Περιεχόμενο	22.84	25.2	9.3 %
Vrms	Επαγόμενη Τάση Στάτη	177	184	3.8 %

Πίνακας 5.11: Χαρακτηριστικά Τετρίτου Κινητήρα και Σύγκριση με τον Πρώτο Κινητήρα



Σχήμα 5.29: Τελική Σχεδίαση Κινητήρα

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

6.1 Συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία είναι:

- Η μεθοδολογία Σχεδίασης Κινητήρα Εσωτερικών Μονίμων Μαγνητών που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να βελτιστοποιήσει εύκολα οποιαδήποτε άλλη διαμόρφωση εσωτερικών μονίμων μαγνητών.
- Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν αναδείχθηκε ότι υπάρχουν γεωμετρικές παράμετροι που επηρεάζουν περισσότερο τα σημαντικά κριτήρια (απόδοση, ροπή) και μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο αυτές κατά τη βελτιστοποίηση. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να μειωθεί σημαντικά ο υπολογιστικός χρόνος επίλυσης του προβλήματος.
- Τα τυλίγματα διπλής στρώσης υπερτερούν σε σχέση με αυτά της απλής σε όλες τις διαμορφώσεις που εξετάστηκαν, καθώς αυξάνουν την απόδοση και μειώνουν τις ανώτερες αρμονικές του πεδίου. Η αύξηση της απόδοσης οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι με τη διπλή στρώση μειώνονται οι απώλειες χαλκού καθώς μειώνεται το μήκος των αγωγών του τυλίγματος.
- Ο αριθμός των ελιγμάτων των τυλιγμάτων επηρεάζει σημαντικά τον χάρτη απόδοσης της μηχανής στις περιοχές των υψηλών και χαμηλών ταχυτήτων με αποτέλεσμα η ορθή επιλογή του να συνδέεται με τον κύκλο φόρτισης.
- Διαπιστώθηκε μεγάλη αλλαγή στην απόδοση της μηχανής σε διαφορετικές τιμές της μεταβλητής που μετακινεί τον μαγνήτη 2 του κινητήρα. Για τον λόγο αυτόν προτείνεται η τμηματοποίηση του.
- Η κυμάτωση ροπής επηρεάζεται ιδιαίτερα από την απλή ή διπλή στρώση του τυλίγματος του στάτη με αποτέλεσμα να είναι πλεονεκτική η διπλή στρώση.
- Η βελτιστοποίηση με τον αλγόριθμο Nelder - Mead συγκλίνει πιο γρήγορα από τις υπόλοιπες τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν καθώς εκτελεί λιγότερες επαναλήψεις.

- Μέσω της μεθοδολογίας βελτιστοποίησης που υλοποιήθηκε είναι δυνατόν ο χρήστης αν επιλέξει άλλα κριτήρια για την βελτιστοποίηση του κινητήρα να διευκολυνθεί στην επιλογή της βέλτιστης διαμόρφωσης από το διάγραμμα Taguchi.
- Οι ποσοστιαίες βελτιώσεις των λειτουργικών χαρακτηριστικών του τελικού κινητήρα που προτείνεται μετά από τη βελτιστοποίηση γεωμετρίας σε σχέση με εκείνα του πρωταρχικού που διαμορφώθηκε κατά την προκαταρκτική σχεδίαση είναι ικανοποιητικές για τα κριτήρια που τέθηκαν προς βελτιστοποίηση.

6.2 Πρωτότυπη Συνεισφορά Εργασίας

Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας τα σημεία επιστημονικής συνεισφοράς της είναι τα εξής:

- Αναπτύχθηκε κατάλληλα παραμετροποιημένο μοντέλο που αναπαριστά και επιλύει με ικανοποιητική ακρίβεια και ταχύτητα σύγχρονες μηχανές πολλαπλών μονίμων μαγνητών.
- Διαμορφώθηκε αλγόριθμος που επιτρέπει την αυτόματη εύρεση του βέλτιστου σημείου λειτουργίας σε κάθε νέα γεωμετρία μηχανής για των υπολογισμό όλων των εξεταζομένων χαρακτηριστικών.
- Υιοθετήθηκε πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση εφαρμόζοντας τεχνικές με μέτωπα Pareto στην διαδικασία εύρεσης της καταλληλότερης γεωμετρίας προκειμένου να αποφευχθεί ευαισθησία στην μεταβολή του σχετικού κόστους των επιμέρους κριτηρίων.
- Επιχειρήθηκε εκτεταμένη σύγκριση αλγορίθμων υπό τις ίδιες συνθήκες βελτιστοποίησης προκειμένου να προσδιορισθεί η καταλληλότερη διαδικασία για τη συγκεκριμένη κατηγορία προβλημάτων.
- Αναπτύχθηκε εποπτική αποτίμηση των συγκριτικών πλεονεκτημάτων εναλλακτικών γεωμετριών μέσω κατάλληλης τεχνικής Taguchi.

6.3 Εργασίες για Περαιτέρω Διερεύνηση

Τα σημεία τα οποία αναδείχθηκε ότι χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας είναι τα ακόλουθα:

- Πειραματική επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών της προτεινόμενης μηχανής.
- Μελέτη και άλλων εναλλακτικών διαμορφώσεων πολλαπλών μονίμων μαγνητών προκειμένου να διερευνηθεί εάν μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση στην περιοχή χαμηλών ταχυτήτων.

Βιβλιογραφία

- [1] B. Frieske, M. Kloetzke, F. Mauser, "Trends in Vehicle Concept and Key Technology Development for Hybrid and Battery Electric Vehicles", Barcelona, Spain, November 17-20, 2013, pp. 1-12
- [2] Stephan J. Chapman, "Electric Machinery Fundamentals", 4th Edition, CRC Press, 2005
- [3] M. Zeraoulia, M. Benbouzid and D. Diallo, "Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study" in *IEEE VPPC'05*, Sep 2005, Chicago, United States, pp.280-287.
- [4] G. Pellegrino, A. Vagati, P. Guglielmi and B. Boazzo, "Performance Comparison Between Surface-Mounted and Interior PM Motor Drives for Electric Vehicle Application" in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 2, pp. 803-811, Feb. 2012.
- [5] J. S. Hsu, S. T. Lee, R. H. Wiles, C. L. Coomer, K. T. Lowe, and T. A. Burress, "Effect of Side Permanent Magnets for Reluctance Interior Permanent Magnet Machines" in *2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 2267-2272.
- [6] A. M. EL-Refai, "Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges", in *IEEE Transactions of Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 1., January 2010, pp. 107-121
- [7] D. Ishak, Z. Q. Zhu, and J. Howe, "Eddy-Current Loss in the Rotor Magnets of Permanent-Magnet Brushless Machines Having a Fractional Number of Slots Per Pole", in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 9, September 2005, pp. 2462-2469.
- [8] A. G. Sarigiannidis, M. E. Beniakar, P.E Kakosimos and A.G. Kladas, "Multi-operating points PM Motor Design Methodology for Electric Actuation systems", in *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp. 2506-2512.
- [9] E. Dlala, M. Solveson, S. Stanton, Z. Tang, M. Christini, R. Ong and B. Peaslee, "Efficiency Map Simulations for an Interior PM Motor with Experimental Comparison and Investigation of Magnet Size Reduction", in *2013 International Electric Machines and Drives Conference*, pp. 23-29.
- [10] J. A. Nelder and R. Mead, "A simplex method for function minimization", pp.308-313

- [11] Press, W. H. Teukolsky, S. A. Vetterling, W. T. Flannery, B. P. (2007). "Section 10.5. Downhill Simplex Method in Multidimensions". Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing (3rd ed.). New York: Cambridge University Press.
- [12] M. G. Say, Alternating current machines, Essex, 1986, Longman Scientific and Technical.
- [13] Nicola Bianchi, "Electrical Machine Analysis using Finite Elements"
- [14] Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen and Valeria Hrabovcova, "Design of Rotating Electrical Machines", 2008
- [15] Donald A. Pierre, "Optimization Theory with Applications", Dover Publications, INC., New York.
- [16] Kalyanmoy Deb, "Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms", Wiley and Sons, 2009
- [17] Electric Cars
<https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>
<https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-hybrid-electric-cars-work>
<https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-plug-in-hybrid-electric-cars-work>
- [18] DC Motor
<https://www.electricaltechnology.org>
- [19] Permanent Magnets vs Induction
<https://newenergyandfuel.com/http://newenergyandfuel.com/2010/02/09/the-best-electric-vehicle-motor/>
- [20] Permanent Magnet Synchronous Motor
<https://en.engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm/>
- [21] Copper
http://www.epanorama.net/documents/wiring/wire_resistance.html
- [22] Magnet Materials
<https://www.researchgate.net/figure/Development-in-the-energy-density>
- [23] Α. Γ. Σαρηγιαννίδης, "Βέλτιστος Σχεδιασμός και Διαχείριση Συστημάτων Κίνησης Ηλεκτρικών Οχημάτων", Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2016.