



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

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ
ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΛΑΜΑΡΙΝΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ Ι. ΠΑΠΑΝΔΡΕΑΔΗΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΚΛΑΔΑΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ**

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2020



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

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ
ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΛΑΜΑΡΙΝΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ Ι. ΠΑΠΑΝΔΡΕΑΔΗΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΚΛΑΔΑΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ**

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την __/__/2020.

.....
Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αντώνιος Αντωνόπουλος

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2020

.....

Χαράλαμπος Ι. Παπανδρεάδης

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

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η παρούσα εργασία επιχειρεί τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας ηλεκτρικού κινητήρα δρομέα εσωτερικών μονίμων μαγνητών και της διαμόρφωσής του με βάση τα χαρακτηριστικά των σιδηρομαγνητικών λαμαρινών. Πραγματοποιείται μελέτη μεταξύ κινητήρων με διαφορετικά χαρακτηριστικά τόσο από πλευράς γεωμετρίας όσο και από πλευράς σιδηρομαγνητικών υλικών που χρησιμοποιούνται στους πυρήνες. Η μελέτη πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων FEMM, σε συνδυασμό με το προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB στο οποίο έχουν γραφεί όλες οι συναρτήσεις για την παραμετρική σχεδίαση των κινητήρων, αλλά και για την επεξεργασία, καταγραφή και αναπαράσταση των αποτελεσμάτων.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας, παρουσιάζεται μία σύντομη θεωρητική σύγκριση μεταξύ των βασικών ειδών κινητήρων, με σκοπό να επεξηγηθεί η επιλογή του προς μελέτη τύπου κινητήρα. Αυτό επιτυγχάνεται επισημαίνοντας τις εκάστοτε εφαρμογές, για την εξυπηρέτηση των οποίων προτιμάται καθένα εκ των αναφερθέντων ειδών κινητήρων, ενώ διατυπώνεται και η αιτιολόγηση της επιλογής εκ μέρους του συγγραφέα της συγκεκριμένης διαμόρφωσης. Καταληκτικά, έχοντας επιλέξει ως αντικείμενο διερεύνησης τον κινητήρα μονίμων μαγνητών, παρατίθεται μία σύντομη περιγραφή των εναλλακτικών διαμορφώσεων αυτού.

Στο δεύτερο μέρος αναλύονται τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού κινητήρα μονίμων μαγνητών, όπως η παραγωγή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μέσω των τυλιγμάτων στάτη, αλλά και οι κύριες εξισώσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στις οποίες βασίζεται η μελέτη των κινητήρων. Ακολούθως εξηγείται αναλυτικά η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, μέσω της οποίας πραγματοποιείται η μοντελοποίηση. Τέλος περιγράφονται όλα τα μεγέθη που αποτελούν αντικείμενα μελέτης και επεξεργασίας στη συνέχεια, και ο τρόπος μέσω του οποίου συνάγονται τα σχετικά αποτελέσματα. Με βάση τα παραπάνω, παρουσιάζονται τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν ποιοτικά και ποσοτικά τη λειτουργική συμπεριφορά του κινητήρα (επίδοση, απόδοση, ταλαντώσεις ροπής, αρμονική παραμόρφωση κ.α.) τα οποία μελετώνται εκτενώς στη συνέχεια.

Στο τρίτο μέρος πραγματοποιείται η προκαταρκτική σχεδίαση του κινητήρα. Η διαδικασία αυτή αποτελεί προσεγγιστική θεώρηση γεωμετρίας που ικανοποιεί την επιθυμητή επίδοση και απόδοση του κινητήρα, μέσω βασικών ηλεκτρομαγνητικών σχέσεων. Ακολούθως περιγράφονται οι μεταβλητές που θα μελετηθούν. Η μελέτη αφορά μία πληθώρα κατασκευαστικών χαρακτηριστικών όπως: α) η επιλογή διαμόρφωσης των τυλιγμάτων του στάτη, συγκρίνοντας συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των άκρων των πηνίων και κατανεμημένα τυλίγματα διπλής στρώσεως κλασματικού βήματος, β) οι συνδυασμοί Πόλων/Αυλάκων, γ) η γεωμετρία δοντιών στάτη, δ) η χωροθέτηση των μαγνητών στον δρομέα και ε) κύριες γεωμετρικές μεταβλητές των μαγνητικών κυκλωμάτων δρομέα και στάτη.

Εν συνεχεία, στο τέταρτο μέρος, πραγματοποιείται η οριστική σχεδιαστική μελέτη του κινητήρα και η παραμετρική διερεύνηση με σκοπό τη βέλτιστη γεωμετρική διαμόρφωσή του. Η διαδικασία πραγματοποιείται ξεχωριστά για κατανεμημένα τυλίγματα κλασματικού βήματος και για συγκεντρωμένα τυλίγματα μη επικαλυπτόμενων άκρων, με σκοπό την ανάδειξη των πλεονεκτικών χαρακτηριστικών κάθε μίας τοπολογίας τυλιγμάτων. Η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση πραγματοποιείται μέσω ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η επιλογή τελικής γεωμετρίας για κάθε μία εκ των δύο μελετηθέντων διαμορφώσεων τυλιγμάτων, καθώς και η ανάδειξη ορισμένων σημαντικών χαρακτηριστικών τους.

Στο πέμπτο μέρος περιλαμβάνεται η βελτιστοποίηση διαμόρφωσης του ηλεκτρικού κινητήρα εξετάζοντας διαφορετικά χαρακτηριστικά σιδηρομαγνητικών λαμαρινών. Παρουσιάζεται μία εκτενής ανάλυση των χαρακτηριστικών των διαφόρων ειδών σιδηρομαγνητικών λαμαρινών, από καθαρό σίδηρο, κράματα πυριτίου-σιδήρου καθώς και κοβαλτίου-σιδήρου, εξετάζοντας τον μαγνητικό κορεσμό, τις απώλειες πυρήνα, τη μηχανική αντοχή κ.α. Στη συνέχεια ακολουθεί σχεδιαστική συγκριτική μελέτη πληθώρας σιδηρομαγνητικών υλικών, τα οποία χρησιμοποιούνται στις δύο οριστικές γεωμετρίες ηλεκτρικών κινητήρων του προηγούμενου κεφαλαίου.

Τέλος, στο έκτο μέρος της παρούσας εργασίας, μετά από ανακεφαλαίωση της μελέτης, αναφέροντας τα κυριότερα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν, παρατίθενται τα σημεία επιστημονικής συνεισφοράς καθώς και ορισμένες προτάσεις θεμάτων για περαιτέρω διερεύνηση.

Λέξεις κλειδιά : Ηλεκτρικός κινητήρας μονίμων μαγνητών, σχεδίαση ηλεκτρικού κινητήρα, βελτιστοποίηση γεωμετρίας, παραμετροποιημένη σχεδίαση, συγκεντρωμένο και καταναμημένο τύλιγμα διπλής στρώσης κλασματικού βήματος, αριθμός πόλων/αυλάκων, γεωμετρία δοντιού, τοπολογίες επιφανειακών και εσωτερικών μαγνητών, διαφορετικοί τύποι σιδηρομαγνητικών λαμαρινών.

Abstract

The aim of this thesis is to optimize the geometry of an electric motor with internal permanent magnets in the rotor and its characteristics by examining the magnetic circuit construction by using various ferromagnetic materials. The study considers alternative motor configurations with respect to different magnetic material characteristics. The finite element software FEMM has been used, in conjunction with the MATLAB programming environment, in the implementation of the methodology developed involving parametric design as well as various functions of processing, recording and representation the results.

In the first part of the thesis, a comparison among the basic types of motors implemented in electric traction applications is presented, while the choice of the motor type considered is explained. Moreover the different rotor structures of the selected permanent magnet synchronous motor type are described.

In the second part, the basic operating characteristics of the permanent magnet synchronous motors are reported such as the production of electromagnetic field by stator windings as well as the governing electromagnetic equations. In addition, the method of finite elements used in the motor analysis is explained in detail. Moreover the main parameters are presented enabling the qualitative and quantitative characterization of the motor (efficiency, performance, torque ripple, voltage harmonic distortion etc.) which are studied in the followings.

In the third part, the preliminary design stage of the motor is described. This procedure provides an approximate geometry satisfying the main specifications of efficiency and performance of the motor by using basic electromagnetic relations. A parametric study has been then undertaken including comparison among various configuration characteristics such as a) double layer concentrated windings with non overlapping ends double layer fractional slot distributed windings, b) different Pole / Slot combinations, c) alternative stator teeth geometries, d) various rotor magnet topologies and e) main geometric dimensions of the rotor and stator magnetic circuits.

The fourth part, comprises the final design stage of the motor involving geometry optimization. The process is performed for both fractional slot distributed windings and concentrated windings with non overlapping ends configurations. The multi-criteria procedure is implemented through sensitivity analysis of all considered parameters. This way, the choice of a final geometry amongst the two studied winding configurations is based on relative advantages and features taken into account.

In the fifth part, the impact on the electrical motor characteristics of alternative ferromagnetic laminations implemented has been studied. A detailed analysis of the characteristics of the various types of ferromagnetic laminations is given, including pure iron, silicon – iron and cobalt – iron alloys while the main features, concerning magnetic saturation, core losses, mechanical endurance etc. are reported. Then a comparative analysis of the different ferromagnetic materials in the two final geometries of electrical motor cases resulted in the previous chapter has been performed.

Finally, the sixth part of the present thesis comprises a synopsis of the main results and the respective conclusions. Moreover, the main points of scientific contribution are reported and some suggestions for further investigation are mentioned.

Key Words: permanent magnet synchronous motor, electrical motor design, geometry optimization, parameter sensitivity analysis, double layer concentrated and distributed windings, fractional slot windings, pole/ slots number, tooth geometry, surface and interior magnets configurations, different ferromagnetic laminations.

Ευχαριστίες

Μετά το πέρας της παρούσης διπλωματικής εργασίας, θα ήταν παράληψη εάν δεν εξέφραζα τις ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν κατά την εκπόνησή της.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά, τον Καθηγητή μου κ. Αντώνιο Κλαδά, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την παρούσα εργασία, για την καθοδήγησή του και την άψογη συνεργασία για την περαίωση αυτής. Τον ευχαριστώ ολόψυχα για την έμπνευση που μου έδωσε να ασχοληθώ με τον αντικείμενο της εργασίας αυτής, καθώς και για τις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου στο Πολυτεχνείο.

Επιπρόσθετα ευχαριστώ τα αξιότιμα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, τον Καθηγητή κ. Σταύρο Παπαθανασίου και τον Επίκουρο Καθηγητή Αντώνιο Αντωνόπουλο για την επιστημονική τους συνδρομή.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διδάκτωρ κ. Παναγιώτη Ροβολή, για τις χρήσιμες επιστημονικές συμβουλές του.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω την μητέρα μου Άννα Μαρία, τον πατέρα μου Ιωάννη και την αδερφή μου Ειρήνη, για την απεριόριστη συμπαράσταση τους. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά τους φίλους μου Δημήτρη, Λευτέρη και Νίκο.

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	18
Ιστορική επισκόπηση της εξέλιξης των κινητήρων μονίμων μαγνητών	18
Οι πρώτοι ηλεκτροκινητήρες.....	18
Προσωρινή αντικατάσταση των μονίμων μαγνητών από ηλεκτρομαγνήτες.....	19
Η Επιστροφή των κινητήρων μονίμων μαγνητών.....	20
Σκοπός της εργασίας.....	20
Δομή της εργασίας.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο.....	23
Κατηγοριοποίηση ηλεκτρικών κινητήρων συγκρίσεις και συμπεράσματα	23
1.1 Εισαγωγή	23
1.2 Κατηγοριοποίηση των ηλεκτρικών κινητήρων	24
1.2.1 Εξέλιξη κινητήρων	24
1.2.2 Βασικά κριτήρια επιλογής των ηλεκτρικών κινητήρων σε κινητήρια συστήματα μεταβλητής ταχύτητα	26
1.2.2.1 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με τύλιγμα διέγερσης και σύστημα συλλέκτη-ψηκτρών.....	27
1.2.2.2 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος μονίμου μαγνήτη (PMDC-commutator motors).....	28
1.2.2.3 Επαγωγικοί (ασύγχρονοι) κινητήρες	28
1.2.2.4 Σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη.....	29
1.2.2.5 Κινητήρες μαγνητικής αντίστασης.....	30
1.2.2.6 Αιτιολόγηση επιλογής PMSM.....	30
1.3 Κατηγοριοποίηση κινητήρων μονίμων μαγνητών (PMSM)	31
1.3.1 Τοπολογία μαγνητών.....	31
1.3.1.1 Κινητήρες επιφανειακών μόνιμων μαγνητών	31
1.3.1.2 Κινητήρες εσωτερικά επιφανειακών μαγνητών	31
1.3.1.3 Κινητήρες εσωτερικών μαγνητών.....	31
1.3.2 Σχετική θέση στάτη - δρομέα.....	32
1.3.2.1 Κινητήρες εσωτερικού και εξωτερικού δρομέα.....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο.....	35
Θεωρητικό υπόβαθρο μελέτης σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών.....	35
2.1 Εισαγωγή	35
2.2 Θεωρητική ανάλυση μεγεθών.....	36

2.2.1 Τυλίγματα στάτη	36
2.2.1.1 Αλληλουχία φάσεων	36
2.2.1.2 Τερματικές συνδέσεις πηνίων	37
2.2.1.3 Διανομή φάσεων στις αύλακες	37
2.2.1.3.1 Απλό μη Διανεμημένο Τύλιγμα	37
2.2.1.3.2 Κατανεμημένο Τύλιγμα Πλήρους Βήματος	38
2.2.1.3.3 Κατανεμημένο Τύλιγμα Κλασματικού Βήματος	40
2.2.1.3.4 Συγκεντρωμένο Τύλιγμα Χωρίς Επικάλυψη των Φάσεων	41
2.2.1.3.5 Σύγκριση των προαναφερθέντων τοπολογιών τυλίγματος στάτη	45
2.3 Μέθοδος μελέτης προβλήματος	46
2.3.1 Ηλεκτρομαγνητικές εξισώσεις Maxwell	46
2.3.2 Οριακές συνθήκες	48
2.3.3 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων	50
2.3.3.1 Διαδικασία ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία	50
2.3.3.1.1 Σχεδίαση	51
2.3.3.1.2 Πλεγματοποίηση	51
2.3.3.1.3 Επίλυση και Απεικόνιση	52
2.4 Υπολογισμός μεγεθών κινητήρα	52
2.4.1 Υπολογισμός μέσης ροπής και ταλαντώσεων ροπής	52
2.4.2 Υπολογισμός επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης	54
2.4.3 Υπολογισμός απωλειών	56
2.4.3.1 Απώλειες χαλκού	57
2.4.3.2 Απώλειες σιδήρου	59
2.4.3.2.1 Απώλειες διννορευμάτων	59
2.4.3.2.2 Απώλειες υστέρησης	60
2.4.3.2.3 Εναλλακτικός υπολογισμός απωλειών σιδήρου	62
2.4.3.3 Απώλειες μονίμων μαγνητών	64
2.4.3.4 Μηχανικές απώλειες	66
2.4.3.4.1 Απώλειες τριβής	66
2.4.3.4.2 Απώλειες ανεμισμού	66
2.4.3.5 Κατανεμημένες ή διαφεύγουσες απώλειες	67
2.4.4 Υπολογισμός απόδοσης	67
2.4.5 Θερμική ανάλυση	68

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο	70
Προκαταρκτική σχεδίαση ηλεκτρικού κινητήρα μονίμων μαγνητών	70
3.1 Εισαγωγή	70
3.2 Προκαταρκτική Σχεδίαση.....	71
3.2.1 Διαστασιολόγηση διακένου.....	71
3.2.1.1 Επιφάνεια διακένου	71
3.2.1.2 Πάχος διακένου.....	73
3.2.2 Ειδική μαγνητική φόρτιση	74
3.2.3 Ειδική ηλεκτρική φόρτιση	75
3.2.4 Συχνότητα περιστροφής των ρευμάτων	76
3.2.5 Πυκνότητα Ρεύματος Τυλίγματος	77
3.3 Αρχικοποίηση κυρίων χαρακτηριστικών κινητήρα.....	79
3.3.1 Τυλίγματα στάτη	79
3.3.2 Παραμετρική σχεδίαση στάτη.....	80
3.3.3 Παραμετρική σχεδίαση δρομέα	84
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο	 88
Συγκριτική μελέτη κινητήρων μονίμων μαγνητών και βελτιστοποίηση γεωμετρίας των	88
4.1 Εισαγωγή	88
4.2 Σχεδιαστική πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση.....	89
4.2.1 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με κατανεμημένα τυλίγματα κλασματικού βήματος.....	90
4.2.1.1 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου ζευγών πόλων-αυλάκων	90
4.2.1.2 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου διαμορφώσεων δοντιού.....	92
4.2.1.3 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου ποσοστού εύρους δοντιού ως προς το βήμα αύλακος (T percent).....	95
4.2.1.4 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου πλάτους δοντιού (Wt)	98
4.2.1.5 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου ύψους βάσεως δοντιού (h _{tp}).....	100
4.2.1.6 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου ύψους δοντιού (Lt)	102
4.2.1.7 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου τοπολογίας μαγνήτη.....	104
4.2.1.8 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου πάχους διακένου (lg).....	105
4.2.1.9 Χαρακτηριστικά μεγέθη ενδιαφέροντος τελικού κινητήρα	108
4.2.2 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με συγκεντρωμένα τυλίγματα χωρίς επικάλυψη των φάσεων	109

4.2.2.1 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου ζευγών πόλων-αυλάκων.....	109
4.2.2.2 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου διαμορφώσεων δοντιού.....	112
4.2.2.3 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου ποσοστού εύρους δοντιού ως προς το βήμα αύλακος (T percent).....	115
4.2.2.4 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου πλάτους δοντιού (Wt).....	116
4.2.2.5 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου ύψους βάσεως δοντιού (htp).....	118
4.2.2.6 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου ύψους δοντιού (Lt).....	120
4.2.2.7 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου τοπολογίας μαγνήτη.....	122
4.2.2.8 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου πάχους διακένου (lg).....	123
4.2.2.9 Χαρακτηριστικά μεγέθη ενδιαφέροντος τελικού κινητήρα.....	126
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο.....	128
Συγκριτική μελέτη κινητήρων μονίμων μαγνητών με βάση τα χαρακτηριστικά σιδηρομαγνητικών λαμαρινών.....	128
5.1 Εισαγωγή.....	128
5.2 Θεωρητική ανάλυση σημαντικότητας σιδηρομαγνητικών λαμαρινών ως κατασκευαστικών υλικών ηλεκτρικού κινητήρα.....	129
5.2.1 Θεωρητική περιγραφή χρησιμοποιηθέντων υλικών.....	129
5.2.1.1 Έλαση σιδήρου.....	131
5.2.1.2 Καθαρός σίδηρος.....	131
5.2.1.3 Ηλεκτρικοί χάλυβες πυριτίου-σιδήρου.....	133
5.2.1.3.1 Ηλεκτρικός χάλυβας πυριτίου-σιδήρου τύπου M235-35A.....	134
5.2.1.3.2 Ηλεκτρικός χάλυβας πυριτίου-σιδήρου τύπου M940-50A.....	135
5.2.1.4 Κράματα κοβαλτίου-σιδήρου.....	138
5.2.1.4.1 Κράμα κοβαλτίου-σιδήρου τύπου Hiperco 50.....	138
5.2.1.4.2 Κράμα κοβαλτίου-σιδήρου τύπου Vacoflux 48.....	140
5.3 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με βάση τα χαρακτηριστικά σιδηρομαγνητικών λαμαρινών.....	142
5.3.1 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με κατανεμημένα τυλίγματα διπλής στρώσεως κλασματικού βήματος, με βάση τα χαρακτηριστικά σιδηρομαγνητικών λαμαρινών.....	142
5.3.1.1 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με κατανεμημένα τυλίγματα κλασματικού βήματος σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και M940- 50A.....	143
5.3.1.2 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με κατανεμημένα τυλίγματα κλασματικού βήματος σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και Hiperco 50.....	144

5.3.1.3 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με καταναεμημένα τυλίγματα κλασματικού βήματος σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και Vacoflux 48.....	145
5.3.1.4 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με καταναεμημένα τυλίγματα κλασματικού βήματος σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και Καθαρού Σιδήρου.	146
5.3.2 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των φάσεων, με βάση τα χαρακτηριστικά σιδηρομαγνητικών λαμαρινών	147
5.3.2.1 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των φάσεων σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και M940-50A	147
5.3.2.2 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των φάσεων σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και Hiperco 50.....	149
5.3.2.3 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των φάσεων σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και Vacoflux 48.	150
5.3.2.4 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των φάσεων σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και Καθαρού Σιδήρου.	151
5.3.3 Τελική επιλογή σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας.....	152
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6⁰	154
Σύνοψη, αποτελέσματα συμπεράσματα και προοπτικές	154
6.1 Σύνοψη.....	154
6.2 Κυριότερα Αποτελέσματα	154
6.3 Συμπεράσματα.....	156
6.3.1 Μεθοδολογία σχεδιασμού.....	156
6.3.2 Επιρροή των διαφορετικών τυλιγμάτων στάτη στις αύλακες	156
6.3.3 Επιρροή του αριθμού των πόλων στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της μηχανής.....	156
6.3.4 Επιρροή των διαφόρων ποσοτικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της μηχανής	156
6.3.5 Επιρροή των διαφόρων διαμορφώσεων δοντιού στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της μηχανής	157
6.3.6 Επιρροή των διαφόρων τοπολογιών μαγνήτη στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της μηχανής	157
6.3.7 Επιρροή των διαφορετικών σιδηρομαγνητικών λαμαρινών στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της μηχανής	157
6.4 Σημεία επιστημονικής συνεισφοράς	158

6.5 Σημεία για περαιτέρω διερεύνηση	158
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	160

Πρόλογος

Στη σύγχρονη εποχή τα ηλεκτρικά μηχανήματα χρησιμοποιούνται σχεδόν εξ ολοκλήρου στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς υπάρχουν πολύ λίγες διαδικασίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπου δεν χρησιμοποιούνται περιστρεφόμενες μηχανές. Σε τέτοιες διαδικασίες, συνήθως χρειάζονται τουλάχιστον βοηθητικοί κινητήρες. Στα κατανομημένα ενεργειακά συστήματα, νέοι τύποι μηχανημάτων παίζουν σημαντικό ρόλο. Ένας τέτοιος σχετικά νέος τύπος ηλεκτρικών κινητήρων είναι αυτός των κινητήρων μονίμων μαγνητών.

Περίπου το ήμισυ του συνόλου της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται παγκοσμίως χρησιμοποιείται σε ηλεκτροκινητήρες ενώ αυξάνεται το μερίδιο των εφαρμογών που ελέγχονται με ακρίβεια. Οι ηλεκτροκινητήρες παρέχουν ίσως τις καλύτερες ιδιότητες ελέγχου για μια ευρεία ποικιλία διαδικασιών. Η ροπή ενός ηλεκτρικού κινητήρα μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια και η αποτελεσματικότητα των διαδικασιών ηλεκτρονικής και ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ισχύος είναι υψηλή. Το πιο σημαντικό είναι ότι ένας ελεγχόμενος ηλεκτροκινητήρας μπορεί να εξοικονομήσει σημαντικές ποσότητες ενέργειας. Ήδη στις μέρες μας οι ηλεκτρικοί κινητήρες εκτός των άλλων χρησιμοποιούνται με εκθετικό ρυθμό αύξησης και στην έλξη των αυτοκινήτων και των μηχανών εργασίας. Λόγω των μεγάλων ενεργειακών ροών, οι ηλεκτρικοί κινητήρες έχουν σημαντικό αντίκτυπο στο περιβάλλον. Εάν οι οδηγοί είναι κακώς σχεδιασμένοι ή χρησιμοποιηθούν ανεπαρκώς, το περιβάλλον επιβαρύνεται μάταια. Οι περιβαλλοντικές απειλές δίνουν στους ηλεκτρολόγους μηχανικούς έναν καλό λόγο για το σχεδιασμό νέων και αποδοτικών ηλεκτρικών κινητήρων.

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας ενός ηλεκτρικού κινητήρα μονίμων μαγνητών, μελετώντας πολλαπλές παραμέτρους, όπως το σχήμα δοντιού, η τοπολογία των μαγνητών, τα τυλίγματα του στάτη κ.α. και μέσω αυτού να παρέχει γνώσεις σχετικά με τις περιστρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές και την κατανόηση της επίδρασης των εν λόγω παραμέτρων στην λειτουργία τους. Ταυτόχρονα επιχειρεί να εξάγει συμπεράσματα σχετικά με την χρήση διαφορετικών σιδηρομαγνητικών λαμαρινών ως κατασκευαστικών υλικών σώματος των κινητήρων.

Ωστόσο, λόγω του μεγάλου βεληνεκού μελέτης αυτού του αντικειμένου, δεν είναι δυνατόν να περιληφθούν όλες οι πληροφορίες που απαιτούνται για τον σχεδιασμό ηλεκτρικών μηχανών σε μία μόνο διπλωματική εργασία. Για τον λόγο αυτό δεν υπήρξε σχετική πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση σχετικά με το μέγεθος του κινητήρα.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ιστορική επισκόπηση της εξέλιξης των κινητήρων μόνιμων μαγνητών

Οι πρώτοι ηλεκτροκινητήρες

Οι πρώτοι εφευρέτες ηλεκτρικών περιστρεφόμενων μηχανών χρησιμοποίησαν μόνιμους μαγνήτες στα σχέδιά τους. Εντούτοις οι «μηχανές» αυτές δεν ήταν κινητήρες με την έννοια που τους γνωρίζουμε σήμερα. Ο Michael Faraday ήταν ένας από τους πρώτους πειραματιστές στον αναπτυσσόμενο τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας και του ηλεκτρομαγνητισμού. Ο ίδιος κατασκεύασε μια περιστρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή που θεωρείται ως ο πρώτος ηλεκτρικός κινητήρας. Η εφαρμογή βασίστηκε σε ιδέες των α) Hans Christian Oersted σχετικά με τη «δημιουργία μαγνητικού πεδίου με ηλεκτρικό ρεύμα» [Martin Doppelbauer. *Η εφεύρεση του ηλεκτροκινητήρα 1800-1854*] και β) William Wollaston, ενός πειραματιστή ο οποίος χρησιμοποίησε ένα καλώδιο διαρρεόμενο από ρεύμα για να περιστρέψει έναν άξονα με τη βοήθεια ενός μαγνήτη [Joe Rosen και Lisa Quinn Gothard. *Εγκυκλοπαίδεια Φυσικής Επιστήμης, Τόμος 1. Infobase Publishing, 2009. Σελ. 220*]. Ο Faraday δημιούργησε μια εργαστηριακή συσκευή που μετέτρεπε την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική περιστρεφόμενη κίνηση. Αυτή η συσκευή χρησιμοποιούσε σταθερούς και περιστρεφόμενους μόνιμους μαγνήτες με καλώδια συνδεδεμένα, εντός ενός δοχείου υδραργύρου, και μία μπαταρία. Όταν η μπαταρία συνδεόταν με τα καλώδια, το ρεύμα έρεε στο κύκλωμα και το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο αλληλεπιδρούσε με τους μόνιμους μαγνήτες για να παράγει ροπή και να προκαλέσει μηχανική κίνηση [Joe Rosen και Lisa Quinn Gothard. *Εγκυκλοπαίδεια Φυσικής Επιστήμης, Τόμος 1. Infobase Publishing, 2009. Σελ. 220*].

Εν συνεχεία, πολλοί εφευρέτες πραγματοποίησαν βελτιώσεις του προηγούμενου, κατασκευάζοντας μηχανές οι οποίες έμοιαζαν περισσότερο με τους κινητήρες που γνωρίζουμε σήμερα. Το 1882, ο Peter Barlow εφεύρε έναν περιστρεφόμενο τροχό, γνωστό ως τροχός του Barlow, ο οποίος αποτελείτο από έναν τροχό σε σχήμα αστεριού, ελεύθερο να περιστρέφεται, αναρτημένο πάνω από ένα δοχείο υγρού υδραργύρου, με ορισμένα σημεία του βυθισμένα στον υδράργυρο, και ανάμεσα στους πόλους ενός μαγνητικού πέταλου [Martin Doppelbauer. *Η εφεύρεση του ηλεκτρικού κινητήρα 1856-1893. Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Καρλσρούης (KIT), 2012*]. Ηλεκτρικό ρεύμα DC διέρρεε το κέντρο του τροχού, μέσω του τμήματος το οποίο ήταν βυθισμένο στον υδράργυρο και εξωτερικά μέσω μιας ηλεκτρικής επαφής η οποία ήταν επίσης βυθισμένη στον υδράργυρο. Η δύναμη Lorentz του μαγνητικού πεδίου στα κινούμενα φορτία του τροχού προκαλούσε την περιστροφή του.

Το 1837, χορηγήθηκε στον Αμερικανό εφευρέτη και σιδηρουργό Thomas Davenport το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για έναν ηλεκτροκινητήρα. Αυτός ο κινητήρας ήταν μια βελτίωση των προηγούμενων σχεδίων. Στην εφαρμογή αυτή, ο Thomas Davenport, συνεργάστηκε με τους Orange Smalley και Ransom Cook και η ιδέα βασίστηκε σε έναν ηλεκτρομαγνήτη που αγοράστηκε από τον εφευρέτη Joseph Henry. Η κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας σχεδίαση του Davenport, χρησιμοποιούσε τέσσερις περιστρεφόμενους ηλεκτρομαγνήτες, που μετακινούνται από έναν μεταγωγέα, και σταθερούς μόνιμους μαγνήτες σε σχήμα δακτυλίου. Ο κινητήρας περιστρεφόταν με περίπου 1.000 στροφές ανά λεπτό και είχε την δυνατότητα να σηκώνει βάρος διακόσια (200) κιλά σε ύψος τριάντα εκατοστών σε ένα λεπτό, το οποίο αντιστοιχεί σε ισχύ 4,5 W [Martin Doppelbauer. *Η εφεύρεση του ηλεκτροκινητήρα 1800-1854. Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Καρλσρούης (KIT), 2012*]. Παρόλο που ο κινητήρας του Davenport ήταν μια βελτίωση, απέτυχε να εδραιωθεί στο εμπόριο, καθώς ενώ ο Davenport

χρησιμοποίησε μόνιμους μαγνήτες στον κινητήρα του, άλλοι εφευρέτες κινούνταν ήδη σε κάτι καλύτερο αντικαθιστώντας τους μόνιμους μαγνήτες με ηλεκτρομαγνήτες. Αυτή η αλλαγή οδήγησε στην δημιουργία κινητήρων βιομηχανικής ποιότητας που προωθούσαν την ανάπτυξη της ηλεκτρομαγνητικής αγοράς κινητήρων DC για πολλά χρόνια, έως ότου οι μόνιμοι μαγνήτες υψηλής ποιότητας κάνουν την εμφάνιση τους.

Προσωρινή αντικατάσταση των μόνιμων μαγνητών από ηλεκτρομαγνήτες

Οι πρώτοι εφευρέτες ηλεκτρικών κινητήρων ήξεραν από πολύ νωρίς ότι οι κινητήρες μόνιμων μαγνητών είχαν σοβαρούς περιορισμούς όσον αφορά την πρακτική εφαρμογή τους. Το 1882, ο ηλεκτρολόγος John Urquhart έγραψε στην πραγματεία του σχετικά με τους ηλεκτροκινητήρες ότι «όταν η ηλεκτροκινητική μηχανή προορίζεται να ασκήσει σημαντική ποσότητα ενέργειας, συνιστάται η αντικατάσταση των μόνιμων μαγνητών από ηλεκτρομαγνήτες». Συγκεκριμένα, όταν οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι εφοδιασμένοι με ηλεκτρομαγνήτες αντί των μόνιμων μαγνητών αποδίδεται σημαντική αύξηση της ισχύος. Επιπλέον, το μέγεθος και το βάρος του κινητήρα μπορεί να μειωθεί σημαντικά, ενώ το κόστος είναι πολύ μικρότερο και το μηχάνημα μπορεί να μετατρέψει μια πολύ μεγαλύτερη ισχύ ρεύματος σε μηχανικό αποτέλεσμα [John W. Urquhart. *Ηλεκτροκινητήρες: Μια πραγματεία για τα μέσα και τις συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας και τη μετατροπή της σε κινητήρια ισχύ για τη χρήση μηχανικών και άλλων. William T. Emmott, 1882. Σελ. 103*].

Ο Βρετανός εφευρέτης William Sturgeon θεωρείται ο εφευρέτης του πρώτου ηλεκτρομαγνήτη το 1825. Λίγα χρόνια αργότερα το 1827, ο Ουγγρικής καταγωγής εφευρέτης Istvan (Ányos) Jeditk, εφηύρε τον «πρώτο περιστρεφόμενο κινητήρα με ηλεκτρομαγνήτες και έναν μετατροπέα» που ήταν ο πρόδρομος του μοντέρνου DC κινητήρα. Ωστόσο ο πρώτος πρακτικός DC κινητήρας με ηλεκτρομαγνήτες εφευρέθηκε από τον Moritz Hermann Jacobi το 1834. Ο κινητήρας του Jacobi ανύψωνε δέκα (10) έως δώδεκα (12) κιλά με ταχύτητα τριάντα εκατοστών ανά δευτερόλεπτο, το οποίο ισοδυναμεί περίπου με 15 Watts μηχανικής ισχύος. Σε μια ενδιαφέρουσα σημείωση, ο Jacobi έγραψε το 1835 ότι «δεν ήταν ο μοναδικός εφευρέτης του κινητήρα με ηλεκτρομαγνήτες», καθώς δήλωσε την προτεραιότητα των εφευρέσεων των Botto και Dal Negro [Martin Doppelbauer. *Η εφεύρεση του ηλεκτροκινητήρα 1800-1854. Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Καρλσρούης (KIT), 2012*].

Ενώ οι DC κινητήρες με ηλεκτρομαγνήτες «πρωτοεμφανίστηκαν τη δεκαετία του 1880 όταν το συνεχές ρεύμα ήταν η κύρια πηγή ισχύος» [Stanley Ryan Sifford. *Ανάλυση πολλαπλών θυρών κινητήρων μόνιμου μαγνήτη. ProQuest, 2006. Σελ. 56*], η χρήση τους θα άλλαζε ριζικά όταν ο Nikola Tesla το 1889 εφηύρε τον κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) με ηλεκτρομαγνήτες. Με μόνο δύο μέρη, ένα στατικό, τον στάτορα, και ένα περιστρεφόμενο, τον ρότορα, ο κινητήρας AC ήταν απλούστερος από τους DC κινητήρες με ηλεκτρομαγνήτες. «Ο στάτορας παρείχε ένα περιστρεφόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ενώ ο ρότορας, προσαρτημένος στον άξονα εξόδου, απέδιδε ροπή από το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο δημιουργείτο από δύο ή περισσότερα εναλλασσόμενα ρεύματα, με διαφορά φάσης μεταξύ τους, και ονομάστηκε πολυφασικό σύστημα» [Carroll Gantz. *Η ηλεκτρική σκούπα: Μια ιστορία. McFarland, 2012. Σελ. 40*]. Παρά την απλότητα που προσέφερε, ο κινητήρας AC του Tesla είχε προβλήματα ελέγχου και λειτουργικότητας [Sakae Yamamura. *Κινητήρες για εφαρμογές υψηλής απόδοσης: Ανάλυση και έλεγχος. CRC Press, 1986. Σελ. 2*], γεγονός που επέτρεψε στους κινητήρες DC να διατηρούν σταθερή παρουσία σε βιομηχανικές εφαρμογές για πολλές δεκαετίες.

Η Επιστροφή των κινητήρων μόνιμων μαγνητών

Μέχρι τον εικοστό αιώνα, το μόνιμο μαγνητικό υλικό περιοριζόταν σε φυσικά απαντώμενο μαγνητίτη. Παρόλο που στις αρχές του αιώνα η επιστημονική έρευνα οδηγήθηκε στην ανακάλυψη νέων τύπων μαγνητικών υλικών όπως ο άνθρακας, το κοβάλτιο και ο χάλυβας wolfram, τα υλικά αυτά ήταν αρχικά χαμηλής ποιότητας. Η ανάπτυξη των μαγνητών Alnico αναδείχθηκε καθοριστική, καθώς οι μαγνήτες αυτοί φαίνονταν πως θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές [Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen και Valeria Hrabovcova. Σχεδιασμός περιστρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών. John Wiley & Sons, 2009. Σελ. 200].

Μετά από εκτενή έρευνα τη δεκαετία του 1930, ανακαλύφθηκε ότι «σημαντικές προσθήκες αλουμινίου, νικελίου και κοβαλτίου σε διάλυμα με σίδηρο παρήγαγαν ένα πολύ αποτελεσματικό και εμπορικά βιώσιμο μόνιμο μαγνήτη που παράγεται με συμβατική χύτευση πλινθώματος. Ονομαζόμενοι ως μαγνήτες Alnico, ήταν 100 φορές ισχυρότεροι από οποιονδήποτε άλλο γνωστό μαγνητικό υλικό» [Peter Kelly Sokolowski. Επεξεργασία και προστασία σωματιδίων μόνιμου μαγνήτη σπάνιων γαιών για εφαρμογές μαγνητικού δεσμού. ProQuest, 2007. Σελ. 6]. Στη δεκαετία του 1950, ο φερρίτης ένα είδος κεραμικού μόνιμου μαγνήτη εμφανίστηκε και χρησιμοποιήθηκε σε κινητήρες για μικρές συσκευές. Ωστόσο στη δεκαετία του 1960, ένα άλλο σημαντικό βήμα οδήγησε στην διευρυμένη χρήση των μόνιμων μαγνητών σε ηλεκτρικούς κινητήρες, όταν εφευρέθηκαν οι ενώσεις σπάνιων γαιών και κοβαλτίου. Παρόλη την σημαντικότητα τους, τα υλικά αυτά επισκιάστηκαν από την ανακάλυψη των μόνιμων μαγνητών νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου στη δεκαετία του 1980 [Alex Gkolyntman. Σύγχρονη τεχνολογία Ferrite. Springer, 2005. Σελ. 227], οι οποίοι «απέδωσαν υψηλότερη ενέργεια ενώ ήταν πιο συχνά απαντώμενοι στη φύση από το σπάνιο σαμάριο και το κοβάλτιο» [Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen και Valeria Hrabovcova. Σχεδιασμός περιστρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών. John Wiley & Sons, 2009. Σελ. 200]. Μόλις στη δεκαετία του 1970 άρχισαν να εμφανίζονται οι DC κινητήρες μόνιμων μαγνητών χωρίς ψήκτες στην αγορά. Η καθυστέρηση αυτή οφειλόταν όχι μόνο στην ανάπτυξη μόνιμων μαγνητών υψηλής ενέργειας, αλλά και στην ανάπτυξη συσκευών ισχύος και ηλεκτρονικών ελεγκτών που θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τη μηχανική εναλλαγή με ηλεκτρονική μετατροπή [Chang-liang Xia. Μονάδες και χειριστήρια κινητήρα DC μόνιμου μαγνήτη χωρίς ψήκτες. John Wiley & Sons, 2012. Σελ. 2] ([1]).

Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατά το δυνατόν ολοκληρωμένη μελέτη ενός ηλεκτρικού κινητήρα μόνιμων μαγνητών και του τρόπου μέσω του οποίου αυτός μπορεί να σχεδιαστεί αποτελεσματικά, με κύρια σημεία ενδιαφέροντος τις προδιαγραφές εξόδου του. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού πραγματοποιείται πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του κινητήρα, αλλά και διερεύνηση για τις καταλληλότερες σιδηρομαγνητικές λαμαρίνες που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του πυρήνα. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η σχεδίαση ενός κινητήρα με υψηλή τιμή πυκνότητας ροπής, μειωμένων ταλαντώσεων ροπής, χαμηλού δείκτη αρμονικής παραμόρφωσης και χαμηλών απωλειών ισχύος, σε ταχύτητα περιστροφής 450 Στροφών Ανά Λεπτό.

Βασική προδιαγραφή της εργασίας είναι η μελέτη κινητήρων σταθερού όγκου (σταθερής διατομής και ενεργού μήκους). Σημαντικό στοιχείο διερεύνησης αποτελεί η συγκριτική ανάλυση δύο διαφορετικών τυλιγμάτων στάτη, συγκεκριμένα η θεώρηση κατανεμημένων τυλιγμάτων κλασματικού βήματος και συγκεντρωμένων τυλιγμάτων διπλής στρώσεως χωρίς

επικάλυψη των άκρων των πηνίων αντίστοιχα. Πραγματοποιείται διερεύνηση γεωμετρικών χαρακτηριστικών διαστάσεων των κινητήρων, αλλά και διαφορετικών σχημάτων δοντιών στάτη και διαφορετικών τοπολογιών χωροθέτησης των μαγνητών στον δρομέα. Επιπλέον εξετάζεται η επίπτωση χρησιμοποίησης διαφορετικών σιδηρομαγνητικών λαμαρινών, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της διαμόρφωσης των κινητήρων.

Δομή της εργασίας

- Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται μία εκτενής ανάλυση των διαφόρων τύπων ηλεκτρικών κινητήρων, των κυρίων χαρακτηριστικών τους καθώς και των εφαρμογών για τις οποίες αυτοί επιλέγονται ([2],[3]).
- Στο Κεφάλαιο 2 ακολουθεί η θεωρητική περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του κινητήρα μονίμων μαγνητών. Επίσης πραγματοποιείται ανάλυση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων (λογισμικό FEMM) μέσω της οποίας γίνεται η μελέτη. Εν συνεχεία παρατίθενται αναλυτικές πληροφορίες σχετικά με τον υπολογισμό όλων των σημείων ενδιαφέροντος εξόδου ενός ηλεκτρικού κινητήρα, όπως: α) η ροπή, β) η αρμονική παραμόρφωση γ) η ισχύς εξόδου και δ) οι απώλειες ισχύος ([4] [5] [6] [7] [8] [9] [10]).
- Στο Κεφάλαιο 3 αναφέρονται τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του κινητήρα και οι απαιτήσεις που αυτός πρέπει να ικανοποιεί, με βάση τους στόχους που έχουν τεθεί. Ακολούθως πραγματοποιείται προκαταρκτική σχεδίαση κατά την οποία ορίζονται οι κύριες γεωμετρικές μεταβλητές του κινητήρα. Οι μεταβλητές αυτές παραμένουν αναλλοίωτες καθ' όλη την διαδικασία βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται όλες οι μεταβλητές που θα μελετηθούν στο επόμενο κεφάλαιο.
- Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται ενδελεχώς η διαδικασία βελτιστοποίησης γεωμετρίας για αμφότερα τα δύο τυλίγματα πηνίων στάτη, η οποία βασίζεται στην ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων. Μελετώνται συνολικά πεντακόσιοι σαράντα (540) κινητήρες διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών, από τους οποίους προκύπτει ο βέλτιστος για κάθε μία εκ των δύο διαμορφώσεων τυλιγμάτων που προαναφέρθηκαν ([11]).
- Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται η διερεύνηση των επιπτώσεων χρησιμοποίησης διαφορετικών σιδηρομαγνητικών λαμαρινών στις δύο τελικές γεωμετρίες κινητήρων που προέκυψαν. Αρχικά γίνεται λεπτομερής ανάλυση των χαρακτηριστικών των υλικών, στα οποία συμπεριλαμβάνονται κράματα πυριτίου-σιδήρου ([12]), κοβαλτίου-σιδήρου ([13],[14]) και καθαρός σίδηρος ([15]), ενώ στη συνέχεια ακολουθεί η εφαρμογή και αξιολόγηση αυτών.
- Στο κεφάλαιο 6 ανακεφαλαιώνονται τα κυριότερα αποτελέσματα της εργασίας και συγκεντρώνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν. Τέλος παρατίθενται τα σημεία επιστημονικής συνεισφοράς της παρούσας εργασίας και προτείνονται ορισμένα θέματα προς περαιτέρω διερεύνηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

Κατηγοριοποίηση ηλεκτρικών κινητήρων συγκρίσεις και συμπεράσματα

1.1 Εισαγωγή

Ο ηλεκτρικός κινητήρας ή ηλεκτροκινητήρας, είναι διάταξη που χρησιμοποιείται για την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική. Για τον λόγο αυτό αποτελείται από δύο βασικά μέρη. Το στατικό μέρος του κινητήρα, το οποίο ονομάζεται «στάτης» ή «στάτορας», και το περιστρεφόμενο μέρος του που ονομάζεται «δρομέας» ή «ρότορας». Οι κινητήρες μπορούν να διαχωριστούν σε κατηγορίες, ανάλογα με τον τύπο ρεύματος που διαρρέει τα τυλίγματα τους, δηλαδή τα πηνία που τους τροφοδοτούν με την προαναφερθείσα ηλεκτρική ενέργεια, σε κινητήρες συνεχούς και κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος. Ωστόσο οι ως άνω κατηγορίες κινητήρων μπορούν με τη σειρά τους να διαχωριστούν εκ νέου σε υποκατηγορίες. Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίζονται σε σύγχρονους, όταν ο δρομέας στρέφεται με συχνότητα αντίστοιχη αυτήν της περιστροφής των ρευμάτων, και ασύγχρονους, όταν στον δρομέα παρατηρείται ολίσθηση και συνεπώς περιστροφή με συχνότητα μικρότερη αυτής των ρευμάτων. Διαφαίνεται λοιπόν πως οι ηλεκτρικοί κινητήρες μπορούν να διακριθούν σε πολλές κατηγορίες. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητη μία σχετική διερεύνηση αυτών. Στο παρόν κεφάλαιο επιχειρείται μία εκτενής περιγραφή όλων των διαφορετικών τύπων ηλεκτρικών κινητήρων, των εφαρμογών στις οποίες αυτοί επιλέγονται, καθώς και των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων τους.

1.2 Κατηγοριοποίηση των ηλεκτρικών κινητήρων

1.2.1 Εξέλιξη κινητήρων

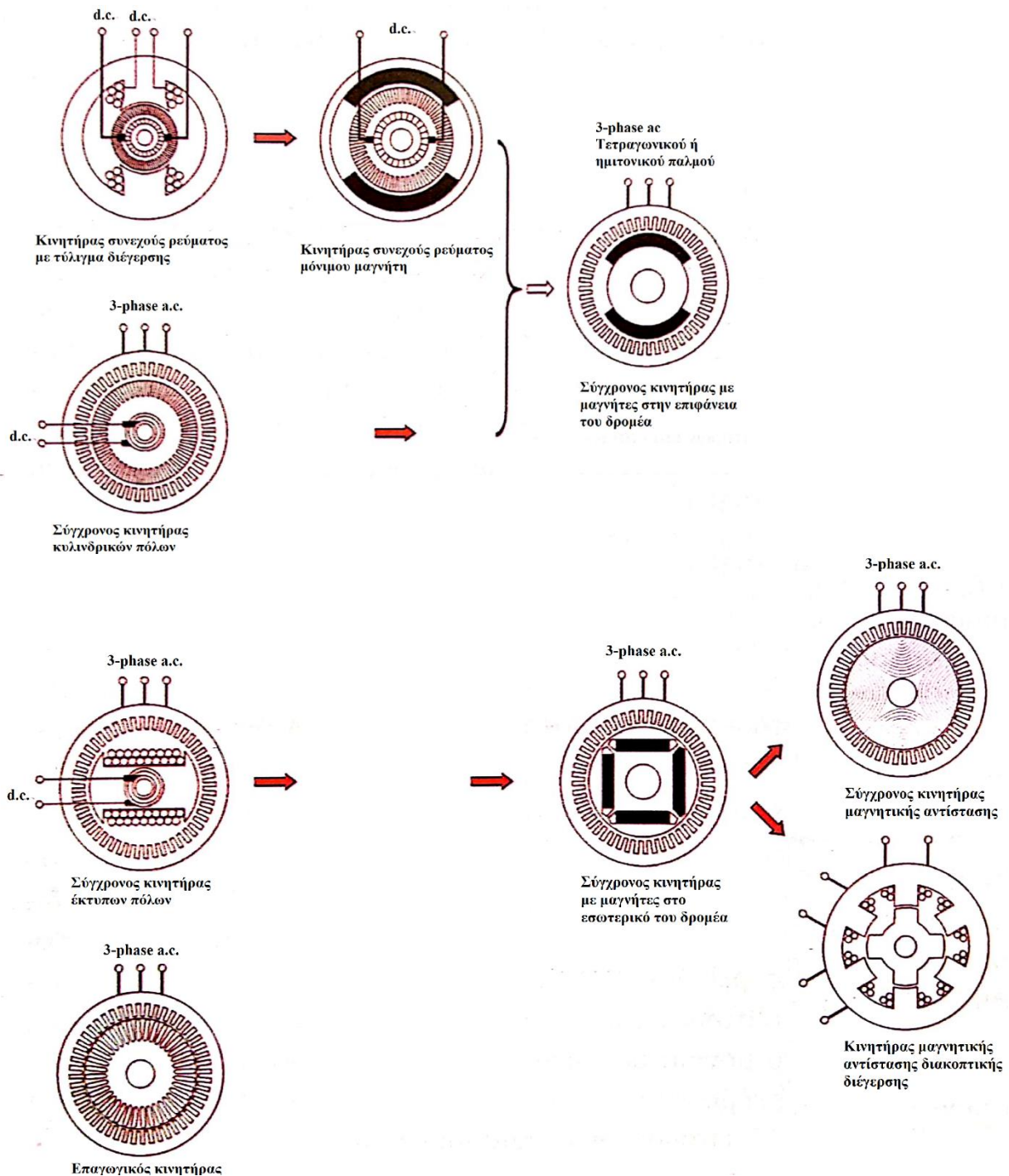
Οι ηλεκτρικοί κινητήρες μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες :

- I. Κινητήρες συνεχούς ρεύματος με σύστημα συλλέκτη-ψηκτρών για την τροφοδοσία του δρομέα. Στην κατηγορία αυτή το συνεχές ρεύμα τροφοδοσίας του στάτη και του δρομέα παράγεται από την ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου ή δίνεται από μπαταρίες. Επίσης, στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη (permanent magnet DC-commutator motors) στους οποίους το τύλιγμα της διέγερσης του στάτη έχει αντικατασταθεί με μόνιμους μαγνήτες καθώς και οι κινητήρες universal (κινητήρες συνεχούς ρεύματος σε συνδεσμολογία διέγερσης σειράς), οι οποίοι λειτουργούν με εναλλασσόμενη τάση.
- II. Κλασσικοί κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι επαγωγικοί κινητήρες με τυλίγματα διέγερσης. Οι κινητήρες αυτοί τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενη ημιτονοειδή τάση στο στάτη και παράγουν στο διάκενο στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.
- III. Σύγχρονοι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν κυρίως οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (permanent magnet synchronous motors) και οι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης (reluctance motors). Κοινό χαρακτηριστικό των κινητήρων αυτών είναι ότι δεν έχουν ολισθαίνουσες επιφάνειες (ψήκτρες συλλέκτη ή ψήκτρες-δακτυλίου ολίσθησης) για την αγωγή σύνδεση του στρεφόμενου δρομέα με το ακίνητο σημείο της τάσης τροφοδοσίας τους.
- IV. Ειδικού τύπου κινητήρες. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι ειδικού τύπου κινητήρες οι οποίοι δεν μπορούν να ενταχθούν στις προηγούμενες τρεις κατηγορίες κινητήρων. Αυτοί είναι οι βηματικοί κινητήρες (stepper motors), οι κινητήρες υστέρησης (hysteresis motors), κλπ.

Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται η εξέλιξη της κατασκευής των κινητήρων από τους κλασσικούς I) και II) μέχρι τους “σύγχρονους” brushless κινητήρες III).

Στην πρώτη στήλη παρουσιάζονται οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος, οι επαγωγικοί κινητήρες (βραχυκυκλωμένου και δακτυλιοφόρου δρομέα) και οι σύγχρονοι κινητήρες με τυλίγματα διέγερσης στο δρομέα (κυλινδρικοί και έκτυπων πόλων). Οι επαγωγικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού είναι οι μόνοι brushless κλασσικοί κινητήρες. Άλλωστε, το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος κατασκευής τους είναι οι σημαντικότεροι λόγοι για τους οποίους οι επαγωγικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού έχουν κυριαρχήσει στις περισσότερες εφαρμογές βιομηχανικής ηλεκτρικής κίνησης με μη-ελεγχόμενη ταχύτητα περιστροφής. Οι επαγωγικοί κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα έχουν ψήκτρες και δακτυλίου ολίσθησης και δεν μπορούν με κατασκευαστικές αλλαγές να μετατραπούν σε brushless, γιατί τότε χάνεται ένα συγκριτικό λειτουργικό πλεονέκτημα τους ως προς τους κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού που είναι η δυνατότητα σύνδεσης εξωτερικής αντίστασης στο κύκλωμα του δρομέα για τη ρύθμιση της ροπής και του ρεύματος εκκίνησης.

Στη δεύτερη στήλη παρατίθενται οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη οι οποίοι προέρχονται ως εξέλιξη από τους συμβατικούς κινητήρες συνεχούς ρεύματος, όταν αντικατασταθεί το τύλιγμα διέγερσης του στάτη από μόνιμο μαγνήτη.



Εικόνα 1.1. Εξέλιξη των κλασσικών κινητήρων σε brushless κινητήρες.

Στην Τρίτη στήλη είναι οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (PM) για τους οποίους έχουμε δύο σχεδιαστικούς τύπους :

- i. Σύγχρονοι κινητήρες με μαγνήτες στην επιφάνεια του δρομέα (SPM, surface PM motors). Αυτοί προέρχονται από την εξέλιξη των κινητήρων συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη αντιμεταθέτοντας τις θέσεις των μαγνητών και της περιέλιξης (γι' αυτό είναι γνωστοί ως brushless DC motors). Δηλαδή, οι μαγνήτες βρίσκονται στον δρομέα ενώ τα τυλίγματα στις περιελίξεις του

στάτη. Ωστόσο, αν δούμε τις αλλαγές μόνο από τον τρόπο παραγωγής της διέγερσης, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι προέρχονται απευθείας από τους σύγχρονους κινητήρες κυλινδρικών πόλων όπου το τύλιγμα διέγερσης του δρομέα έχει αντικατασταθεί από μόνιμους μαγνήτες.

- ii. Σύγχρονοι κινητήρες με μαγνήτες στο εσωτερικό του δρομέα (IPM, interior PM motors). Αυτοί προέρχονται απευθείας από τους συμβατικούς σύγχρονους κινητήρες έκτυπων πόλων όπου το τύλιγμα διέγερσης του δρομέα έχει αντικατασταθεί από μόνιμους μαγνήτες.

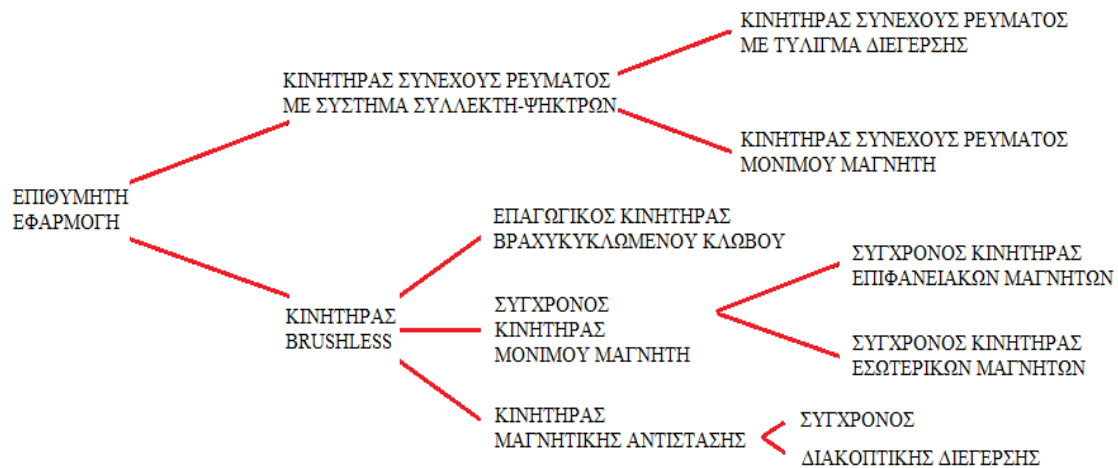
Στην τέταρτη στήλη είναι δύο τύποι κινητήρων μαγνητικής αντίστασης : οι σύγχρονοι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης (Syn RM, synchronous reluctance motors) και οι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης (SRM, switched reluctance motors). Οι κινητήρες αυτοί είναι brushless, όπως και της προηγούμενης στήλης, και προέρχονται από τους σύγχρονους κινητήρες εσωτερικής θέσης μαγνητών όταν αφαιρεθούν οι μαγνήτες από το δρομέα. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην έλξη που ασκεί ο στάτης στο δρομέα λόγω της διαφορετικής μαγνητικής αντίστασης που παρουσιάζουν οι πυρήνες μεταξύ τους. Οι σύγχρονοι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης έχουν έκτυπους πόλους μόνο στον δρομέα, ενώ στο στάτη έχουν τριφασική περιέλιξη και τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενη τάση. Οι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης έχουν έκτυπους πόλους και στον στάτη και στον δρομέα. Στις μηχανές αυτές η τροφοδοσία του στάτη είναι παλμοί τάσης συγκεκριμένης συχνότητας ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής ενώ η διάρκεια των παλμών εξαρτάται από την ροπή φόρτισης του κινητήρα.

Στην παραπάνω παρουσίαση δεν έγινε εκτενής αναφορά στους βηματικούς κινητήρες καθώς και στους διάφορους ειδικούς τύπους «κλασικών» και «σύγχρονων» κινητήρων, όπως οι επαγωγικοί και σύγχρονοι κινητήρες γραμμής κίνησης (linear motors), οι κινητήρες αξονικής ροής (axial flux motors), οι κινητήρες υστέρησης κλπ. Οι βηματικοί κινητήρες είναι brushless κινητήρες και ο σχεδιασμός τους προκύπτει από τον συνδυασμό σύγχρονων κινητήρων μόνιμου μαγνήτη και κινητήρων μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης. Οι κινητήρες γραμμικής κίνησης δίνουν ευθύγραμμη κίνηση στον δρομέα, ενώ στους κινητήρες αξονικής ροής τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι το μικρό αξονικό μήκος και η μεγάλη ροπή αδράνειας. Τέλος οι κινητήρες υστέρησης είναι συνήθως μικρής ισχύος μηχανές με τυλίγματα μόνο στον στάτη και η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην εκμετάλλευση του φαινομένου της υστέρησης στον πυρήνα του δρομέα.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη των σύγχρονων κινητήρων μόνιμου μαγνήτη, οι οποίοι ως επί το πλείστον χρησιμοποιούνται σε σερβοκινητήρια συστήματα, δηλαδή σε συστήματα εφαρμογών στις οποίες απαιτείται ακρίβεια και γρήγορη απόκριση στα σήματα εντολής ταχύτητας και θέσης δρομέα (γρήγορες και ελεγχόμενες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις).

1.2.2 Βασικά κριτήρια επιλογής των ηλεκτρικών κινητήρων σε κινητήρια συστήματα μεταβλητής ταχύτητα

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι δυνατότητες που υπάρχουν στην επιλογή κινητήρων για τη χρησιμοποίησή τους σε στρεφόμενα κινητήρια συστήματα μεταβλητής ταχύτητας.



Σχήμα 1.2. Επιλογές ηλεκτρικών κινητήρων για ένα στρεφόμενο κινητήριο σύστημα μεταβλητής ταχύτητας.

Είναι φανερό ότι η πρώτη επιλογή αφορά το ερώτημα αν θα χρησιμοποιηθεί κινητήρας συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες-συλλέκτη ή brushless και στην συνέχεια αν ο κινητήρας θα είναι επαγωγικός ή σύγχρονος με τυλίγματα διέγερσης, μαγνητικής αντίστασης ή με μόνιμους μαγνήτες καθώς επίσης και ποια θα είναι η θέση των μαγνητών στον πυρήνα της μηχανής. Για να μπορέσει να γίνει η επιλογή αυτή, θα πρέπει να υπάρχει πλήρης επίγνωση των χαρακτηριστικών του εκάστοτε είδους κινητήρα. Στη συνέχεια ακολουθεί μία εκτενής περιγραφή των χαρακτηριστικών για κάθε ένα από τα παραπάνω είδη ηλεκτρικών κινητήρων.

1.2.2.1 Κινητήρας συνεχούς ρεύματος με τύλιγμα διέγερσης και σύστημα συλλέκτη-ψηκτρών

Οι παραδοσιακοί κινητήρες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιήθηκαν ευρέως, και χρησιμοποιούνται ακόμη σε κινητήρια συστήματα μεταβλητής ταχύτητας. Η ταχύτητα περιστροφής τους είναι εύκολο να ελεγχθεί μεταβάλλοντας τις τάσεις τροφοδοσίας στο στάτη και το δρομέα με απλές και οικονομικές μονάδες οδήγησης (ελεγχόμενες ανορθωτικές γέφυρες και choppers) σε αντίθεση με τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος, όπου απαιτείται έλεγχος της συχνότητας της θεμελιώδους αρμονικής τάσης και συνεπώς περισσότερο πολύπλοκες και ακριβότερες διατάξεις οδήγησης. Σε εφαρμογές που αρκεί η λειτουργία του κινητήρα στα δύο τεταρτημόρια, το χαμηλό κόστος της διάταξης οδήγησης κάνει τη χρήση των κινητήρων συνεχούς ρεύματος αρκετά ανταγωνιστική. Αντίθετα σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων όπου απαιτείται πέδηση του κινητήρα με ανάκτηση ισχύος, το συνολικό κόστος της διάταξης οδήγησης είναι υψηλό και ο έλεγχος πολύπλοκος γιατί απαιτούνται είτε δύο αντιπαράλληλες ανορθωτικές γέφυρες είτε ένας DC-AC αντιστροφείας ισχύος. Ωστόσο το σημαντικότερο μειονέκτημα των «κλασικών» κινητήρων συνεχούς ρεύματος σε σχέση με τους επαγωγικούς κινητήρες και τους «σύγχρονους» brushless κινητήρες είναι το σύστημα συλλέκτη-ψηκτρών, γιατί αυξάνει το κόστος και τη συχνότητα συντήρησης, περιορίζει τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής και αυξάνει το συνολικό όγκο της μηχανής. Τα παραπάνω μαζί με τα μειονεκτήματα της μεγαλύτερης αδράνειας και του μικρότερου βαθμού απόδοσης είναι οι κυριότεροι λόγοι για τους οποίους δεν προτιμώνται οι μηχανές συνεχούς ρεύματος σε σερβοκινητήρια συστήματα.

1.2.2.2 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος μονίμου μαγνήτη (PMDC-commutator motors)

Στους κινητήρες αυτούς το τύλιγμα διέγερσης στο στάτη έχει αντικατασταθεί από μόνιμο μαγνήτη. Με τον τρόπο αυτό δεν μπορούμε να μεταβάλλουμε την διέγερση με αποτέλεσμα ο έλεγχος της ταχύτητάς τους να γίνεται μόνο από το τύλιγμα του δρομέα μεταβάλλοντας την τάση τροφοδοσίας των. Οι κινητήρες συνήθως είναι μικρής ισχύος και χρησιμοποιούνται σε μικρό-εργαλεία, ηλεκτρονικούς υπολογιστές, οικιακές συσκευές, διεγέρτριες σύγχρονων γεννητριών κλπ.

Κύρια χαρακτηριστικά των κινητήρων αυτών είναι ότι δεν έχουν ωμικές απώλειες στο στάτη και τα προβλήματα της μετάβασης είναι μειωμένα λόγω της μικρής τιμής της μαγνητικής διαπερατότητας του μαγνήτη. Επίσης οι κινητήρες αυτοί έχουν μικρότερο όγκο στάτη λόγω του μικρότερου χώρου που καταλαμβάνει ο μαγνήτης σε σχέση με τα τυλίγματα χαλκού των «κλασσικών» κινητήρων συνεχούς ρεύματος.

1.2.2.3 Επαγωγικοί (ασύγχρονοι) κινητήρες

Ο επαγωγικοί κινητήρες παρουσιάζονται σε δύο κατασκευαστικούς τύπους: α) βραχυκυκλωμένου κλωβού και β) δακτυλιοφόρου δρομέα. Οι κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού είναι brushless, ενώ οι κινητήρες δακτυλιοφόρου δρομέα έχουν ολισθαίνουσες επιφάνειες στο δρομέα (δακτυλίου ολίσθησης και ψήκτρες).

Ο έλεγχος της ταχύτητας και των δύο τύπων επαγωγικών κινητήρων γίνεται μεταβάλλοντας τη συχνότητα αναλογικά με την τάση τροφοδοσίας του στάτη (βαθμωτός έλεγχος V/f) μέσω ενός αντιστροφέα (inverter). Στις περιπτώσεις όπου δεν απαιτείται ακριβής έλεγχος της ταχύτητας και της θέσης, χρησιμοποιείται σύστημα ελέγχου ανοικτού βρόχου. Ο έλεγχος ανοικτού βρόχου είναι απλός και δεν απαιτεί μέτρηση της ταχύτητας. Έτσι το σύστημα που περιλαμβάνει τον μετατροπέα ισχύος (power converter) και το κύκλωμα ελέγχου είναι σχετικά χαμηλού κόστους και εύκολο στην εγκατάστασή του. Ωστόσο δεν επιτυγχάνεται ακριβής έλεγχος της ταχύτητας του κινητήρα, γιατί η ταχύτητα μεταβάλλεται με το φορτίο (ολίσθηση) και το κινητήριο σύστημα δεν έχει γρήγορη απόκριση σε μεταβολές της ταχύτητας εντολής (δεν μπορεί να αναπτύξει μεγάλη και κυρίως ελεγχόμενη επιτάχυνση και επιβράδυνση). Η ακρίβεια στον έλεγχο της ταχύτητας μπορεί να επιτευχθεί εάν χρησιμοποιηθεί σύστημα κλειστού βρόχου όπου έχουμε ανάδραση του σήματος της ταχύτητας. Ωστόσο παραμένει το μειονέκτημα των σχετικά χαμηλών επιταχύνσεων και επιβραδύνσεων του δρομέα.

Στις περιπτώσεις που απαιτείται υψηλή ακρίβεια στον έλεγχο και την απόκριση στα σήματα εντολής, χρειάζεται μετατροπέας ισχύος με συστήματα κλειστού βρόχου διανυσματικού ελέγχου (vector control) ή έλεγχος προσανατολισμένου πεδίου (field-oriented control). Για τη λειτουργία του διανυσματικού ελέγχου πρέπει σε κάθε στιγμή να είναι γνωστή η θέση του δρομέα και συνεπώς απαιτείται η εγκατάσταση στο δρομέα ειδικού αισθητήριου θέσης. Η υλοποίηση του διανυσματικού ελέγχου στους επαγωγικούς κινητήρες είναι αρκετά πολύπλοκη και εξαρτάται από τις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου των. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ακρίβεια του ελέγχου να επηρεάζεται σημαντικά από τις μεταβολές των παραμέτρων που προκαλούνται κυρίως λόγω μεταβολών της θερμοκρασίας και του μαγνητικού κορεσμού.

Οι επαγωγικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού έχουν χαμηλό κατασκευαστικό κόστος. Ωστόσο παρουσιάζουν μεγαλύτερες απώλειες σε σχέση με τους brushless κινητήρες μονίμου μαγνήτη, γιατί έχουν ωμικές απώλειες στον δρομέα λόγω του ρεύματος φορτίου και επίσης λειτουργούν πάντοτε με επαγωγικό συντελεστή ισχύος. Το σύστημα ελέγχου για την λειτουργία τους ως σερβοκινητήρες είναι πολύπλοκο και επιπλέον δεν μπορούν να επιτύχουν την δυναμική απόκριση των brushless σύγχρονων κινητήρων μονίμου μαγνήτη, γιατί έχουν μεγαλύτερη αδράνεια. Έτσι οι επαγωγικοί κινητήρες κυρίως χρησιμοποιούνται σε απευθείας

τροφοδοσία από το δίκτυο καθώς και σε κινητήρια συστήματα βαθμωτού ελέγχου ταχύτητας V/f ανοικτού ή κλειστού βρόχου.

1.2.2.4 Σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη

Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη έχουν τριφασικό τύλιγμα στο στάτη και μόνιμο μαγνήτη στο δρομέα. Έτσι, όπως και στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη, δεν μπορούμε να ελέγξουμε (τουλάχιστον άμεσα) το πεδίο διέγερσης. Σημαντικό πλεονέκτημα των μηχανών αυτών είναι ότι δεν έχουν ωμικές απώλειες στο δρομέα και συνεπώς παρουσιάζουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης και μεγαλύτερο λόγο ροπής προς όγκο μηχανής (μεγάλη πυκνότητα ροπής) σε σύγκριση με τους επαγωγικούς κινητήρες. Εντούτοις, οι μαγνήτες βρίσκονται στο εσωτερικό της μηχανής (στο δρομέα), και μάλιστα εκεί όπου είναι δύσκολη η απαγωγή θερμότητας. Επειδή οι ιδιότητες των μαγνητών επηρεάζονται σημαντικά από την θερμότητα (μεταβολή της καμπύλης απομαγνήτισης), επιβάλλεται η θερμοκρασία λειτουργίας των μηχανών αυτών να είναι χαμηλή.

Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη χωρίζονται σε ημιτονοειδείς και τετραγωνικού παλμού ανάλογα με την τεχνική ελέγχου και την μορφή μαγνητεγερτικής δύναμης των τυλιγμάτων τους. Οι ημιτονοειδείς κινητήρες ονομάζονται σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη (brushless PMAC synchronous motors ή sine wave PM brushless motors), όπου τα ρεύματα τροφοδοσίας του στάτη είναι τριφασικά ημιτονοειδή και η λειτουργία τους βασίζεται στην αρχή του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου στο διάκενο. Αντίθετα οι σύγχρονοι κινητήρες τετραγωνικού παλμού (square PM brushless motors) τροφοδοτούνται με τριφασικά ρεύματα τετραγωνικής μορφής στο στάτη και επειδή προσεγγίζουν την αρχή λειτουργίας των «κλασικών» μηχανών συνεχούς ρεύματος είναι γνωστοί ως brushless DC κινητήρες.

Στους σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη οι μαγνήτες μπορεί να είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δρομέα (surface type) ή στο εσωτερικό του πυρήνα του δρομέα (interior type). Ως κινητήρες τετραγωνικού παλμού (brushless DC κινητήρες) χρησιμοποιούνται οι σύγχρονες μηχανές με μαγνήτες τοποθετημένους στην επιφάνεια του δρομέα. Ως ημιτονοειδείς κινητήρες μπορεί να είναι και οι δύο τύποι σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη και μάλιστα ανάλογα με τη θέση των μαγνητών στο δρομέα, η λειτουργία τους προσεγγίζει τη λειτουργία ενός συμβατικού σύγχρονου κινητήρα με τυλίγματα διέγερσης είτε κυλινδρικών είτε έκτυπων πόλων. Οι σύγχρονοι κινητήρες επιφανειακής θέσης μαγνητών προσεγγίζουν τη λειτουργία των σύγχρονων κινητήρων κυλινδρικών πόλων, ενώ οι σύγχρονοι κινητήρες εσωτερικής θέσης μαγνητών στο δρομέα προσεγγίζουν τη λειτουργία των σύγχρονων κινητήρων έκτυπων πόλων.

Τα πλεονεκτήματα των σύγχρονων κινητήρων μόνιμου μαγνήτη είναι οι υψηλός βαθμός απόδοσης, η μεγάλη πυκνότητα ροπής ανά όγκο μηχανής, η μικρή αδράνεια και η σχετικά ικανοποιητική τιμή του συντελεστή ισχύος. Η υλοποίηση του διανυσματικού ελέγχου στους κινητήρες αυτούς είναι ευκολότερη σε σύγκριση με τους επαγωγικούς κινητήρες και επιπλέον δεν εξαρτάται από τις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου της μηχανής. Ένα κινητήριο σύστημα διανυσματικού ελέγχου με σύγχρονους κινητήρες μόνιμου μαγνήτη έχει πολύ καλή δυναμική απόκριση σε μεταβολές των σημάτων εντολής ταχύτητας και θέσης, γιατί αναπτύσσει πολύ γρήγορες και κυρίως ελεγχόμενες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις. Ωστόσο οι κινητήρες αυτοί έχουν υψηλό κόστος αγοράς (κυρίως λόγω του μαγνήτη) και δεν μπορούν να λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες γιατί επηρεάζονται τα χαρακτηριστικά των μαγνητών.

1.2.2.5 Κινητήρες μαγνητικής αντίστασης

Οι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης δεν έχουν τυλίγματα και γενικά αγώγιμα μέρη στο δρομέα. Χαρακτηρίζονται ως ηλεκτρικές μηχανές απλής (μονής) διέγερσης και η κατασκευή τους είναι απλή και οικονομική. Στους κινητήρες αυτούς η ροπή αναπτύσσεται λόγω της έλξης που ασκεί το πεδίο διέγερσης του στάτη προς το σιδηρομαγνητικό πυρήνα του δρομέα, δηλαδή της έλξης που ασκείται στο δρομέα να κινηθεί προς εκείνη τη θέση όπου η μαγνητική αντίσταση μεταξύ των πυρήνων στάτη και δρομέα γίνεται ελάχιστη. Συνεπώς, για να αναπτυχθεί ροπή στις μηχανές αυτές θα πρέπει να υπάρχουν διακριτά σημεία στα οποία η μαγνητική αντίσταση μεταξύ των πυρήνων στάτη και δρομέα να είναι μέγιστη και ελάχιστη. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει είτε μόνο ο πυρήνας του δρομέα, είτε και του στάτη και του δρομέα να έχουν έκτυπους πόλους.

Υπάρχουν δύο τύποι κινητήρων μαγνητικής αντίστασης : α) οι ημιτονοειδείς σύγχρονοι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης ή απλά σύγχρονοι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης (synchronous reluctance motors) όπου ο στάτης είναι κυλινδρικού τύπου, ενώ έκτυπους πόλους έχει μόνο ο δρομέας και β) οι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης διακοπτικής διέγερσης (switched reluctance motors), όπου έκτυπους πόλους έχει ο στάτης και ο δρομέας. Κοινό χαρακτηριστικό και των δύο τύπων κινητήρων μαγνητικής αντίστασης είναι ότι στο δρομέα δεν υπάρχουν μαγνήτες ούτε τυλίγματα χαλκού και συνεπώς ο δρομέας δεν έχει ρεύμα. Αυτό σημαίνει ότι δεν έχουν κάποιο περιορισμό ως προς τη θερμοκρασία του δρομέα, παρά μόνο ο περιορισμός που τίθεται ως προς την αντοχή των μονώσεων του στάτη. Επίσης, οι κινητήρες αυτοί έχουν απλή και στιβαρή κατασκευή, χαμηλό κατασκευαστικό κόστος και μικρή αδράνεια.

Τα μειονεκτήματα των κινητήρων μαγνητικής αντίστασης είναι ο χαμηλός συντελεστής ισχύος (δηλαδή χαμηλή τιμή kW/kVA) και ο μικρός λόγος ροπής προς τον όγκο μηχανής (μικρή πυκνότητα ροπής).

1.2.2.6 Αιτιολόγηση επιλογής PMSM

Όπως προαναφέρθηκε, σε κινητήρια συστήματα που απαιτείται μεγάλη ακρίβεια σε επιτάχυνση και επιβράδυνση, και γενικά υψηλή ευαισθησία στον έλεγχο ταχύτητας και «θέσης» του ρότορα, καταλληλότερη θεωρείται η επιλογή σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών (PMSM). Η μεγάλη πυκνότητα ροπής σε συνδυασμό με τον υψηλό βαθμό απόδοσης, για δεδομένο όγκο μηχανής, αποτελούν τα σημαντικότερα εκ των χαρακτηριστικών που καθιστούν τους κινητήρες μονίμων μαγνητών κατάλληλους για απαιτητικά κινητήρια συστήματα, όπως αυτά των αυτοκινήτων, τρένων, ηλεκτρικών πλοίων και πάσης φύσεως μέσων μεταφοράς. Ταυτοχρόνως για τους ίδιους λόγους μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μία πληθώρα εφαρμογών, όπως η βιομηχανία (αντλίες, ανεμιστήρες, συμπιεστές, ρομπότ, εσωτερικά συστήματα μεταφοράς) αλλά και τα συστήματα παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Λόγω προσωπικής επιθυμίας του συγγραφέα για ενασχόληση με κινητήρια συστήματα, όπως αυτά των ηλεκτρικών οχημάτων, η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί μελέτη των PMSM με σκοπό την σύγκριση κινητήρων με διαφορετικές γεωμετρίες και υλικά κατασκευής. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού δημιουργείται μία βάση δεδομένων, η οποία, με τη βοήθεια μιας αντικειμενικής συνάρτησης, αναδεικνύει τη βέλτιστη διαμόρφωση. Παρακάτω γίνεται μία εκτενέστερη αναφορά στα διαφορετικά είδη κινητήρα μονίμων μαγνητών, με βάση την θέση των μαγνητών στον δρομέα (επιφανειακών-εσωτερικών μαγνητών), αλλά και του ίδιου του δρομέα στον κινητήρα (εσωτερικού-εξωτερικού δρομέα).

1.3 Κατηγοριοποίηση κινητήρων μονίμων μαγνητών (PMSM)

1.3.1 Τοπολογία μαγνητών

1.3.1.1 Κινητήρες επιφανειακών μονίμων μαγνητών

Οι κινητήρες επιφανειακών μονίμων μαγνητών, αποτελούν την πιο συνηθισμένη διαμόρφωση κινητήρων μόνιμου μαγνήτη. Στη γεωμετρία αυτή, οι μόνιμοι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δρομέα, γεγονός που προσδίδει ιδιαίτερα μικρή πολυπλοκότητα κατασκευής, και συνεπάγεται χαμηλότερο κόστος. Ταυτόχρονα, η ύπαρξη των μαγνητών στην επιφάνεια του δρομέα, έχει ως αποτέλεσμα τη συγκέντρωση του μεγαλύτερου μέρους του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο (πρακτικά ανάμεσα σε στάτη και δρομέα) και συνεπώς επιφέρει ιδιαίτερα αυξημένη επίδοση της μηχανής. Φυσικά η γεωμετρία παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα, εκ των οποίων τα σημαντικότερα είναι : α) ο κίνδυνος απομαγνήτισης των μαγνητών λόγω ύπαρξης εξωτερικών πεδίων, β) η σταθερότητα της τιμής του μαγνητικού πεδίου στο δρομέα, η οποία δεν επιτρέπει μεταβολές στη διέγερση και γ) η δυσκολία εξασθένησης του πεδίου, όταν αυτό κρίνεται αναγκαίο. Επίσης, η παρουσία φυγοκεντρικών δυνάμεων οι οποίες επιδρούν στους μαγνήτες, μπορεί να προκαλέσει την φθορά, η ακόμα και την αποκόλλησή τους από τα σημεία ένωσης με τον δρομέα.

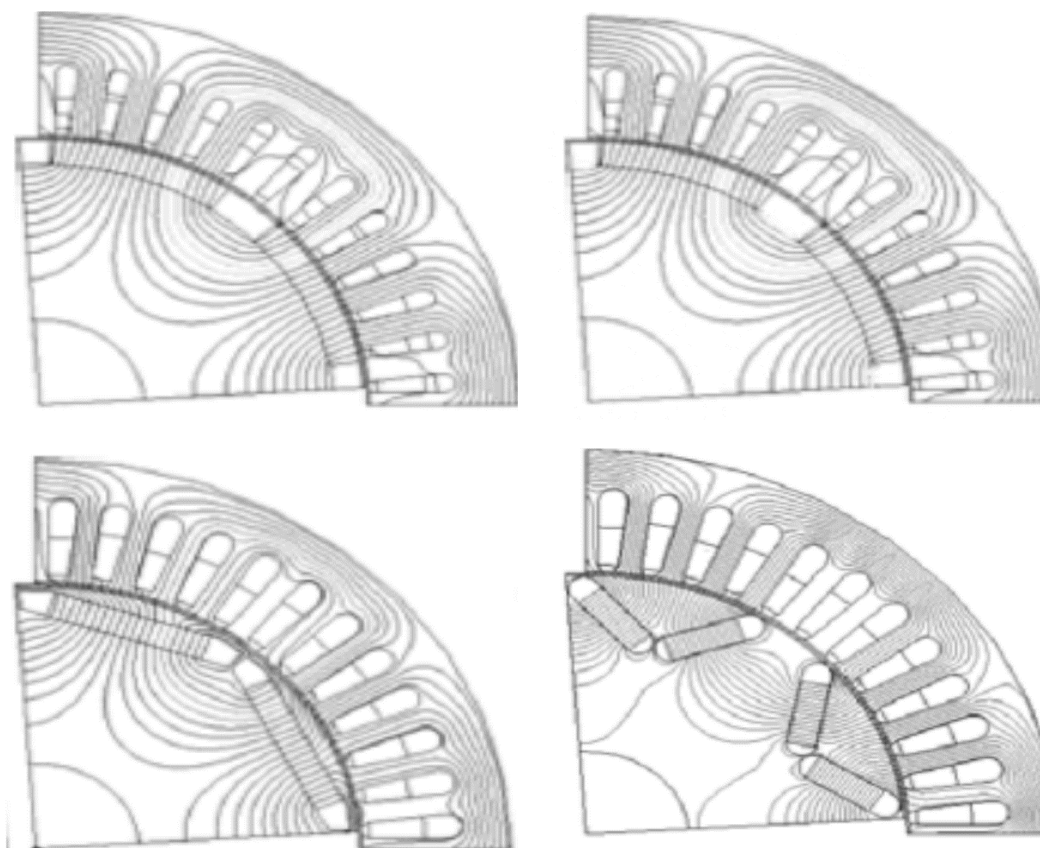
1.3.1.2 Κινητήρες εσωτερικά επιφανειακών μαγνητών

Οι κινητήρες εσωτερικά επιφανειακών μονίμων μαγνητών, αποτελούν μία τοπολογία στην οποία οι μόνιμοι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δρομέα, αλλά στο εσωτερικό της νοητής περιφέρειας του κύκλου που περιβάλλει αυτόν. Αυτό σημαίνει πώς ανάμεσα στους μόνιμους μαγνήτες υπάρχει σιδηρομαγνητική λαμαρίνα. Η ύπαρξη της λαμαρίνας, δημιουργεί εκτυπότητα, η οποία μειώνει την ροπή που είναι σε θέση να παράγει η μηχανή, ωστόσο μειώνει την επίδραση της φυγόκεντρου δύναμης, εκμηδενίζοντας έτσι τις πιθανότητες αποκόλλησης των μαγνητών από την επιφάνεια του δρομέα. Αμφότερες οι τοπολογίες επιφανειακών μονίμων μαγνητών, αντιμετωπίζουν υψηλές απώλειες μαγνητών, λόγω της έκθεσης αυτών στις αρμονικές της μαγνητεγερτικής δύναμης του διακένου.

1.3.1.3 Κινητήρες εσωτερικών μαγνητών

Οι κινητήρες εσωτερικών μονίμων μαγνητών αποτελούν την τοπολογία κατά την οποία οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται στο εσωτερικό του δρομέα. Σε αντίθεση με όσα αναφέραμε ως τώρα, η τοποθέτηση των μαγνητών στο εσωτερικό της λαμαρίνας, επιφέρει σημαντική μείωση της πιθανότητας απομαγνήτισης λόγω θερμικών, μαγνητικών ή μηχανικών καταπονήσεων, καθώς η θέση τους δεν επιτρέπει απότομες μεταβολές στην θερμοκρασία, μειώνει την επίδραση των εξωτερικών πεδίων και προστατεύει από μηχανικές καταπονήσεις. Ταυτόχρονα, καθίσταται πασιφανές, πως η κατασκευαστική πολυπλοκότητα είναι σαφώς μεγαλύτερη συγκριτικά με τις δύο προαναφερθείσες τοπολογίες, ενώ αυτό έχει σημαντικό αντίκτυπο και στο κόστος. Ιδιαίτερης σημασίας είναι το γεγονός ότι ο εσωτερικός μαγνήτης παρουσιάζει χαμηλότερη πυκνότητα ροπής σε σύγκριση με τον επιφανειακό. Από την άλλη πλευρά είναι σε θέση να παρέχει ευρεία περιοχή σταθερής ισχύος με σχετικά υψηλή πυκνότητα ροπής και υψηλό συντελεστή ισχύος καθώς το σώμα του δρομέα αποτελεί εμπόδιο στη μαγνητική ροή.

Παρακάτω, φαίνονται οι διαφορετικές τοπολογίες μαγνητών που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους:



Σχήμα 1.3. Τοπολογίες μαγνητών που αναφέρθηκαν και θα μελετηθούν στην συνέχεια ([3]).

1.3.2 Σχετική θέση στάτη - δρομέα

1.3.2.1 Κινητήρες εσωτερικού και εξωτερικού δρομέα

Η κατηγοριοποίηση των κινητήρων μονίμων μαγνητών, έγκειται και στη σχετική θέση δρομέα και στάτη. Από αυτήν προκύπτουν δύο κατηγορίες κινητήρων: α) οι κινητήρες εξωτερικού και β) οι κινητήρες εσωτερικού δρομέα. Οι κινητήρες εξωτερικού δρομέα χρησιμοποιούνται κυρίως σε ελαφριές εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, στις οποίες ο κινητήρας εφαρμόζεται απευθείας στον τροχό (on wheel). Το γεγονός αυτό της άμεσης εφαρμογής, χωρίς την παρεμβολή μέσων μετάδοσης, πλεονεκτεί στον καλύτερο και ακριβέστερο έλεγχο της ταχύτητας και της θέσης και στη μείωση των απωλειών μετάδοσης. Στον αντίποδα, οι κινητήρες εξωτερικού δρομέα, λόγω της προαναφερθείσας απουσίας μέσου μετάδοσης, απαιτούν πολύ αυξημένη ακρίβεια ελέγχου του κινητήρα καθώς και αυξημένη παροχή ροπής. Αντίθετα στους κινητήρες εσωτερικού δρομέα, η ύπαρξη μέσου μετάδοσης καθιστά ευκολότερη την δυνατότητα ελέγχου της ταχύτητας και θέσης του τροχού. Χαρακτηριστικό γνώρισμα της κατασκευής αυτής είναι ο μεγάλος λόγος ροπής προς αδράνεια. Γι' αυτό το λόγο η κατασκευή αυτή προτιμάται σε κινητήριες εφαρμογές στις οποίες απαιτούνται γρήγορες επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις. Ταυτόχρονα η ψύξη του πυρήνα γίνεται ευκολότερα αφού οι απώλειες είναι κυρίως στον στάτη, ο οποίος βρίσκεται κοντύτερα στο εξωτερικό περίβλημα.

Φυσικά η κατασκευή αυτή ενέχει περιορισμούς και μειονεκτήματα σε σχέση με την πρώτη, όπως ύπαρξη φυγόκεντρου δυνάμεως, η οποία τείνει να αποκολλήσει τους μαγνήτες από την επιφάνεια του δρομέα, σε αντίθεση με τους κινητήρες εξωτερικού δρομέα, στους οποίους η ίδια δύναμη τείνει να διατηρήσει τους μαγνήτες στην αρχική τους θέση.

Κοινό χαρακτηριστικό όλων των κινητήρων μονίμων μαγνητών (PMSM) είναι η ροπή cogging, στην οποία θα γίνει αναφορά στην παράγραφο 4.2.1.3 . Πρόκειται για μία παλμική ροπή, η οποία οφείλεται στην έλξη του πυρήνα του στάτη (και συγκεκριμένα των δοντιών του στάτη) από τους μαγνήτες του δρομέα. Η ροπή αυτή υπάρχει και όταν τα τυλίγματα του στάτη δεν διαρρέονται από φορτίο, και μπορεί να γίνει αντιληπτή εάν σε κατάσταση κενού φορτίου και ακινητοποιημένου δρομέα, προσπαθήσουμε με το χέρι να τον περιστρέψουμε, όπου και θα αντιμετωπίσουμε δυσκολία, λόγω της «τάσης» του δρομέα να διατηρηθεί στην θέση μικρότερης μαγνητικής αντίστασης (πρόκειται για την θέση του μαγνήτη έναντι κάποιου δοντιού) ([2]).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Θεωρητικό υπόβαθρο μελέτης σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών

2.1 Εισαγωγή

Οι κινητήρες μονίμων μαγνητών αποτελούνται, όπως όλοι οι ηλεκτρικοί κινητήρες, από ένα σταθερό μέρος, τον στάτορα, και ένα περιστρεφόμενο, τον δρομέα. Ο στάτορας αποτελείται από συμπαγές σιδηρομαγνητικό υλικό, το οποίο εμπεριέχει αυλακώσεις στις οποίες διανέμονται τα τυλίγματα, δηλαδή τα πηνία χαλκού, το εσωτερικό των οποίων διαρρέει το ηλεκτρικό ρεύμα με το οποίο τροφοδοτείται ο κινητήρας. Ο δρομέας αποτελείται ομοίως από το ίδιο σιδηρομαγνητικό υλικό και ανάλογα με την επιλεγθείσα τοπολογία μονίμων μαγνητών, αυτοί είτε διανέμονται περιμετρικά στην επιφάνειά του, είτε εμπεριέχονται στο εσωτερικό του. Οι μόνιμοι μαγνήτες αντικαθιστούν τους ηλεκτρομαγνήτες και χρησιμοποιούνται στους ηλεκτρικούς κινητήρες για να παράγουν το πεδίο διέγερσης. Χαρακτηρίζονται ως σκληρά μαγνητικά υλικά γιατί παρουσιάζουν μεγάλο βρόχο υστέρησης, η σημασία του οποίου θα εξηγηθεί στο παρόν Κεφάλαιο.

Αρχικά γίνεται μία λεπτομερής περιγραφή του τρόπου τροφοδοσίας του κινητήρα που επιλέγεται να μελετηθεί με ηλεκτρικό ρεύμα. Ο επιλεγέντας κινητήρας είναι ο κινητήρας μονίμων μαγνητών εσωτερικού δρομέα. Ακολούθως γίνεται μία εκτενής περιγραφή των τρόπων με τους οποίους τα τυλίγματα μπορούν να διανεμηθούν στις αύλακες του στάτη. Παρουσιάζονται όλες οι διαφορετικές κατηγορίες τυλιγμάτων και εν συνεχεία βάσει λεπτομερούς σύγκρισης γίνεται η επιλογή ανάμεσα σε δύο εξ αυτών για την εφαρμογή τους στον προς μελέτη κινητήρα.

Εν συνεχεία ακολουθεί η καταγραφή των βασικών ηλεκτρομαγνητικών σχέσεων από τις οποίες περιγράφεται η λειτουργία του κινητήρα, καθώς και του μέσου σχεδίασης, μελέτης και καταγραφής των δεδομένων. Η μέθοδος, περί της οποίας ο λόγος, είναι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, η οποία και εξηγείται αναλυτικά.

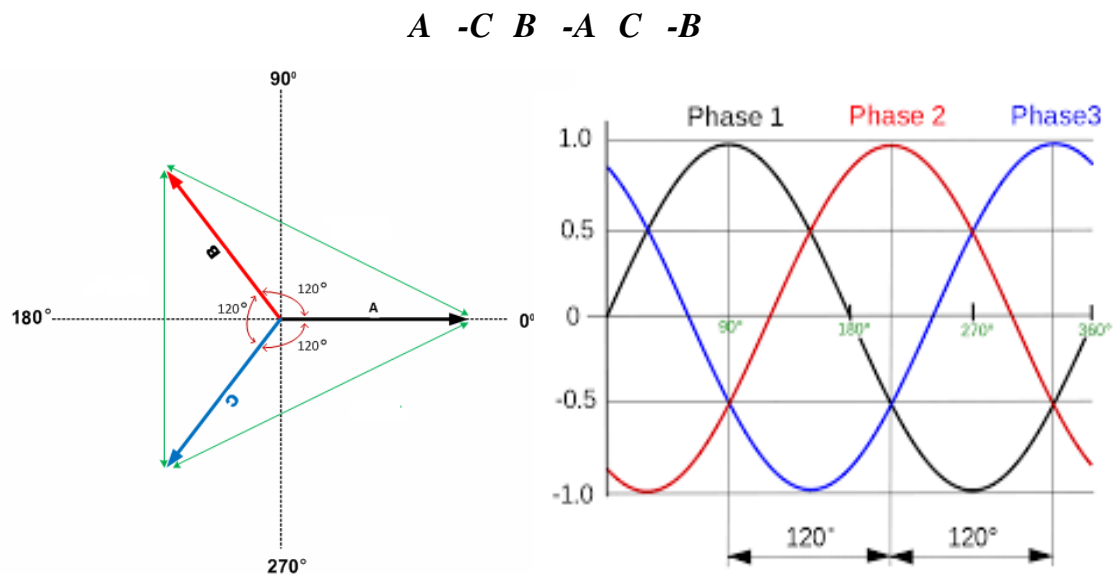
Καταληκτικά με βάση την ηλεκτρομαγνητική ανάλυση που έχει προηγηθεί, γίνεται λεπτομερής περιγραφή όλων των χαρακτηριστικών μεγεθών του ηλεκτρικού κινητήρα, τα οποία προσδιορίζουν την συμπεριφορά του στα σημεία ενδιαφέροντος. Όπως έχει προαναφερθεί τα κυριότερα εκ των στοιχείων αυτών είναι η επίδοση και η απόδοση, τα οποία εν αλυσίδα είναι η ροπή, οι ταλαντώσεις ροπής και εμμέσως οι απώλειες του κινητήρα και η αρμονική παραμόρφωση.

2.2 Θεωρητική ανάλυση μεγεθών

2.2.1 Τυλίγματα στάτη

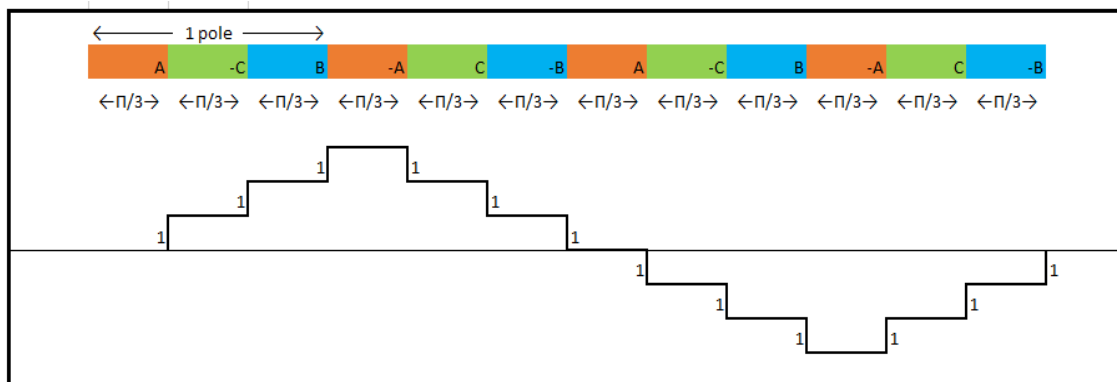
2.2.1.1 Αλληλουχία φάσεων

Υπάρχουν αρκετές διαφορετικές τοπολογίες τυλιγμάτων στον στάτη, από την επιλογή των οποίων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η συμπεριφορά του κινητήρα. Μείζονος σημασίας είναι η αλληλουχία των φάσεων στις άλακες του κινητήρα, με πρωταρχικό στόχο να αποτελεί η ημιτονικότητα του πεδίου. Για να επιτευχθεί αυτό η διαδοχή των ρευμάτων τριφασικού τυλίγματος είναι η εξής:



Σχήμα 2.1. Ποιοτική συμπεριφορά ρευμάτων των τριών φάσεων

Η διαδοχή αυτή δεν επιλέχθηκε τυχαία. Αν δούμε, στο Σχήμα 2.1, την ποιοτική συμπεριφορά των ρευμάτων (και κατ' επέκταση του πεδίου) στον χρόνο, θα παρατηρήσουμε πως στηριζόμενοι στην διαφορά «φάσης» που έχουν μεταξύ τους (υπό γωνία ίση με $\pi/3$), το γράφημα που προκύπτει δίνει μία προσέγγιση ημιτόνου ως εξής:



Σχήμα 2.2.. Ημιτονική αναπαράσταση πεδίου

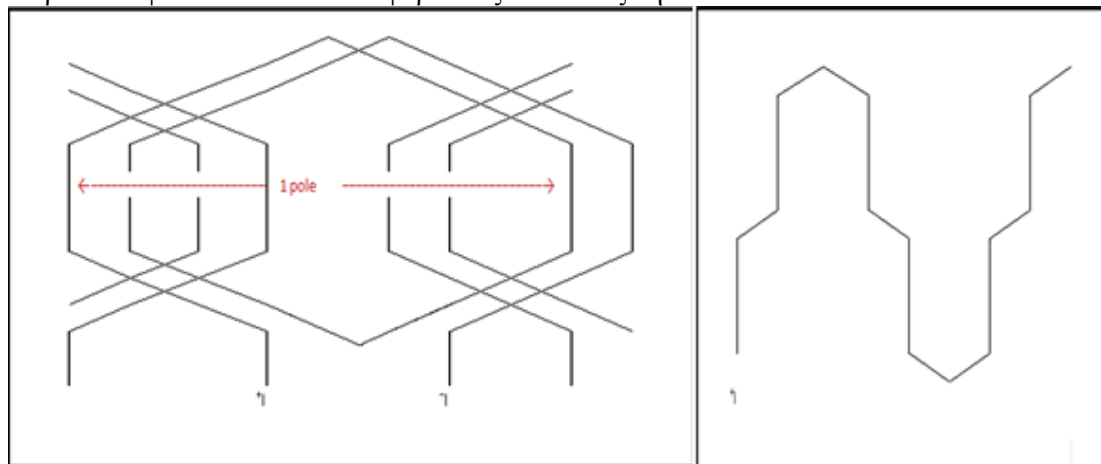
Στη συνέχεια θα δούμε πώς μπορούμε να βελτιώσουμε αυτή την ημιτονικότητα του πεδίου.

2.2.1.2 Τερματικές συνδέσεις πηνίων

Τα τυλίγματα του στάτη, μπορούν να διαχωριστούν ως προς τις τερματικές συνδέσεις των επιμέρους πηνίων στις δύο εξής κατηγορίες:

- Βροχοειδές τύλιγμα (για μικρό αριθμό πόλων $P=2,4$)
- Κυματοειδές τύλιγμα (για μεγάλο αριθμό πόλων)

Παρακάτω φαίνονται οι δύο διαφορετικές συνδέσεις πηνίων.



Σχήμα 2.3. Βροχοειδές τύλιγμα.

Κυματοειδές τύλιγμα

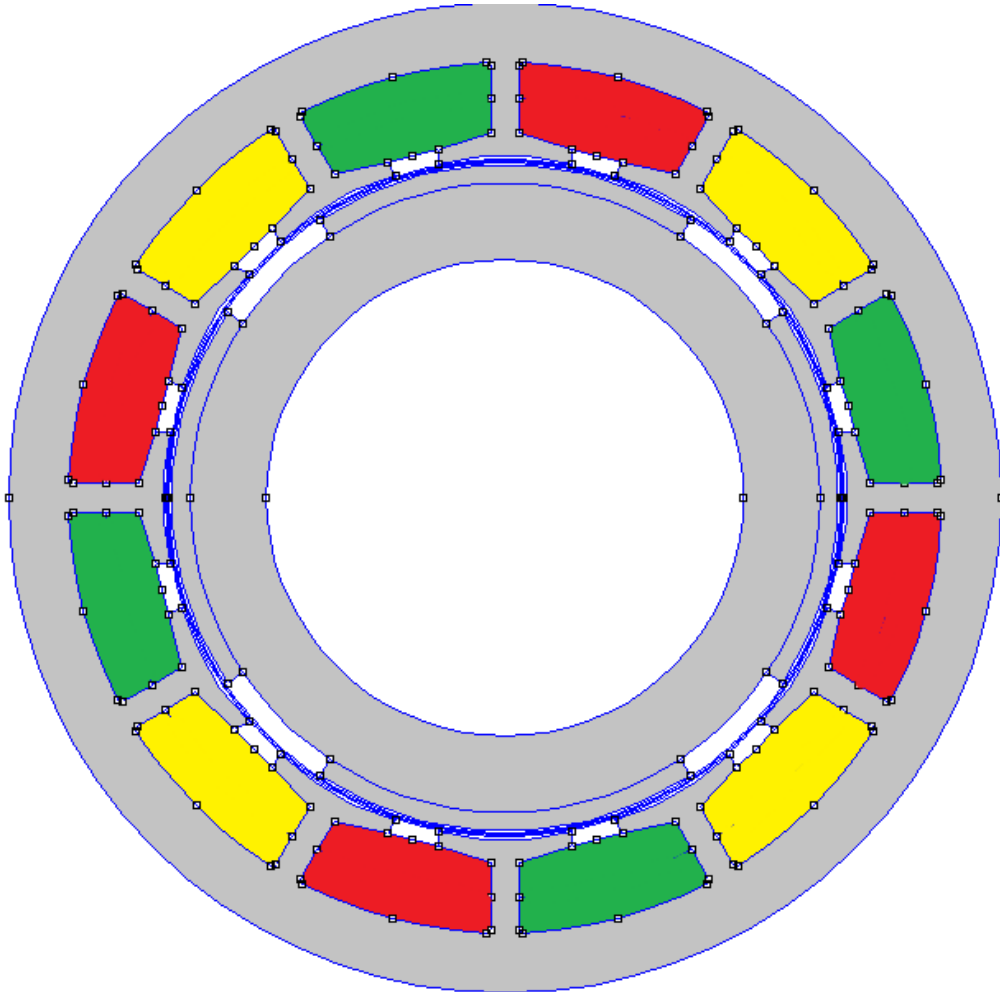
2.2.1.3 Διανομή φάσεων στις αύλακες

Τα τυλίγματα του στάτη, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τον τρόπο που αυτά διανέμονται στις αύλακες. Έτσι προκύπτουν οι εξής κατηγορίες:

- Απλό μη Διανεμημένο Τύλιγμα
- Κατανεμημένο Τύλιγμα Πλήρους Βήματος
- Κατανεμημένο Τύλιγμα Κλασματικού Βήματος
- Συγκεντρωμένο Τύλιγμα Χωρίς Επικάλυψη των Φάσεων

2.2.1.3.1 Απλό μη Διανεμημένο Τύλιγμα

Το απλό μη διανεμημένο τύλιγμα στάτη αποτελεί την απλούστερη διάταξη πηνίων στα αυλάκια του στάτη, και έχει χρησιμοποιηθεί κατά κόρον ως τώρα. Καλείται συχνά ως «κλασικό συγκεντρωμένο τύλιγμα πλήρους βήματος». Πρόκειται για την εναπόθεση όλων των σπειρών ενός τυλίγματος σε ένα αυλάκι ανά πόλο. Η διάταξη αυτή παρέχει σχετικά μεγάλο συντελεστή πληρότητας χαλκού στις αύλακες, καθώς τα τυλίγματα τερματικών συνδέσεων είναι μη επικαλυπτόμενα, ωστόσο εμφανίζει ιδιαίτερα αυξημένη παρουσία αρμονικών και ιδιαίτερα υψηλότερης τάξης, γεγονός που το καθιστά ακατάλληλο για «σύγχρονα» κινητήρια συστήματα.



Σχήμα 2.4. Απλό μη διανεμημένο τύλιγμα, σε έναν τετραπολικό κινητήρα δώδεκα αυλάκων.

2.2.1.3.2 Κατανεμημένο Τύλιγμα Πλήρους Βήματος

Το κατανεμημένο τύλιγμα πλήρους βήματος αποτελεί μία βελτίωση του προηγούμενου τύπου. Στη διάταξη αυτή οι σπείρες μίας φάσης ανά πόλο διανέμονται σε περισσότερες από μία διαδοχικές αυλάκες στο στάτη. Η διανομή αυτή έχει θετική επίδραση στην ημιτονικότητα του πεδίου, ενώ μειώνει την ύπαρξη αρμονικών σε σχέση με το «Απλό μη διανεμημένο τύλιγμα». Ο αριθμός ομάδων πηνίων (αριθμός q), περιγράφει τον προαναφερθέντα αριθμό διαδοχικών αυλάκων ανά πόλο και φάση, και υπολογίζεται από τον αριθμό των αυλάκων Q , των πόλων P και των φάσεων m του κινητήρα ως εξής:

$$q = \frac{Q}{m \cdot P}$$

2. 1

Η συγκεκριμένη τοπολογία τυλιγμάτων στάτη, επιφέρει στην ΜαγνητοΕγερτική Δύναμη (ΜΕΔ), μία μείωση. Η μείωση αυτή εμφανίζεται σαν συντελεστής στην σχέση που περιγράφει την E_{rms} , ως εξής:

$$E_{rms} = 4.44 \cdot k_w \cdot f \cdot N \cdot i \cdot \Phi$$

2. 2

Όπου k_w ο συντελεστής τυλιγματος, f η συχνότητα περιστροφής του πεδίου, N ο συνολικός αριθμός ελιγμάτων ανά φάση και Φ η μαγνητική ροή ανά πόλο.

38

Ο ανωτέρω συντελεστής τυλίγματος είναι ίσος με :

$$kw = kb \cdot kp$$

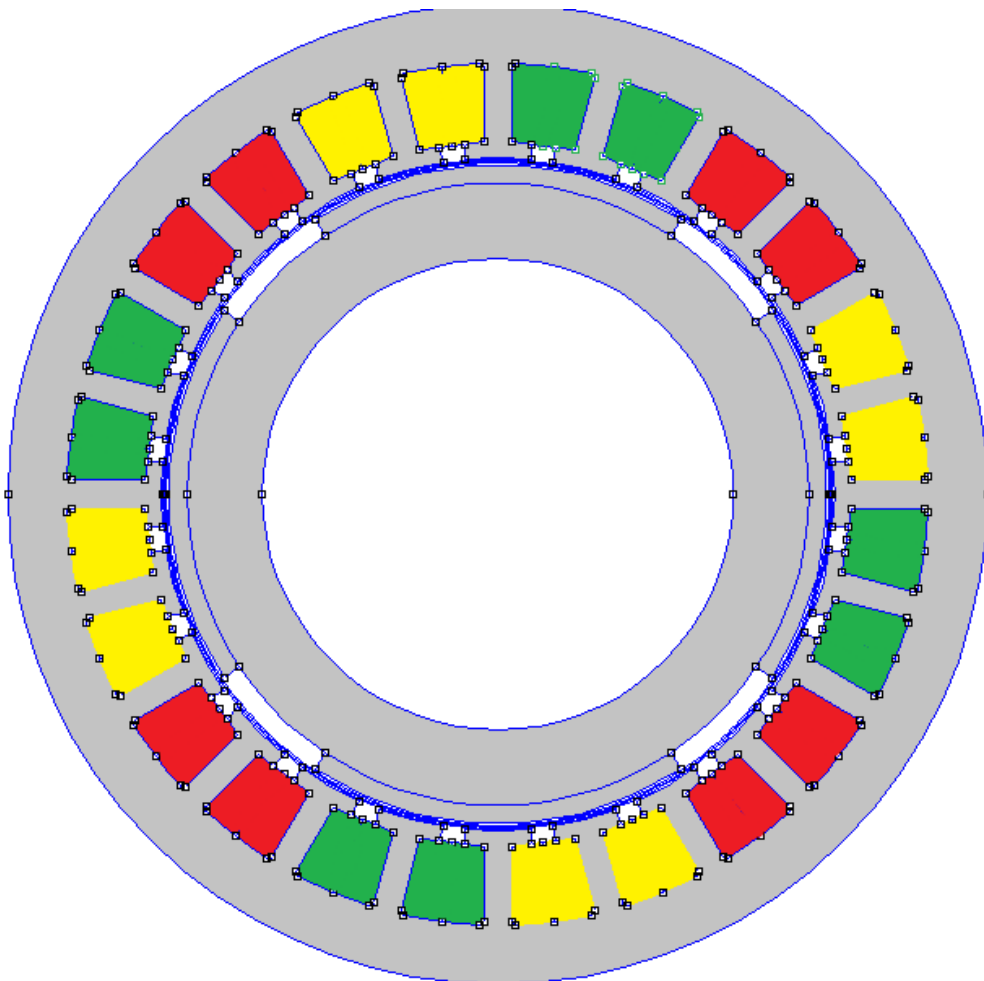
2.3

Όπου το k_b συντελεστής πλάτους, η σταθερά k_p ονομάζεται συντελεστής βήματος, εδώ είναι ίση με 1, και θα εξηγηθεί στην επόμενη κατηγορία τυλιγμάτων. Ο συντελεστής πλάτους υπολογίζεται ως εξής :

$$kb = \frac{\sin\left(\frac{q\gamma}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)}$$

2.4

Όπου q οι ομάδες πηνίων και γ το βήμα αύλακος σε ηλεκτρικές μοίρες ($\gamma = 360/Q$).



Σχήμα 2.5. Κατανομημένο τύλιγμα πλήρους βήματος, τετραπολικού κινητήρα είκοσι τεσσάρων αυλάκων.

2.2.1.3.3 Κατανεμημένο Τύλιγμα Κλασματικού Βήματος

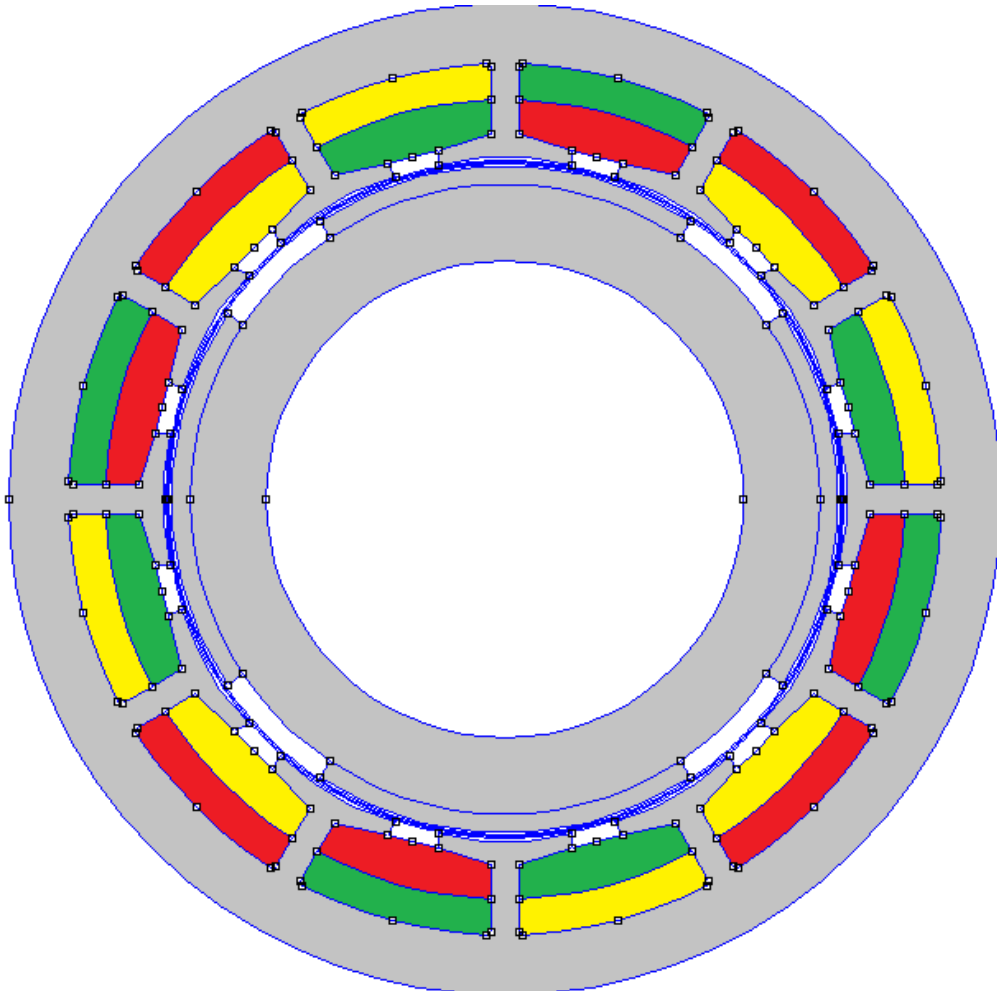
Το κατανεμημένο τύλιγμα κλασματικού βήματος, αποτελεί μία υποκατηγορία του κατανεμημένου τυλίγματος που περιγράψαμε παραπάνω, και πρόκειται για μία ακόμη τεχνική για μείωση του αρμονικού περιεχομένου του κινητήρα, μέσω της βελτίωσης της ημιτονικότητας του πεδίου. Στην τοπολογία αυτή, τα τυλίγματα διαφορετικών φάσεων συνυπάρχουν στην ίδια αύλακα, δημιουργώντας έτσι δύο «στρώσεις» μέσα σε αυτήν. Οι δύο αυτές στρώσεις διατηρούν την αλληλουχία με την οποία τα πηνία κατανέμονται στις αύλακες, με τη διαφορά ότι η δεύτερη στρώση είναι μετατοπισμένη ως προς την πρώτη κατά ένα βήμα, το οποίο ορίζεται ως το λεγόμενο «κλασματικό βήμα».

Η τοπολογία αυτή των τυλιγμάτων, όπως και η προηγούμενη, έχουν μία σχετική αρνητική επίδραση στην μαγνητεγερτική δύναμη, η οποία εμφανίζεται σαν ένας συντελεστής k_p στην σχέση που την περιγράφει. Εν προκειμένω ο συντελεστής αυτός εμπεριέχει τον ως άνω συντελεστή πλάτους k_b , αλλά και τον συντελεστή βήματος (διάφορο αυτή τη φορά του 1), ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$k_p = \cos\left(\frac{\pi - \mathcal{P}}{2}\right)$$

2. 5

Όπου \mathcal{P} η γωνία του κλασματικού βήματος σε ηλεκτρικές μοίρες ($\mathcal{P} = KB * 180$).



Σχήμα 2.6. Κατανεμημένο τύλιγμα κλασματικού βήματος, τετραπολικού κινητήρα δώδεκα αυλάκων.

2.2.1.3.4 Συγκεντρωμένο Τύλιγμα Χωρίς Επικάλυψη των Φάσεων

Το συγκεντρωμένο τύλιγμα χωρίς επικάλυψη των φάσεων αποτελεί μία εντελώς ξεχωριστή κατηγορία τυλίγματος. Η διαφορά από τα προαναφερθέντα έγκειται στο γεγονός ότι το τύλιγμα της κάθε φάσης δεν επικαλύπτεται με το αντίστοιχο των υπόλοιπων φάσεων. Αυτό συμβαίνει διότι οι σπείρες του πηνίου μίας φάσης περιελίσσονται γύρω από το εκάστοτε δόντι στη διπλή στρώση, ή γύρω από εναλλασσόμενα δόντια στη μονή στρώση, και όχι μεταξύ δύο αυλάκων, ενώ ταυτόχρονα η διανομή των φάσεων στις αύλακες είναι διαφορετική από αυτή των κατανεμημένων τυλιγμάτων που αναφέρθηκαν ως τώρα. Η τοπολογία αυτή, μπορεί να διακριθεί σε δύο υποκατηγορίες, ανάλογα με τον διαχωρισμό η μη των αυλάκων σε δύο μέρη, δίνοντας έτσι τις κατηγορίες αυλάκων διπλής στρώσης (double-layer) και μονής στρώσης (single-layer) αντίστοιχα.










Μείζονος σημασίας είναι να αναφερθεί ότι το συγκεντρωμένο τύλιγμα απαιτεί την τήρηση ορισμένων περιορισμών σχεδίασης, και συγκεκριμένα περιορισμούς ως προς την επιλογή του συνδυασμού πόλων και αυλάκων. Αυτό συμβαίνει διότι αφενός δεν λειτουργούν όλοι οι συνδυασμοί πόλων/αυλάκων, αφετέρου διότι ο συντελεστής τυλίγματος εξαρτάται άμεσα από την επιλογή του συνδυασμού αυτού, και συνεπώς επηρεάζει την επίδοση και απόδοση της μηχανής.

Πίνακας 2.1. Πίνακας αποδεκτών συνδυασμών μεταξύ πόλων αυλάκων, για συγκεντρωμένο τύλιγμα μονής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των φάσεων ([9]).

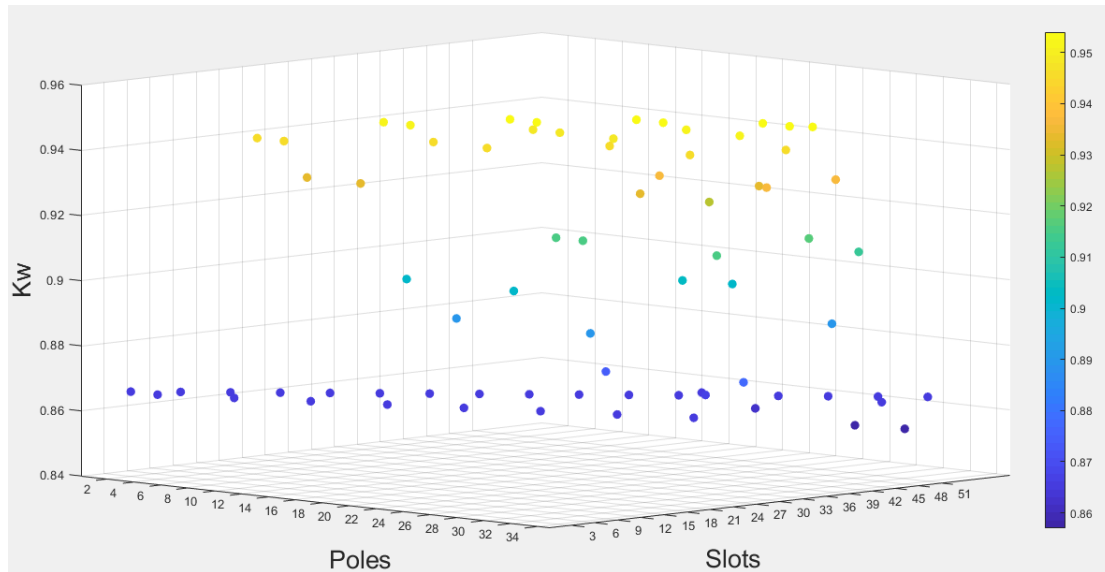
Q_s/p	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
6	0,866	0,866	0,866	0,5										
12	0,5	0,866	0,966	0,966	0,966	0,866			0,5					
18		0,5			0,866	0,902	0,945		0,945	0,902				0,5
24			0,5			0,866			0,966	0,958		0,958	0,966	
30				0,5					0,866	0,874		0,936	0,951	

Πίνακας 2.2. Πίνακας αποδεκτών συνδυασμών μεταξύ πόλων αυλάκων, για συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των φάσεων, και οι αντίστοιχοι συντελεστές τυλίγματος ([9]).

Q_s/p	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
6	0,866	0,866	0,5	0,866	0,5	0,866	0,866	0,866	0,5	0,866	0,5	0,866	0,866	0,866	0,5	0,866	0,5	0,866	0,866
9	0,617	0,866	0,945	0,945	0,866	0,617	0,328	0,328	0,617	0,866	0,945	0,945	0,866	0,617	0,328	0,328	0,617	0,328	0,617
12	$q = 1$	0,866	0,933	0,933	0,866	0,933	0,866	0,866	0,621	0,866	0,621			0,866	0,933	0,933	0,866	0,933	0,866
15		0,621	0,866	0,951	0,951	0,951	0,951	0,866	0,621	0,866	0,621				0,866	0,933	0,933	0,866	0,933
18		$q = 1$	0,647	0,866	0,902	0,945	0,945	0,945	0,902	0,866	0,647								0,866
21				0,866	0,89	0,89	0,89	0,953	0,953	0,866	0,89	0,866							0,866
24			$q = 1$		0,76	0,866		0,933	0,95	0,945	0,95	0,933		0,866	0,76				0,866
27							0,866	0,877	0,915	0,915	0,954	0,954	0,945	0,915	0,877	0,866			0,866
30				$q = 1$				0,866	0,874		0,936	0,951	0,951	0,936	0,936	0,874	0,866		0,866
33								0,866	0,903	0,928	0,903	0,928	0,954	0,954	0,928	0,903	0,928	0,903	0,903
36				$q = 1$					0,866	0,867	0,902	0,933	0,945	0,953	0,953	0,953	0,945	0,945	0,945
39									0,866	0,863	0,918	0,936	0,918	0,936	0,918	0,936	0,954	0,954	0,954
42					$q = 1$					0,866		0,89	0,913	0,89	0,913	0,945	0,953	0,945	0,953
45						$q = 1$					0,866	0,859	0,886	0,859	0,886	0,927	0,945	0,945	0,945
48							$q = 1$					0,866	0,857	0,866	0,857	0,905	0,933	0,933	0,933
51								$q = 1$					0,866	0,88	0,901	0,88	0,901	0,901	0,901
54									$q = 1$					0,866	0,854	0,877	0,854	0,877	0,877
57										$q = 1$					0,866	0,852	0,866	0,852	0,852
60											$q = 1$						0,866	0,866	0,866

	$q = 1/2, 1/4$		$q = 3/8, 3/10$		$Q_s = 21 + 6k, p = Q_s \pm 1, k = 0, 1, 2, \dots$
	$q = 3/7, 3/11$		$q = 5/14, 5/16$		$Q_s = 24 + 6k, p = Q_s \pm 2, k = 0, 1, 2, \dots$
	$q = 2/5, 2/7$		ακατάλληλο		$k_{w1} < 0,866$

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η κατανομή των τιμών του συντελεστή τυλίγματος για τους διαφορετικούς συνδυασμούς πόλων/αυλάκων για συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των φάσεων, που παρουσιάζονται στον ανωτέρω πίνακα.



Σχήμα 2.7. Κατανομή των τιμών του συντελεστή τυλίγματος για όλους τους άνωθι συνδυασμούς πόλων/αυλάκων για συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσεως

Από το συνδυασμό πόλων/αυλάκων, εξαρτάται άμεσα και η διανομή των φάσεων στις αύλακες. Η διαδικασία διανομής βασίζεται σε μία αναλυτική μέθοδο, η οποία ονομάζεται μέθοδος του Gros. Έτσι η διανομή γίνεται ως εξής:

1^ο βήμα

Ο αριθμός q , που εκφράζει τις ομάδες πηνίων ανά πόλο και φάση, γράφεται σαν κλάσμα ανάγωγο (τέτοιο, ώστε να μην υπάρχει κοινός διαιρέτης του αριθμητή και του παρονομαστή, και συνεπώς να μην επιδέχεται απλοποίηση). Έστω :

$$q = \frac{Q}{mP} = \frac{n}{k}$$

2. 6

2^ο βήμα

Θεωρούμε μια δυαδική ακολουθία αριθμών, η οποία εμπεριέχει « n » αριθμό δυαδικών μονάδων (σταθερών 1), και « $k-n$ » αριθμό δυαδικών μηδενικών (σταθερών 0). Η ακολουθία αυτή διατάσσεται με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε οι « n » μονάδες και τα « $k-n$ » μηδενικά, να είναι διατεταγμένα, όσο το δυνατόν περισσότερο «κανονικά».

Πχ.1.

Επιλέγοντας από την πίνακα με τους επιτρεπούς συνδυασμούς πόλων/αυλάκων για τύλιγμα διπλής στρώσεως, έστω ότι:

$$Q = 18, P = 14$$

Τότε θεωρώντας τριφασικό κινητήρα:

$$q = \frac{Q}{mP} = \frac{18}{3 \cdot 14} = \frac{3}{7}$$

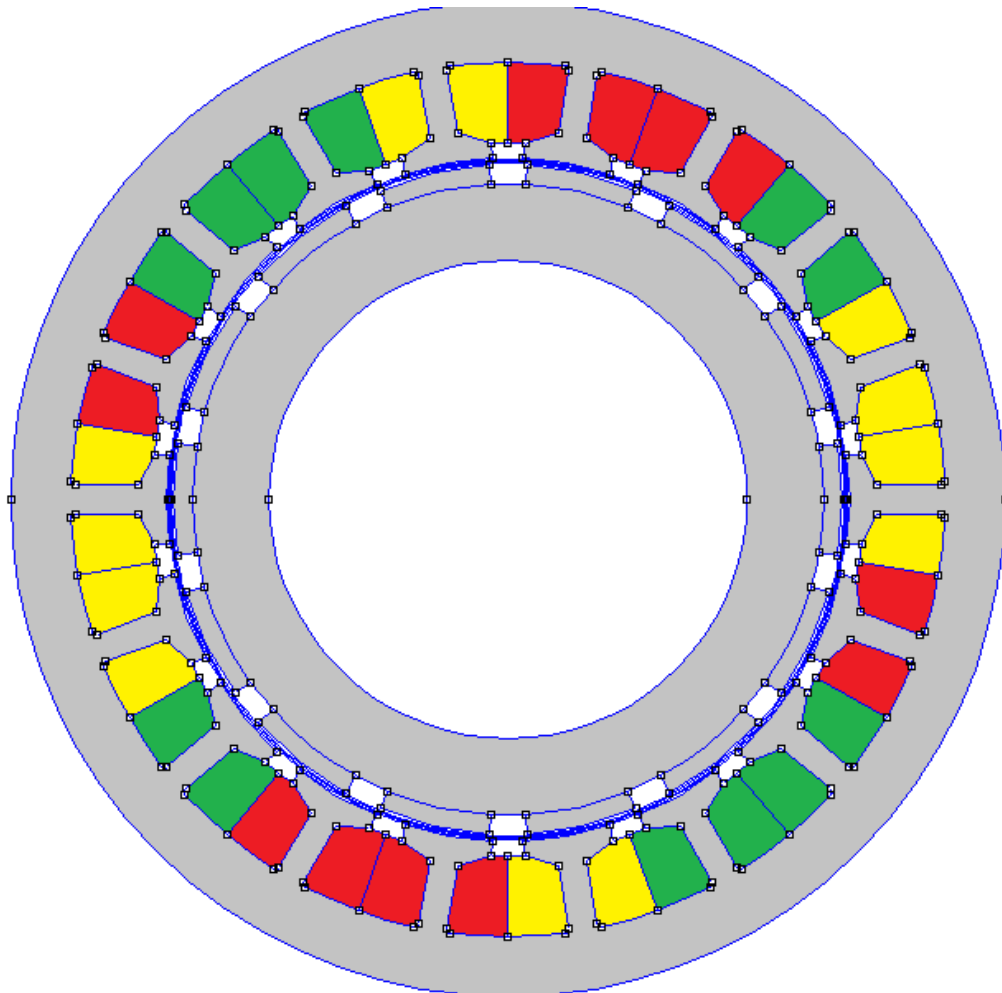
Η ακολουθία αυτή παρουσιάζει την διανομή των φάσεων της πρώτης στρώσεως. Επιλέχθηκε τύλιγμα διπλής στρώσεως, ώστε να μπορεί να φανεί και ο χειρισμός αυτής της κατηγορίας. Διαφορετικά, επιλέγοντας έναν αριθμό ομάδων πηνίων q από τον αντίστοιχο πίνακα των τυλιγμάτων μονής στρώσεως, η διαδικασία θα σταματούσε εδώ. Εν προκειμένω η ακολουθία που περιγράφει την διανομή των φάσεων στην δεύτερη στρώση του τυλιγματος, θα προκύψει με βάση την αρχική θεώρηση, ότι οι σπείρες του πηνίου μίας φάσης περιελίσσονται γύρω από το εκάστοτε δόντι. Έτσι για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός, δημιουργούμε μία δεύτερη ακολουθία, βασισμένη στην πρώτη, τέτοια ώστε κάθε στοιχείο της δεύτερης να αποτελεί το αντίστοιχο στοιχείο της πρώτης, με αντίθετο πρόσημο. Συγκεκριμένα στο παράδειγμα :

1η στρώση

A B C -C -A -B B C A -A -B -C C A B -B -C -A

2η στρώση

-A -B -C C A B -B -C -A A B C -C -A -B B C A



Σχήμα 2.8. Συγκεντρωμένο τύλιγμα κλασματικού βήματος, κινητήρα δεκατεσσάρων πόλων και δεκαοχτώ αυλάκων.

2.2.1.3.5 Σύγκριση των προαναφερθέντων τοπολογιών τυλίγματος στάτη

Από τις παραπάνω αναφερθείσες κατηγορίες τυλιγμάτων, δεν είναι δυνατόν να περιληφθούν και να μελετηθούν όλες σε μία μόνο διπλωματική εργασία. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκαν οι τοπολογίες εκείνες που δίνουν καλύτερα αποτελέσματα σε επίδοση και απόδοση του κινητήρα, και παρουσιάζουν μεγαλύτερο επιστημονικό ενδιαφέρον. Οι δύο κατηγορίες που επιλέχθηκαν είναι το «Κατανεμημένο Τύλιγμα Κλασματικού Βήματος» και το «Συγκεντρωμένο Τύλιγμα Διπλής Στρώσεως Χωρίς Επικάλυψη των Φάσεων».

Η χρήση κατανεμημένων τυλιγμάτων δίνει μεγαλύτερη τιμή της θεμελιώδους της Ηλεκτρ.Εγερτικής Δύναμης (ΗΕΔ) του κινητήρα χάρη στον υψηλότερο συντελεστή τυλίγματος. Ιδιαίτερα σε εφαρμογές μηχανών εσωτερικών μονίμων μαγνητών, το κατανεμημένο τύλιγμα παράγει υψηλότερη μέση ροπή και χαμηλότερη ροπή ευθυγράμμισης. Ταυτόχρονα, εξαιρώντας το μειονέκτημα της πιο σύνθετης περιέλιξης και μικρότερου συντελεστή πληρότητας αύλακος, το κατανεμημένο τύλιγμα προσφέρει εν γένει υψηλότερο συντελεστή τυλίγματος, οδηγώντας σε μικρότερη απομείωση της θεμελιώδους συνιστώσας του πεδίου, ενώ πολύ σημαντικό είναι το γεγονός ότι το αρμονικό περιεχόμενο είναι μικρότερο. Επιπλέον, μέσω κατάλληλης σχεδίασης είναι δυνατόν να περιοριστούν στο ελάχιστο τόσο η κυμάτωση ροπής όσο και οι απώλειες χαλκού, ειδικά από τη στιγμή που δεν απαιτείται υψηλή πυκνότητα ρεύματος στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Εν γένει η χρήση συγκεντρωμένων τυλιγμάτων προσφέρει υψηλότερο συντελεστή πληρότητας χαλκού άρα και υψηλότερη πυκνότητα ισχύος. Παράλληλα, προκύπτουν κοντύτερα άκρα τυλιγμάτων και κατ' επέκταση χαμηλότερες απώλειες χαλκού. Παρόλα αυτά, η αναπτυσσόμενη ροπή περιλαμβάνει στις περισσότερες περιπτώσεις ανώτερες αρμονικές, εν αντιθέσει με τα κατανεμημένα τυλίγματα όπου κυριαρχεί η θεμελιώδης αρμονική, χάρη στην περισσότερο ημιτονοειδή κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο. Επιπλέον, οι συνολικές απώλειες είναι υψηλές σε μεγάλες ταχύτητες εξαιτίας των πρόσθετων απωλειών δινορρευμάτων στο δρομέα και στους μόνιμους μαγνήτες λόγω των ανώτερων αρμονικών του μαγνητικού πεδίου. Στα τυλίγματα διπλής στρώσης οι απώλειες πυρήνα λόγω δινορρευμάτων είναι χαμηλότερες, εξαιτίας του μικρότερου αρμονικού περιεχομένου της ΜΕΔ που προκαλεί η αντίδραση τυμπάνου. Επιπλέον, η ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι περισσότερο ημιτονοειδής. Παρόλα αυτά, η ικανότητα παραγωγής ροπής σε κατάσταση υπερφόρτισης είναι μικρότερη απ' ότι στα αντίστοιχα μονής στρώσης. Το συγκεντρωμένο τύλιγμα χωρίς επικάλυψη των φάσεων, ενέχει σημαντικά πλεονεκτήματα, εκ των οποίων το πιο ουσιώδες είναι ότι μπορεί να τοποθετηθεί πολύ πιο εύκολα γύρω από κάθε δόντι, αφού τα πηνία κάθε φάσης δεν επικαλύπτονται, το οποίο απλοποιεί έτσι την κατασκευή του, ενώ απαιτεί λιγότερο χώρο σε κάθε αύλακα πετυχαίνοντας υψηλότερο συντελεστή πληρότητας. Ωστόσο, καθώς η θεμελιώδης συχνότητα του πεδίου καθορίζεται από τον αριθμό των πόλων της μηχανής, υπάρχει περίπτωση να εμφανίζονται υπό-αρμονικές (sub-harmonics) για τον δρομέα λόγω του τυλίγματος, οι οποίες καθώς έχουν μεγάλο μήκος κύματος, παρουσιάζουν υψηλή διείσδυση στο σώμα του. Το γεγονός αυτό, ιδιαίτερα για υψηλές ταχύτητες μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες απώλειες πυρήνα στο δρομέα.

2.3 Μέθοδος μελέτης προβλήματος

Η θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού, είναι η βάση πάνω στην οποία στηρίζεται όλη η μελέτη των ηλεκτρικών κινητήρων, καθώς εξαιτίας της παρουσίας ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων αναπτύσσονται όλες οι δυνάμεις και ροπές που καθιστούν δυνατή την λειτουργία των. Μέσω των ηλεκτρομαγνητικών σχέσεων καθίσταται δυνατόν να περιγραφεί ο ρόλος του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου ως συνδετικού μέσου μεταξύ του ηλεκτρικού και του μηχανικού μέρους των ηλεκτρικών κινητήρων και επιτρέπει να προσδιοριστούν οι σχέσεις που συνδέουν τις δυνάμεις και τις ροπές με τη μεταβολή που προκαλεί στο ενεργειακό ισοζύγιο των προαναφερθέντων η μετατόπιση της θέσης του κινούμενου μέρους (δρομέα).

2.3.1 Ηλεκτρομαγνητικές εξισώσεις Maxwell

Θεωρώντας πως το πρόβλημα που επιλύουμε ανήκει στην κατηγορία των μαγνητοστατικών προβλημάτων, παραθέτουμε βασικές ηλεκτρομαγνητικές εξισώσεις οι οποίες το περιγράφουν. Σημαντικό κρίνεται να αναφερθεί πως μαγνητοστατικά ονομάζονται τα προβλήματα στα οποία το μαγνητικό πεδίο είναι αμετάβλητο ως προς το χρόνο.

Νόμος Faraday

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad 2.8$$

Νόμος του Ampere

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad 2.9$$

Νόμος του Gauss για τον μαγνητισμό

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad 2.10$$

Νόμος του Gauss για τον ηλεκτρισμό

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad 2.11$$

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

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \approx 0 \quad 2.12$$

και συνεπώς:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad 2.13$$

Εισάγεται ο όρος της μαγνητικής διαπερατότητας «μ», η οποία συνδέει τα διανυσματικά μεγέθη \mathbf{B}, \mathbf{H} ως εξής:

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \quad 2.14$$

ενώ για την περίπτωση των μόνιμων μαγνητών η παραπάνω εξίσωση, περιέχει το μέγεθος της μαγνήτισης του μόνιμου μαγνήτη \mathbf{M} :

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mathbf{H} + \mathbf{M} \quad 2.15$$

Στην περίπτωση μη γραμμικών υλικών, η μαγνητική διαπερατότητα μπορεί να εκφραστεί σαν συνάρτηση της πυκνότητας μαγνητικής ροής \mathbf{B} , ως εξής:

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

Από την εξίσωση 2.13 παρατηρούμε ότι γενικά $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \neq \mathbf{0}$. Έτσι, η ένταση του μαγνητοστατικού πεδίου δεν μπορεί να εκφραστεί σε όλα τα σημεία του χώρου σαν κλίση μιας βαθμωτής συνάρτησης Φ_m (σε αντίθεση με τα ηλεκτροστατικά πεδία), παρά μόνο στα σημεία όπου $\mathbf{J} = \mathbf{0}$. Αντίθετα όμως ο νόμος του Gauss για τον μαγνητισμό, ικανοποιείται με την αντικατάσταση της σχέσης :

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad 2.17$$

όπου το \mathbf{A} είναι μια διανυσματική συνάρτηση των συντεταγμένων η οποία ονομάζεται διανυσματικό δυναμικό.

Εφαρμόζοντας τη σχέση αυτή στον νόμο του Gauss για τον μαγνητισμό, που διατυπώθηκε παραπάνω, και λαμβάνοντας υπόψιν την τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας « μ », ισχύει ότι:

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

Η παραπάνω σχέση, θεωρώντας ομογενή υλικά και με τη χρήση γνωστής διανυσματικής ταυτότητας, παίρνει την μορφή :

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

Το διανυσματικό δυναμικό \mathbf{A} υπολογίζεται με την λύση της παραπάνω εξίσωσης. Για τον υπολογισμό αυτό χρειάζεται και ο καθορισμός της απόκλισης του, σύμφωνα με το θεώρημα Helmholtz. Επειδή είμαστε ελεύθεροι να καθορίσουμε την απόκλιση αυτή, χρησιμοποιούμε σαν κριτήριο την μεγαλύτερη δυνατή απλοποίηση. Είναι προφανές πως η επιλογή μας πρέπει να είναι η :

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0 \quad 2.20$$

Η παραπάνω εξίσωση ονομάζεται συνθήκη Coulomb, και χρησιμοποιείται για τη λύση μαγνητοστατικών προβλημάτων. Προφανώς η επιλογή του $\nabla \cdot \mathbf{A}$ δεν επηρεάζει την τιμή του $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$, και συνεπώς καταλήγουμε στην παρακάτω απλουστευμένη μορφή :

$$\frac{1}{\mu} \cdot \nabla^2 \times \mathbf{A} = \mathbf{J} \quad 2.21$$

η οποία ονομάζεται διανυσματική εξίσωση Poisson.

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

$$\mathbf{A} = A_z \cdot \mathbf{i}_z \quad 2.22$$

Και για την πυκνότητα ρεύματος \mathbf{J} :

$$\mathbf{J} = J_z \cdot \mathbf{i}_z \quad 2.23$$

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής, λόγω της ύπαρξης εξωτερικού γινομένου στην σχέση ορισμού του διανυσματικού δυναμικού, εν προκειμένω ορίζεται στις δύο διαστάσεις ως εξής:

$$\mathbf{B} = B_x \cdot \mathbf{i}_x + B_y \cdot \mathbf{i}_y \quad 2.24$$

2.3.2 Οριακές συνθήκες

Οι εξισώσεις Maxwell, στην διαφορική τους μορφή όπως διατυπώθηκαν παραπάνω, μπορούν να εφαρμοστούν για σημεία στο εσωτερικό συνεχών μέσων. Ωστόσο οι εξισώσεις αυτές δεν ισχύουν σε σημεία διαχωριστικών επιφανειών μεταξύ διαφορετικών μέσων. Αυτό μπορεί να γίνει ευκόλως κατανοητό, καθώς σε τέτοια σημεία, τα πεδιακά μεγέθη ($\mathbf{E}, \mathbf{D}, \mathbf{H}, \mathbf{B}, \mathbf{J}$) είναι εν γένει ασυνεχείς (συνεπώς και μη παραγωγίσιμες) συναρτήσεις της θέσεως, και επομένως οι διαφορικοί τελεστές που περιλαμβάνονται στις υπό διαφορική μορφή εξισώσεις Maxwell δεν ορίζονται. Σε σημεία τέτοιων συνοριακών επιφανειών, οι εξισώσεις Maxwell ισοδυναμούν με ένα σύνολο οριακών συνθηκών, οι οποίες δείχνουν πως μεταβάλλονται τα μεγέθη $\mathbf{E}, \mathbf{D}, \mathbf{H}, \mathbf{B}, \mathbf{J}$ κατά τη μετάβαση από την μία όψη της συνοριακής επιφάνειας στην άλλη.

Ταυτόχρονα από το θεώρημα μοναδικότητας των λύσεων προβλημάτων οριακών συνθηκών του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, είναι γνωστό πως σε ομογενή γραμμικά και ιστροπικά μέσα, μια λύση των εξισώσεων Maxwell, που ικανοποιεί δεδομένες οριακές και αρχικές συνθήκες, είναι μοναδική.

Οι οριακές συνθήκες κατηγοριοποιούνται ως εξής :

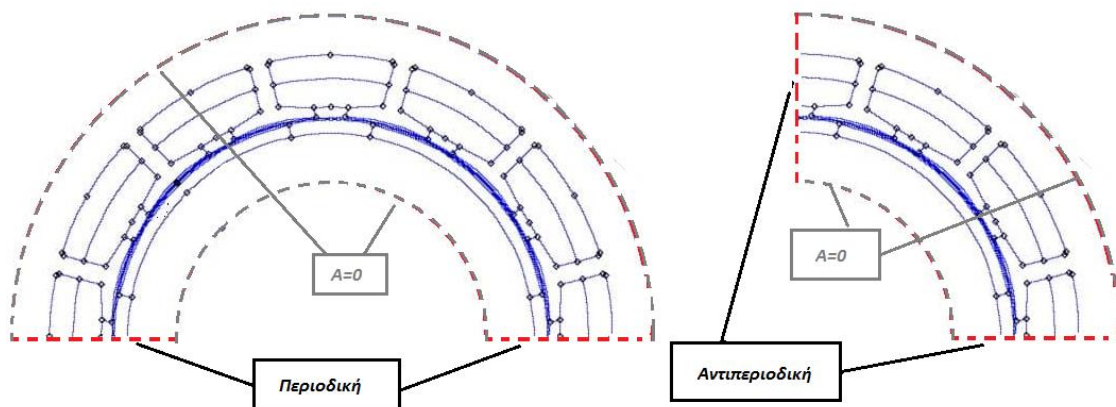
- **Dirichlet** : Η λύση της εξίσωσης Poisson που περιέχει το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό A , στο εσωτερικό ενός όγκου V , είναι μοναδική αν σε κάθε σημείο της επιφάνειας S που τον περιβάλλει δίνεται η τιμή του A . Έτσι η τιμή του δυναμικού A πρέπει να δηλώνεται και πάνω σε κάθε όριο, ανάμεσα σε δύο διαφορετικούς υποχώρους. Ομογενής οριακή συνθήκη Dirichlet, καλείται όταν πάνω στο όριο ισχύει $A=0$, ενώ σε διαφορετική περίπτωση καλείται μη ομογενής οριακή συνθήκη Dirichlet. Όπως είναι λογικό η ομογενής οριακή συνθήκη Dirichlet συναντάται κατά κόρον στην σχεδίαση ηλεκτρικών κινητήρων, καθώς πρόκειται για την μοντελοποίηση του ορίου που περιγράφει πως η μαγνητική ροή περιορίζεται εντός των ορίων της μηχανής, ενώ οι γραμμές της μαγνητικής ροής θα είναι παράλληλες προς το σύνορο αυτό. Έτσι γίνεται κατανοητό πως η συνθήκη αυτή εφαρμόζεται στην διαχωριστική επιφάνεια προς τον εξωτερικό περιβάλλοντα χώρο του στάτη και την αντίστοιχη επιφάνεια προς το εσωτερικό περιβάλλοντα χώρο του δρομέα (εφόσον πρόκειται για κινητήρα εσωτερικού δρομέα). Στην περίπτωση που η μελέτη του κινητήρα γίνεται εξ ολοκλήρου και όχι τμηματικά, η συνθήκη αυτή είναι απολύτως επαρκής για την μελέτη του τελευταίου.

• **Neumann:** Η λύση της εξίσωσης Poisson που περιέχει το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό A , στο εσωτερικό ενός όγκου V , είναι «σχεδόν μοναδική» αν σε κάθε σημείο της επιφάνειας S που τον περιβάλλει δίνεται η τιμή της κάθετης παραγώγου $\partial A/\partial n$, όπου « n » το κάθετο διάνυσμα στην διαχωριστική, μεταξύ δύο υποχώρων επιφάνεια (με τη χρήση του όρου «σχεδόν μοναδική» εννοούμε ότι δύο λύσεις αυτού του προβλήματος διαφέρουν κατά μία σταθερή ποσότητα μόνο). Έτσι η τιμή της παραγώγου του δυναμικού $\partial A/\partial n$ πρέπει να δηλώνεται και πάνω σε κάθε όριο, ανάμεσα σε δύο διαφορετικούς υποχώρους. Όπως και στη συνθήκη Dirichlet, εάν $\partial A/\partial n=0$ τότε πρόκειται για την ομογενή συνθήκη Neumann, διαφορετικά πρόκειται για την μη ομογενή. Όπως γίνεται αντιληπτό, βάσει του ορισμού της εν λόγω συνθήκης, οι γραμμές της μαγνητικής ροής θα πρέπει να τέμνουν κάθετα την διαχωριστική επιφάνεια. Συνηθέστερη είναι η χρήση της ομογενούς συνθήκης Neumann, η οποία γίνεται σε περιπτώσεις διεπιφάνειας με υλικό πολύ μεγάλης μαγνητικής διαπερατότητας.

• **Robin:** Η λύση της εξίσωσης Poisson που περιέχει το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό A , στο εσωτερικό ενός όγκου V , είναι μοναδική αν σε κάθε σημείο της επιφάνειας S που τον περιβάλλει δίνεται η τιμή της συνάρτησης $f = \partial A/\partial n + h \cdot A$, όπου h δοσμένη συνάρτηση με $h \geq 0$, τέτοια ώστε να μην μηδενίζεται παντού. Έτσι η τιμή της συνάρτησης f , πρέπει να δηλώνεται και πάνω σε κάθε όριο, ανάμεσα σε δύο διαφορετικούς υποχώρους. Όπως εύκολα φαίνεται, η οριακή συνθήκη Robin είναι ένας συνδυασμός των προαναφερθέντων συνθηκών Dirichlet και Neumann, και γι' αυτό ανήκει στην κατηγορία των μικτών συνθηκών. Η οριακή συνθήκη αυτή χρησιμοποιείται κατά κόρον σε προβλήματα διάδοσης θερμότητας, ως οριακή συνθήκη σε μονωτικές επιφάνειες.

• **Περιοδική:** Οι περιοδικές οριακές συνθήκες αφορούν την ισότητα δύο ορίων. Για δύο διαφορετικά όρια, τα οποία χωρίζουν περισσότερους από δύο υποχώρους μέσω δύο διαχωριστικών επιφανειών, οι συνθήκες που οφείλει να πληροί η συνάρτηση που τα περιγράφει είναι ακριβώς ίδιες. Οι οριακές αυτές συνθήκες ονομάζονται έτσι για προφανείς λόγους, και χρησιμοποιούνται στην περίπτωση που είναι επιθυμητή η μελέτη ενός μόνο μέρους του ηλεκτρικού κινητήρα. Αυτή η συνοριακή συνθήκη χρησιμοποιείται στα άκρα του προβλήματος, όταν επιλύεται ένα ζεύγος πόλων της μηχανής.

• **Αντιπεριοδική:** Οι αντιπεριοδικές οριακές συνθήκες αφορούν ομοίως σχέση μεταξύ δύο ορίων. Για δύο διαφορετικά όρια, τα οποία χωρίζουν περισσότερους από δύο υποχώρους μέσω δύο διαχωριστικών επιφανειών, το μέτρο της συνάρτησης που τα περιγράφει έχει ίδιο μέτρο και για τα δύο όρια, αλλά αντίθετα πρόσημα. Αυτή η συνοριακή συνθήκη χρησιμοποιείται στα άκρα του προβλήματος, όταν επιλύεται ένας πόλος της μηχανής.



Σχήμα 2.9. Παράδειγμα περιοδικών και αντιπεριοδικών οριακών συνθηκών.

2.3.3 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Ενώ οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το μαγνητικό πρόβλημα που μελετάται, όπως αυτές καταγράφηκαν παραπάνω, φαίνονται σχετικά εύκολες στην επίλυσή τους, είναι πολύ δύσκολο να βρεθούν αναλυτικές λύσεις σε σύνθετες γεωμετρίες. Αυτό συμβαίνει διότι η αναλυτική λύση των εν λόγω εξισώσεων είναι δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, όπου οι καταπονήσεις και τα γεωμετρικά σχήματα είναι πάρα πολύ απλά. Έτσι κρίθηκε αναγκαίο να βρεθούν μέθοδοι για την προσεγγιστική λύση τέτοιου είδους προβλημάτων. Μία τέτοια μέθοδος είναι η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων. Η μέθοδος αυτή, είναι μεν προσεγγιστική, αλλά μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε είδος σχήματος. Το μειονέκτημά της είναι οι αυξημένες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα μοντέλα. Ο τρόπος λειτουργίας της βασίζεται στην διάσπαση του αρχικού σύνθετου προβλήματος σε απλούστερα στοιχειώδη υπο-προβλήματα. Με τον τρόπο αυτό, αυξάνεται μεν ο αριθμός των προς επίλυση προβλημάτων, αλλά η πολυπλοκότητα επίλυσης των προβλημάτων αυτών είναι σημαντικά μικρότερη. Τα υπο-προβλήματα επιλύονται και στη συνέχεια συντίθενται με σκοπό την εύρεση της συνολικής λύσης του προβλήματος.

Έτσι εν προκειμένω, η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων επιτυγχάνει την μετατροπή των διαφορικών εξισώσεων με μερικές παραγώγους σε αλγεβρικές, διακριτοποιώντας το συνεχές πρόβλημα σε ένα μεγάλο αριθμό περιοχών απλής γεωμετρίας. Κατά τη διαδικασία αυτή αντικαθίσταται η αρχική εξίσωση του πεδίου με το πρόβλημα στασιμότητας μιας συναρτησιακής που έχει διαστάσεις ενέργειας. Αν η αρχική γεωμετρία χωριστεί σε αρκετά μεγάλο αριθμό τέτοιων υπό-περιοχών, το υπολογιζόμενο μέγεθος μπορεί να προσεγγισθεί με την επιθυμητή ακρίβεια. Στη παρούσα εργασία, το πρόβλημα είναι μαγνητικής φύσεως και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται αντίστοιχο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων (FEMM). Το FEMM δημιουργεί ένα πλέγμα στο χώρο του προβλήματος, χωρίζοντάς τον σε στοιχειώδεις τριγωνικές περιοχές στις οποίες γίνεται η επίλυση των ηλεκτρομαγνητικών διαφορικών εξισώσεων. Με τον τρόπο αυτό το συνεχές φυσικό πρόβλημα μετατρέπεται σε διακριτό, στο οποίο οι άγνωστοι απαρτίζονται από τις τιμές του πεδίου στις κορυφές των διαδοχικών τριγώνων. Το πρόβλημα που προκύπτει μέσω της προαναφερθείσας διαδικασίας, είναι ένα αλγεβρικό σύστημα εξισώσεων όπου οι τιμές του πεδίου στο εσωτερικό των τριγώνων μπορούν να υπολογισθούν χρησιμοποιώντας τις τιμές των κορυφών τους. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται μέσω γραμμικής παρεμβολής των γνωστών τιμών του πεδίου. Τέτοια συστήματα είναι αρκετά εύκολο να λυθούν, καθώς υπάρχουν αποδοτικοί αλγόριθμοι που χρειάζονται πολύ λίγο χρόνο.

2.3.3.1 Διαδικασία ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία

Η διαδικασία επίλυσης ενός μαγνητικού προβλήματος με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων μπορεί συνοπτικά να παρουσιαστεί σε τέσσερα απλά βήματα:

1. **Σχεδίαση** της γεωμετρίας, ορισμός των υλικών και των οριακών συνθηκών, όπως αυτές περιγράφηκαν παραπάνω.
2. **Πλεγματοποίηση** του προβλήματος με επιθυμητό αριθμό τριγωνικών στοιχείων, θεώρηση θεμάτων πεπερασμένης ακρίβειας ή άλλων υπολογιστικών περιορισμών.
3. **Επίλυση** του προβλήματος γραμμικής άλγεβρας και εύρεση του διανυσματικού δυναμικού.
4. **Απεικόνιση** και επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

2.3.3.1.1 Σχεδίαση

Κατά τη διαδικασία της σχεδίασης της γεωμετρίας του εκάστοτε κινητήρα αρχικά πραγματοποιείται η παραμετροποίηση της. Επιλέγεται ένα πλήθος ανεξάρτητων μεταβλητών σχεδίασης, ορισμένες εκ των οποίων είναι το πλάτος διατομής ρότορα-στάτορα, το ενεργό μήκος κ.α. και ακολούθως πραγματοποιείται η έκφραση όλων των υπόλοιπων μεταβλητών σχεδίασης ως εξαρτημένες από τις πρώτες. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής υλοποιήθηκαν δύο παραμετρικά μοντέλα σχεδίασης ηλεκτρικών κινητήρων που αφορούν σε διαφορετικές τοπολογίες πηνίων στάτη. Οι κινητήρες που μοντελοποιήθηκαν είναι οι εξής:

- Κινητήρας μόνιμων μαγνητών εσωτερικού δρομέα με κατανεμημένα τυλίγματα διπλής στρώσεως κλασματικού βήματος.
- Κινητήρας μόνιμων μαγνητών εσωτερικού δρομέα με συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των φάσεων.

Η επιλογή μελέτης των δύο αυτών διαμορφώσεων τυλίγματος και ο αριθμός των στρώσεων γίνεται με κριτήριο τη βέλτιστη λειτουργία του εκάστοτε κινητήρα, βάσει της εκτενούς ανάλυσης που γίνεται στην παράγραφο 2.2.1.3, σχετικά με τις διαμορφώσεις αυτές. Στα μοντέλα δίνεται επίσης η δυνατότητα επιλογής τύπου μαγνήτη ανάμεσα σε επιφανειακού, εσωτερικού, ευθύγραμμου και τύπου «V» μαγνήτη. Ταυτόχρονα δίνεται η δυνατότητα επιλογής διαφορετικών τύπων δοντιού με βάση το σχήμα του. Ενδεικτικά παρατίθενται οι τύποι τραπέζοειδούς, στρογγυλής ή τριγωνικής βάσης δοντιού, αλλά και στρογγυλής αύλακος ή τραπέζοειδούς «σώματος» δοντιού. Σε κάθε περίπτωση το σχεδιαστικό μοντέλο είναι κατά τέτοιο τρόπο παραμετροποιημένο, ώστε μεταβλητές όπως το πάχος και το ύψος του δοντιού, το πάχος μαγνήτη, το γωνιακό εύρος δοντιού και μαγνήτη κ.α., να μπορούν να επιλεγούν από τον ίδιο τον σχεδιαστή, γεγονός που δίνει δυνατότητα σχεδίασης οποιασδήποτε γεωμετρίας κινητήρα κατανεμημένου ή συγκεντρωμένου χωρίς επικάλυψη των φάσεων τυλίγματος διπλής στρώσεως, ομοιόμορφης κατανομής δοντιών.

2.3.3.1.2 Πλεγματοποίηση

Η πλεγματοποίηση είναι, όπως προαναφέρθηκε, η διαδικασία στην οποία στηρίζεται όλη η ανάλυση και μελέτη του εκάστοτε κινητήρα, και γι' αυτό άλλωστε προηγείται χρονικά αυτών. Η πλεγματοποίηση, αν και γίνεται αυτόματα από το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων (FEMM), χρίζει ιδιαίτερης προσοχής καθώς η ακρίβεια των αποτελεσμάτων βασίζεται στην επιτυχημένη διεξαγωγή της. Όπως ήδη αναφέρθηκε στις άνωθι παραγράφους, η πλεγματοποίηση αφορά στην «κατάτμηση» της αρχικής γεωμετρίας σε μικρότερες και απλούστερες, εν προκειμένω τριγωνικές, γεωμετρίες με σκοπό την μελέτη των ηλεκτρομαγνητικών διαφορικών εξισώσεων σε αυτές. Αυτό αυτομάτως δημιουργεί ένα μεγάλο πλήθος απλούστερων προβλημάτων, το οποίο προσφέρει αναλογικά μεγάλη ακρίβεια ανάλυσης, αλλά και αυξημένο υπολογιστικό κόστος, καθώς ο αριθμός των υπολογισμών είναι άμεσα συνδεδεμένος με τον αριθμό των δημιουργηθέντων κόμβων και στοιχείων. Συνεπώς, καθώς στη βελτιστοποίηση ο κύριος όγκος του υπολογιστικού χρόνου δαπανάται στην επίλυση και επεξεργασία των πεπερασμένων στοιχείων, μείζονος σημασίας κρίνεται η επιλογή μίας χρυσής τομής ανάμεσα στην ακρίβεια και την ταχύτητα επεξεργασίας. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ανάγκης για πύκνωση του προαναφερθέντος πλέγματος, είναι τα σημεία στα οποία γίνεται ο υπολογισμός της ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Πιο συγκεκριμένα, η ροπή προκύπτει από το γινόμενο της ακτινικής και εφαπτομενικής συνιστώσας της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο. Οι προαναφερθείσες συνιστώσες προκύπτουν από την παραγωγή του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού A . Συνεπώς για τον ακριβή υπολογισμό της ροπής, απαιτείται πυκνότερο πλέγμα στο διάκενο ώστε να υπολογιστούν με ακρίβεια οι συνιστώσες τις μαγνητικής επαγωγής. Έχει αποδειχθεί πως αν στο διάκενο υπάρχουν 5 στρώσεις στοιχείων

τότε η ροπή προσεγγίζεται με πολύ μεγάλη ακρίβεια, ενώ περαιτέρω πύκνωση θα αυξήσει αρκετά το υπολογιστικό κόστος με δυσανάλογη αύξηση της ακρίβειας. Κατά κανόνα 3-4 στρώσεις στοιχείων δίνουν πολύ καλή ακρίβεια στις περισσότερες εφαρμογές σχεδίασης. Επίσης πυκνότερο πλέγμα χρησιμοποιείται στα δόντια του στάτη όπου αναμένονται υψηλές τιμές της μαγνητικής επαγωγής, ενώ αντίθετα στον άξονα του δρομέα η πυκνότητα του πλέγματος μπορεί να μειωθεί.

2.3.3.1.3 Επίλυση και Απεικόνιση

Καταληκτικά, μετά τον καθορισμό της γεωμετρίας και στη συνέχεια του πλέγματος, ακολουθούν η επίλυση του προβλήματος, η λήψη και απεικόνιση των αποτελεσμάτων για την εκτίμηση των μεγεθών ενδιαφέροντος. Τα μεγέθη αυτά, όπως έχει προαναφερθεί, είναι η απόδοση και επίδοση του κινητήρα. Τα κυριότερα βήματα της διαδικασίας αναλύονται παρακάτω.

2.4 Υπολογισμός μεγεθών κινητήρα

2.4.1 Υπολογισμός μέσης ροπής και ταλαντώσεων ροπής

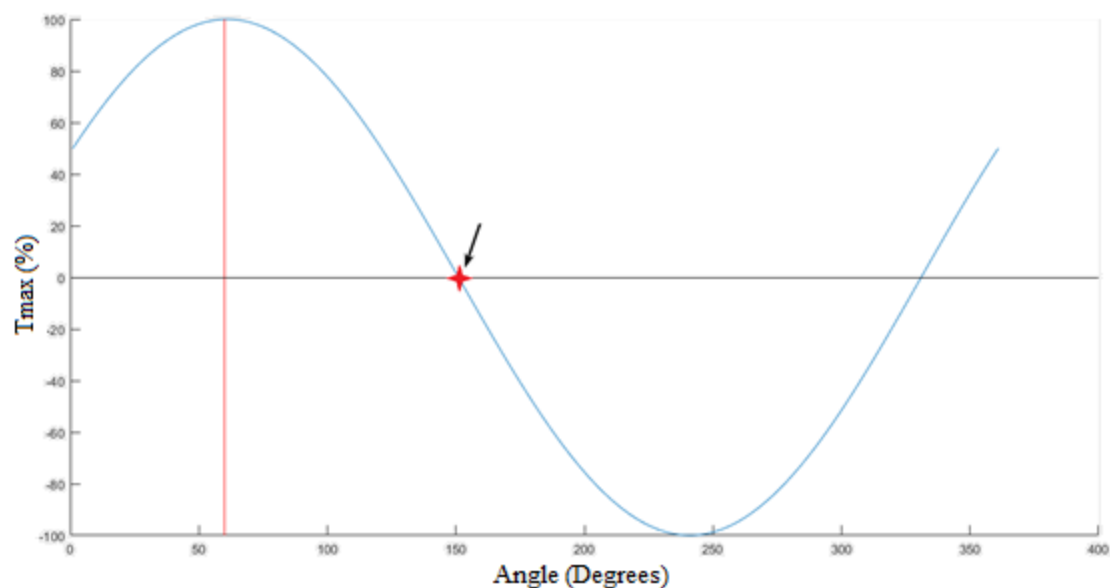
Για την εύρεση της τελικής κυματομορφής της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί ο υπολογισμός της βέλτιστης (ή επιθυμητής) γωνίας ροπής. Πρόκειται για τον συνδυασμό των γωνιών ρευμάτων και θέσης ρότορα, για τις οποίες η ηλεκτρομαγνητική ροπή λαμβάνει την μέγιστη τιμή της. Λόγω της μαγνητοστατικής φύσης του προβλήματος αυτός ο υπολογισμός ανάγεται ουσιαστικά στην εύρεση της επιθυμητής γωνίας εκκίνησης. Ο προσδιορισμός της ως άνω «φάσης» γίνεται θεωρώντας εκ των προτέρων ένα στιγμιότυπο εκκίνησης για το τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα, συνήθως αυτό κατά το οποίο έχουμε μέγιστο ρεύμα στη φάση Α, και επομένως στις φάσεις Β και C θα έχουμε \pm το μισό του μέγιστου ρεύματος. Στην συνέχεια το τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα τίθεται σε κανονική λειτουργία με αποτέλεσμα οι τρεις φάσεις να μεταβάλλονται ημιτονοειδώς συναρτήσει του χρόνου. Η διαδικασία αυτή γίνεται για λειτουργία ακινητοποιημένου δρομέα με αποτέλεσμα η κυματομορφή ηλεκτρομαγνητικής ροπής που συνάγεται να είναι ομοίως ημιτονική. Από την κυματομορφή αυτή αναζητούμε τη γωνία στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη τιμή της ροπής. Η εξαγόμενη γωνία είναι η επιθυμητή γωνία εκκίνησης των ρευμάτων. Διαφορετικός τρόπος προσέγγισης της επιθυμητής γωνίας, αποτελεί η θεώρηση σταθερών ρευμάτων, στην αρχική τους «φάση», και ταυτόχρονη περιστροφή του ρότορα για ένα πολικό βήμα. Η κυματομορφή που θα προκύψει είναι και πάλι ημιτονική, και η θέση του ρότορα για την οποία αυτή γίνεται μέγιστη, θεωρείται η αρχική γωνία ή ισοδύναμα η θέση με γωνία ροπής 90° .

Για λόγους ακριβείας στους υπολογισμούς, το πρόβλημα ανάγεται στην εύρεση του σημείου μηδενισμού της ροπής. Έτσι δεδομένης της εύρεσης των δυο διαδοχικών σημείων μεταξύ των οποίων το πρόσημο της συνάρτησης της ροπής αλλάζει, χρησιμοποιείται η μέθοδος της γραμμικής παρεμβολής, η οποία επιστρέφει με αρκετή ακρίβεια την γωνία στην οποία η ροπή μηδενίζεται. Η γραμμική παρεμβολή ορίζεται ως εξής:

$$\theta, \text{μηδενισμού} = \frac{\theta_2 \cdot T(\theta_1) - \theta_1 \cdot T(\theta_2)}{T(\theta_1) - T(\theta_2)}$$

2. 25

Παρακάτω φαίνεται σχηματικά ο προσδιορισμός αυτός.



Σχήμα 2.10. Παραμετρική εύρεση της γωνίας εκκίνησης των ρευμάτων, η του ρότορα αντίστοιχα.

Ουσιώδες κρίνεται να αναφερθεί πως για τον προσδιορισμό της εν λόγω «φάσης», δεν είναι απαραίτητη η περιστροφή των ρευμάτων κατά 360°. Όπως φαίνεται στο γράφημα, οι 180 ηλεκτρικές μοίρες, οι οποίες ισοδυναμούν με ένα πολικό βήμα για τον ρότορα, είναι επαρκείς για την εύρεση της επιθυμητής μεταβλητής.

Αυτή η διαδικασία προκύπτει ως αναγκαιότητα καθώς για κινητήρες με διαφορετικές γεωμετρίες δεν είναι εύκολος ο θεωρητικός προσδιορισμός του σημείου συμμετρίας των φάσεων A,B,C και του σημείου μέγιστης ΜΕΔ διακένου.

Ακολούθως ο κινητήρας τίθεται σε κανονική λειτουργία, με ρεύματα και ρότορα να στρέφονται ταυτόχρονα, απ' όπου συνάγεται και η τελική κυματομορφή της ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Αυτό γίνεται μέσω της επίλυσης μιας σειράς μαγνητοστατικών προβλημάτων, για κάθε βήμα περιστροφής, μέσω του ταυστή του Maxwell. Κατά την περιστροφή αυτή μεταξύ βήματος ηλεκτρικών και μηχανικών μοιρών ισχύει η εξής σχέση:

$$\Delta\theta_e = \Delta\theta_m \cdot \frac{P}{2}$$

2. 26

Εν συνεχεία, με βάση την εξαγόμενη κυματομορφή της ροπής, υπολογίζεται η μέση ροπή (T_{mean}) για μια ηλεκτρική περίοδο καθώς και οι ταλαντώσεις ή διακύμανση της τιμής της ($T_{fluctuation}$). Η κυμάτωση προκύπτει από το ποσοστό της μέγιστης μείον της ελάχιστης ροπής διά την μέση ροπή ως εξής:

$$T_{fluctuation} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{mean}}$$

2. 27

Προφανώς, όσο μειώνεται το βήμα της γωνίας, τόσο αυξάνεται η ακρίβεια αλλά και το υπολογιστικό κόστος της διαδικασίας, και συνεπώς τίθεται εκ νέου μια ανάγκη συμβιβασμού.

Μία εύλογη τιμή βήματος, όπως αυτή θεωρήθηκε από το συγγραφέα είναι οι 10 ηλεκτρικές μοίρες.

Στην τελευταία διαδικασία αξίζει να αναφερθεί πώς αναγκαία κρίνεται περιστροφή του ρότορα κατά δύο πολικά βήματα, δηλαδή κατά 360 ηλεκτρικές μοίρες.

2.4.2 Υπολογισμός επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης

Ένα από τα πιο βασικά ηλεκτρομαγνητικά μεγέθη του κινητήρα αποτελεί η επαγόμενη αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται από τον κινητήρα (αντί-ΗΕΔ). Για να εξηγήσουμε την πρακτική σημασία του μεγέθους αυτού, θα πρέπει πρώτα να ορίσουμε το μέγεθος της ηλεκτρεγερτικής δύναμης. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) είναι το πηλίκο του έργου ανά μονάδα ηλεκτρικού φορτίου κατά μήκος μιας κλειστής ηλεκτρικής διαδρομής, το οποίο χρειάζεται να αποδοθεί στη μονάδα του φορτίου ώστε αυτό να διατρέξει έναν πλήρη κύκλο στη διαδρομή αυτή. Η ΗΕΔ μετράται σε μονάδες λόγου ενέργειας προς φορτίο, δηλαδή σε βολτ, στο διεθνές σύστημα μονάδων. Πρακτικά είναι η τάση που αποδίδει μία ηλεκτρική μηχανή κατά την λειτουργία γεννήτριας. Κατά την λειτουργία κινητήρα εμφανίζεται το δυαδικό ανάλογο αυτού του μεγέθους, η επαγόμενη αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη. Όπως γίνεται κατανοητό, το μέγεθος αυτό κατέχει θέση μείζονος σημασίας για τη λειτουργία του κινητήρα. Η ποιότητα της κυματομορφής της επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης (αρμονική παραμόρφωση) διαδραματίζει σημαντικό ρόλο, όχι μόνο στην ποιότητα εξόδου του ίδιου του κινητήρα, αλλά και στην ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος του δικτύου με το οποίο αυτός αλληλοεπιδρά. Όσον αφορά στον προσδιορισμό της αντί-ΗΕΔ, αυτός γίνεται ως εξής:

Όταν ένας αγωγίμος βρόχος διαρρέεται από μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή, τότε επάγεται μια τάση σε αυτόν. Από τον νόμο του Faraday η αναπτυσσόμενη αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη δίνεται από τη σχέση:

$$e = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad 2.28$$

όπου N ο αριθμός των σπειρών και Φ η μαγνητική ροή. Όπως φαίνεται λοιπόν από την παραπάνω σχέση, το αποτέλεσμα, δηλαδή η αναπτυσσόμενη αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη, τείνει να μειώσει το αίτιο που την προκάλεσε, δηλαδή τη μεταβολή της μαγνητικής ροής, εξ' ου και το αρνητικό πρόσημο σε αυτήν. Ωστόσο, δεν υπάρχει μία συνεχής αναλυτική συνάρτηση που να περιγράφει την μαγνητική ροή συναρτήσει του χρόνου. Αντιθέτως προκύπτει ως αποτέλεσμα μίας σειράς μετρήσεων, γεγονός που απαιτεί την χρήση του ορισμού της παραγώγου για τον υπολογισμό της μεταβολής της, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$e(t) = N \cdot \frac{\Phi(t_2) - \Phi(t_1)}{t_2 - t_1} \quad 2.29$$

όπου t_2 και t_1 δύο διαδοχικές χρονικές στιγμές. Δεδομένου του τρόπου με τον οποίο γίνεται η καταγραφή των μεγεθών στα διαδοχικά στιγμιότυπα, δηλαδή συναρτήσει της γωνίας περιστροφής ρευμάτων-ρότορα, η παραπάνω σχέση παίρνει την μορφή:

$$e(\theta) = -N \cdot \frac{\Phi(\theta_2) - \Phi(\theta_1)}{\theta_2 - \theta_1} \cdot \omega_r \quad 2.30$$

όπου θ_2 και θ_1 διαδοχικές γωνίες μέτρησης, και ω_r η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής.

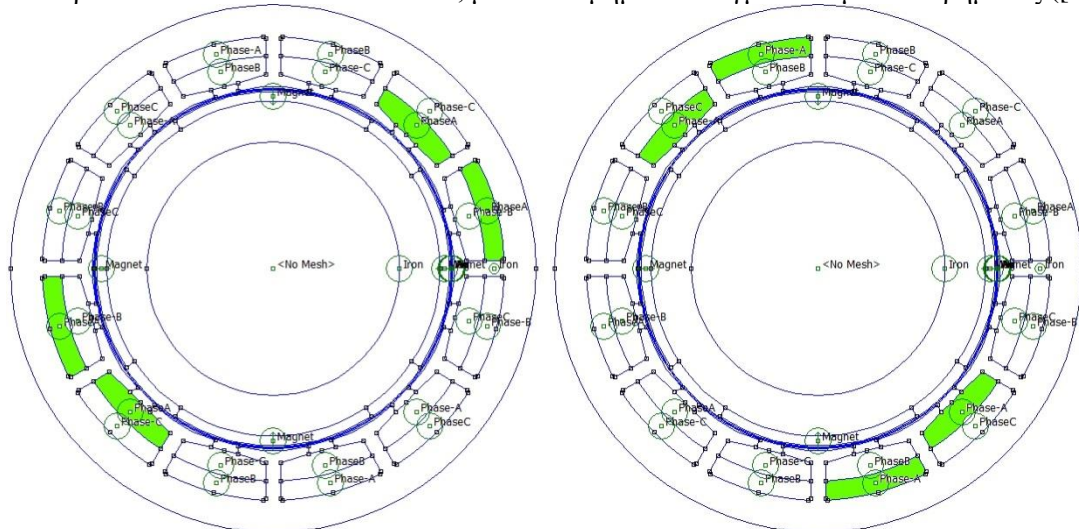
Συνεπώς για τον υπολογισμό της αντί-ΗΕΔ απαραίτητη κρίνεται πρώτα η εκτίμηση του μεγέθους της μαγνητικής ροής. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται μέσω του διανυσματικού δυναμικού στις αύλακες της μηχανής. Για κάθε μία εκ των τριών φάσεων η μαγνητική ροή που επάγεται στο πεδίο μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση:

$$\Phi = \frac{A_{\text{Phase}+}}{S_{\text{slot}}} - \frac{A_{\text{Phase}-}}{S_{\text{slot}}}$$

2. 31

όπου $A_{\text{Phase} \pm}$ είναι το διανυσματικό δυναμικό στις αύλακες που περιέχουν την εκάστοτε φάση, N ο αριθμός των σπειρών, και S_{slot} η επιφάνεια μίας αύλακος.

Συγκεκριμένα αποδεικνύεται ότι για κάθε στιγμιότυπο κατά την περιστροφή, η μαγνητική ροή είναι ίση με το άθροισμα των μαγνητικών ροών των στρώσεων των αυλάκων της αναχώρησης της φάσης A , μείον το άθροισμα των μαγνητικών ροών των στρώσεων της επιστροφής $-A$. Έτσι για κάθε στιγμιότυπο περιστροφής επιλέγονται όλες οι αύλακες που φέρουν περιελίξεις της αναχώρησης φάσης A , υπολογίζεται το διανυσματικό δυναμικό σε αυτές, και στη συνέχεια η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τις αύλακες που φέρουν περιελίξεις της επιστροφής της φάσης A (δηλαδή την $-A$). Κατά τη διαδικασία αυτή μετράται και το εμβαδόν μίας εκ των αυλάκων. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ενδεικτικά η διαδικασία αυτή, για έναν κινητήρα τεσσάρων πόλων και δώδεκα αυλάκων, με κατανομημένο τύλιγμα κλασματικού βήματος ([8]).



Σχήμα 2.11. Στιγμιότυπο κατά το οποίο επιλέγονται ξεχωριστά οι αύλακες της αναχώρησης και επιστροφής της φάσης A .

Με βάση τα προηγούμενα ο τελικός τύπος υπολογισμού της επαγόμενης αντί-ΗΕΔ προκύπτει:

$$e(\theta) = -\frac{2\pi}{60} \cdot n \cdot N \cdot \frac{\Phi(\theta_2) - \Phi(\theta_1)}{\theta_2 - \theta_1}$$

2. 32

όπου N όπως προαναφέρθηκε ο αριθμός των σπειρών του πηνίου, Φ όπως υπολογίστηκε από την σχέση 2.31 και n στροφές ανά λεπτό ως εξής:

$$n = 120 \cdot \frac{f}{p}$$

2. 33

2.4.3 Υπολογισμός απωλειών

Το έργο των ηλεκτρικών κινητήρων είναι η μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος σε μηχανική. Ωστόσο η ισχύς εισόδου δε μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε χρήσιμη μορφή εξόδου. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας μετατροπής αυτής εμφανίζονται κάποιες απώλειες. Η απόδοση ενός κινητήρα ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος εξόδου, προς της ισχύ εισόδου όπως φαίνεται στην παρακάτω σχέση:

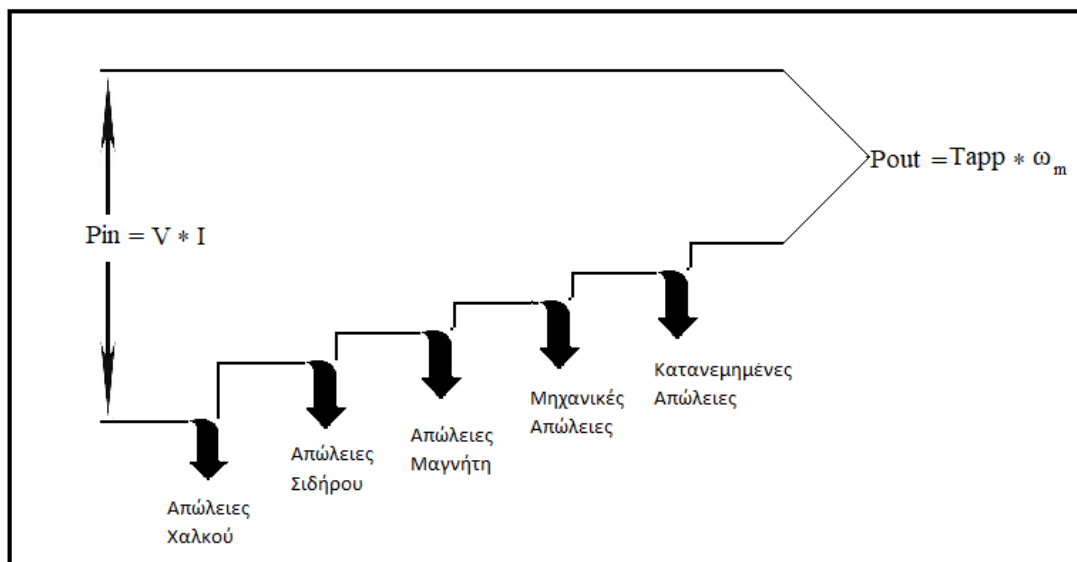
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \quad \text{ή} \quad \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}}$$

2. 34

Παρατηρείται πως η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών ποσοτήτων ισχύος είναι ακριβώς οι απώλειες του κινητήρα. Επομένως καθίσταται πασιφανές πως η μελέτη των απωλειών αυτών, με αναλυτικές μεθόδους που να επιτυγχάνουν τον ακριβή προσδιορισμό τους, κρίνεται απαραίτητη για έναν επιτυχή σχεδιασμό. Οι σημαντικότερες απώλειες, οι οποίες μάλιστα μπορούν να υπολογιστούν στα πλαίσια αναλυτικών μεθόδων σχετικά μικρής πολυπλοκότητας είναι οι εξής :

- Απώλειες χαλκού
- Απώλειες σιδήρου
- Απώλειες μαγνήτη
- Μηχανικές απώλειες

Μια από τις πιο εύχρηστες μεθόδους παράστασης των απωλειών ισχύος ενός ηλεκτρικού κινητήρα είναι το διάγραμμα ροής ισχύος. Στο εν λόγω διάγραμμα, το οποίο παρουσιάζεται παρακάτω, εμφανίζεται η ηλεκτρική ισχύς εισόδου, από την οποία αφαιρούνται διαδοχικά οι απώλειες χαλκού, οι απώλειες σιδήρου, οι απώλειες μαγνήτη, οι μηχανικές απώλειες και τέλος οι κατανεμημένες απώλειες. Το ποσοστό της ισχύος που απομένει θεωρείται ιδανικά ότι μετατρέπεται σε μηχανική ισχύς εξόδου.

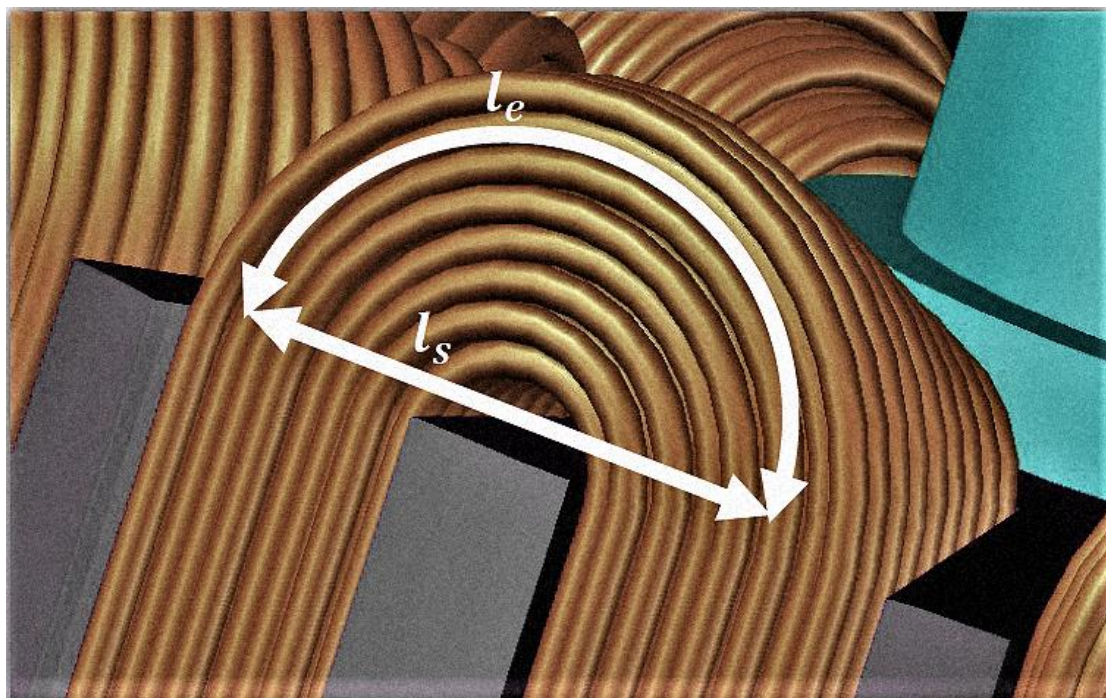


Σχήμα 2.12. Διάγραμμα ροής ισχύος

2.4.3.1 Απώλειες χαλκού

Οι απώλειες χαλκού οφείλονται στο ωμικό περιεχόμενο, που εμφανίζεται στα τυλίγματα του στάτη, και ονομάζονται έτσι λόγω της υλικής υπόστασης των πηνίων των τυλιγμάτων. Για τον υπολογισμό τους απαραίτητη κρίνεται η εύρεση της αντίστασης των πηνίων αυτών. Αυτό απαιτεί την λεπτομερή περιγραφή τους σε ότι αφορά το συνολικό μήκος, την διατομή, την ειδική αντίσταση και τον αριθμό περιελίξεων.

Το ακριβές μήκος κάθε σπείρας των πηνίων, με βάση το σχήμα που ακολουθεί, υπολογίζεται ως εξής:



Σχήμα 2.13. Αναπαράσταση περιέλιξης καλωδίων χαλκού γύρω από δόντι στον στάτη.

$$L_{coil} = olf \cdot (2 \cdot L + 2 \cdot l_s)$$

2. 35

όπου L θεωρείται το ενεργό μήκος του κινητήρα, και l_s η απόσταση από το γεωμετρικό μέσο της μίας στρώσης μιας αύλακας, μέχρι το γεωμετρικό μέσο της ακόλουθης στρώσης της γειτονικής αύλακας όπως φαίνεται στο σχήμα. Στη σχέση αυτή έχει προστεθεί ένας συντελεστής προσαύξησης, ονόματι « olf ». Αυτό συμβαίνει γιατί, όπως φαίνεται και από την σχηματική αναπαράσταση, για να μπορούν τα τυλίγματα να διανεμηθούν εντός των αυλάκων, απαιτείται ένα πρόσθετο μήκος λόγω κύρτωσης στο ανώτερο τους σημείο, η οποία αναπαρίσταται ως l_e . Χωρίς βλάβη της γενικότητας, ο συντελεστής αυτός αρχικοποιείται ως εξής:

$$olf = 1.2$$

2. 36

Έτσι η ωμική του αντίσταση ανά φάση, μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$R = \frac{N \cdot Q}{m} \cdot R_{cu} \cdot \frac{L_{coil}}{S_{wire}} \Rightarrow \quad 2.37$$

$$R = \frac{N \cdot Q}{m} \cdot R_{cu} \cdot \text{olf} \cdot \frac{2 \cdot L + 2 \cdot l_s}{S_{wire}} \quad 2.38$$

Όπου N ο αριθμός των τυλιγμάτων, Q ο αριθμός των αυλάκων, m ο αριθμός των φάσεων, R_{cu} θεωρείται η ειδική αντίσταση του υλικού κατασκευής των πηνίων, δηλαδή του χαλκού, και S_{wire} η διατομή του.

Αναγκαίως κρίνεται ο προσδιορισμός της ειδικής αντίστασης του χαλκού, της οποίας ο αναλυτικός τύπος διατυπώνεται ως εξής:

$$R_{cu} = R_{cu,0} \cdot (1 + \alpha_{cu} \cdot (T_{now} - T_0)) \quad 2.39$$

όπου $R_{cu,0}$ είναι η ειδική αντίσταση του χαλκού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, α_{cu} ο γραμμικός συντελεστής μεταβολής της αντίστασης του χαλκού συναρτήσει της θερμοκρασίας, T_{now} η θερμοκρασία λειτουργίας και T_0 η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Για τις ανάγκες τις παρούσας διπλωματικής τα παραπάνω στοιχεία αρχικοποιήθηκαν ως εξής:

$$\begin{aligned} R_{cu,0} &= 1.72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m \\ \alpha_{cu} &= 3.9 \cdot 10^{-3} \\ T_{now} &= 70^\circ\text{C} \\ T_0 &= 20^\circ\text{C} \end{aligned}$$

2.40

Όπως φαίνεται από την παραπάνω σχέση, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του χαλκού εξαρτάται γραμμικά από τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται ανά πάσα στιγμή. Ακολούθως, δεδομένης της ωμικής συμπεριφοράς των πηνίων, απαραίτητο για τον υπολογισμό των απωλειών χαλκού είναι το ρεύμα διαρροής των. Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης γεωμετρίας ηλεκτρικού κινητήρα, όπως αυτή πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, η γεωμετρία των αυλάκων στις οποίες διανέμονται τα πηνία του στάτη αλλάζει για τον εκάστοτε προς μελέτη κινητήρα. Η μεταβολή αυτή στο εμβαδόν της αύλακος συνεπάγεται, για δεδομένη εφαρμοζόμενη πυκνότητα ρεύματος σε αυτήν, ανάλογη μεταβολή ονομαστικού ρεύματος γραμμής. Η διατήρηση σταθερής εφαρμοζόμενης πυκνότητας ρεύματος και όχι σταθερού ρεύματος, οφείλεται στην τυπική θεώρηση, κατά τη σχεδίαση μηχανών, περί εξασφάλισης αξιοπιστίας θερμική συμπεριφοράς.

Εν προκειμένω κατά τη μελέτη του εκάστοτε κινητήρα, σε κάποιο στιγμιότυπο επιλέγεται μία εκ των αυλάκων με σκοπό τον υπολογισμό του εμβαδού αυτών (όπως έγινε και κατά τη διαδικασία υπολογισμού της αντί-ΗΕΔ), και στην συνέχεια εφαρμόζεται ο παρακάτω τύπος:

$$I_{coil} = \frac{J_{max} \cdot ff \cdot S_{slot}}{N} \quad 2.41$$

Όπου J_{\max} η RMS τιμή της πυκνότητας ρεύματος που εφαρμόζεται, ff ο συντελεστής πληρότητας τη αύλακος, S_{slot} το εμβαδόν της εν λόγω αύλακος και N ο αριθμός ελιγμάτων των πηνίων ανά αύλακα.

Εν κατακλείδι η αναλυτική συνάρτηση η οποία περιγράφει τις απώλειες χαλκού του κινητήρα είναι η εξής:

$$P_{cu} = 3 \cdot I_{coil}^2 \cdot R$$

2. 42

2.4.3.2 Απώλειες σιδήρου

Οι απώλειες σιδήρου ή αλλιώς απώλειες πυρήνα, εμφανίζονται όταν ένα μαγνητικό υλικό, όπως αυτό από το οποίο απαρτίζεται το σώμα ενός ηλεκτρικού κινητήρα, διεγείρεται από ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Για την κατασκευή του πυρήνα, δηλαδή του σώματος ενός κινητήρα, χρησιμοποιούνται ελάσματα σιδηρομαγνητικού υλικού, μονωμένα μεταξύ τους. Το σιδηρομαγνητικό υλικό αποτελείται κατά κανόνα από κράματα σιδήρου με «προσανατολισμένους κόκκους». Η χρήση των υλικών αυτών επιλέγεται λόγω της μεγάλης μαγνητικής διαπερατότητας τους (δηλαδή των πολύ καλών μαγνητικών ιδιοτήτων τους), επιτρέποντας λειτουργία σε υψηλή μαγνητική επαγωγή κατά την επιβολή εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου. Ο προσανατολισμός των κόκκων ευνοεί τη διέλευση της μαγνητικής ροής προς μία ορισμένη διεύθυνση, η οποία ονομάζεται διεύθυνση κύλισης. Η διεύθυνση κύλισης είναι συνεπώς η κατεύθυνση με τις ιδανικότερες για το υλικό μαγνητικές ιδιότητες, ενώ στις υπόλοιπες διευθύνσεις οι μαγνητικές του ιδιότητες είναι αρκετά διαφορετικές. Το γεγονός αυτό καθιστά το υλικό ανισότροπο. Οι απώλειες σιδήρου μπορούν να διαχωριστούν στις δύο εξής υποκατηγορίες :

- Τις απώλειες διννορευμάτων και
- Τις απώλειες υστέρησης.

2.4.3.2.1 Απώλειες διννορευμάτων

Όταν σε ένα μέσο η μαγνητική ροή μεταβάλλεται με το χρόνο, εμφανίζεται σε αυτό ηλεκτρικό πεδίο. Το γραμμικό ολοκλήρωμα του πεδίου αυτού E, πάνω σε μια κλειστή διαδρομή η οποία περικλείει τη ροή δίνεται από το νόμο επαγωγής του Faraday για έναν μοναδιαίο όγκο:

Ολοκληρωτική μορφή εξίσωσης Faraday:

$$\oint_l E \cdot dl = -\frac{d}{dt} \cdot \int B \cdot n \cdot dS$$

2. 43

όπου l κλειστή διαδρομή η οποία περιέχει την επιφάνεια επί της οποίας προσπίπτει η ροή Φ, δηλαδή το μέγεθος $\int B \cdot n \cdot dS$, και n το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετα προς την επιφάνεια αυτή. Εφόσον το μέσο είναι αγωγίμο, ένα ρεύμα εγκαθίσταται γύρω από τη διαδρομή εξαιτίας της ηλεκτρεγερτικής δύναμης E. Τέτοια ρεύματα ονομάζονται διννορεύματα, και η παρουσία τους έχει ως αποτέλεσμα απώλειες Joule λόγω της κυκλοφορίας ρευμάτων εντός του υλικού, ή αλλιώς απώλειες από διννορεύματα. Η ενέργεια απορροφάται από το κύκλωμα το οποίο προκαλεί το πεδίο και μετατρέπεται σε θερμότητα στο μέσο. Επειδή η πυκνότητα ροής σε σιδηρομαγνητικά υλικά είναι συνήθως σχετικά μεγάλη, και η ειδική αντίσταση των υλικών δεν είναι πολύ υψηλή, οι επαγόμενες ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις και συνεπώς τα διννορεύματα και η απώλεια από αυτά μπορεί να είναι σημαντικά εάν δε ληφθούν μέτρα για μείωσή τους. Οι απώλειες αυτές έχουν ιδιαίτερη σημασία για τον καθορισμό της ανύψωσης της θερμοκρασίας.

Για τον καθορισμό των απωλειών από διννορεύματα σε συνθήκες όμοιες προς αυτές που υφίστανται σε πυρήνα σιδήρου, θεωρούμε λεπτή μεταλλική πλάκα, η οποία διαπερνάται από εναλλασσόμενη ροή Φ . Η διανομή της ροής στο θεωρούμενο εμβαδό είναι τέτοια ώστε μικρότερη πυκνότητα ροής εμφανίζεται στο κέντρο της πλάκας παρά κοντά στην περιβάλλουσα επιφάνεια. Αυτό σημαίνει ότι η συνολική ροή τείνει να συγκεντρωθεί κοντά στην περιβάλλουσα επιφάνεια της πλάκας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται επιδερμικό. Το μαγνητικό επιδερμικό φαινόμενο υπόκειται σε μαθηματική ανάλυση, κατά την οποία πραγματοποιείται η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης της διάχυσης, λαμβάνοντας υπόψιν τις σχετικές οριακές συνθήκες. Επειδή όμως μία τέτοια ανάλυση είναι κάπως περίπλοκη, συνήθως αγνοείται το φαινόμενο αυτό, και τα αποτελέσματα που προκύπτουν έχουν μία σχετική ακρίβεια για πολλές εφαρμογές, ειδικά σε συσκευές οι οποίες διαθέτουν πυρήνες με ελάσματα. Αποδεικνύεται ότι σε μαγνητικό κύκλωμα το οποίο περιέχει όγκο V υλικού πυρήνα με ελάσματα και το οποίο υπόκειται στις ίδιες μαγνητικές συνθήκες με το μοναδιαίο όγκο που θεωρήσαμε παραπάνω στην σχέση 2.43, η μέση τιμή απώλειας ισχύος από διννορεύματα είναι:

$$P_c = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot \tau^2 \cdot B_{max}^2 \cdot V}{6 \cdot \rho}$$

2. 44

Όπου V ο όγκος του προς μελέτη υλικού, B_{max} η μέγιστη τιμή της πυκνότητας ροής, f η συχνότητα μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής, ρ η ειδική αντίσταση του υλικού και τ το πάχος του ελάσματος του υλικού ([5] [10]).

2.4.3.2.2 Απώλειες υστέρησης

Όπως είναι γνωστό, όταν η πυκνότητα ροής σε κάποιο μέσο μεταβληθεί από μια τιμή B_1 σε μία άλλη τιμή B_2 , απορροφάται ενέργεια από το μέσο. Η απορροφούμενη ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα όγκου δίνεται από τη σχέση:

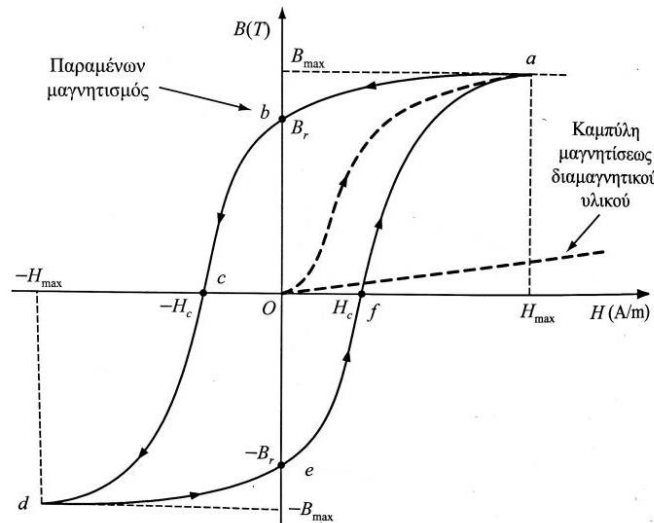
$$W = \int_{B_1}^{B_2} H(B)dB$$

2. 45

Το ολοκλήρωμα της εξίσωσης αυτής είναι ανάλογο του εμβαδού που ορίζεται από την καμπύλη $B(H)$ του μέσου και τις ευθείες που είναι παράλληλες στον άξονα των B_1 και B_2 αντίστοιχα και παριστάνουν τις σταθερές τιμές αυτών. Συνεπώς το μέτρο ολοκληρώματος εξαρτάται από τις τιμές B_1, B_2 και τη μορφή της καμπύλης. Εάν η πυκνότητα ροής μειωθεί από μία ορισμένη τιμή σε μικρότερη, το αλγεβρικό σημείο του W είναι αρνητικό και έχουμε απόδοση ενέργειας από το υλικό.

Όταν το θεωρούμενο μέσο αποτελείται από σιδηρομαγνητικό υλικό, η καμπύλη μαγνήτισης μεταξύ δύο οποιωνδήποτε τιμών B_1 και B_2 οι οποίες αντιστοιχούν σε μειούμενες τιμές του H , είναι διαφορετική από την καμπύλη που αντιστοιχεί σε αυξανόμενες τιμές του. Αυτό φαίνεται στο βρόχο υστέρησης του σιδηρομαγνητικού υλικού του Σχήματος 2.14, ο οποίος αποτελείται από δύο κλάδους, έναν για αυξανόμενες τιμές του H , $defa$, και έναν άλλο για μειούμενες τιμές του, $abcd$. Ο βρόχος αυτός προκύπτει με κυκλική μαγνήτιση σιδηρομαγνητικού υλικού. Λόγω της διαφοράς των καμπυλών των δύο κλάδων, προκύπτει ότι η ενέργεια που απορροφάται από το υλικό όταν η πυκνότητα ροής αυξηθεί από B_1 σε B_2 είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που επιστρέφεται όταν η πυκνότητα ελαττωθεί από B_2 σε B_1 . Η διαφορά των δύο αυτών ενεργειών είναι το μέτρο της απώλειας υστέρησης. Με γραφικό υπολογισμό του ολοκληρώματος της παραπάνω εξίσωσης είναι δυνατός ο καθορισμός της απώλειας υστέρησης ανά κύκλο.

Παρακάτω φαίνεται η καμπύλη μαγνήτισης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, καθώς και ο βρόχος υστέρησης που σχηματίζεται κατά την εφαρμογή μιας εναλλασσόμενης έντασης μαγνητικού πεδίου H .



Σχήμα 2.14. Καμπύλη μαγνήτισης (BH curve)

Από το ανωτέρω σχήμα προκύπτει ότι, όταν επιβληθεί εναλλασσόμενη ένταση H και καθώς εκείνη αυξάνεται μέχρι την τιμή H_{max} , το υλικό μαγνητίζεται κατά μήκος της Oa , φτάνοντας στην μέγιστη επαγωγή B_{max} . Όταν η ένταση του πεδίου αρχίσει να μειώνεται, μέχρι να μηδενιστεί, η μαγνητική επαγωγή θα μειωθεί, όχι με τον ίδιο τρόπο που αυξήθηκε, αλλά κατά μήκος της καμπύλης $abcd$, λόγω της μαγνήτισης του υλικού. Ωστόσο όπως φαίνεται στο εν λόγω σχήμα, όταν η ένταση H μηδενιστεί, δεν συμβαίνει το ίδιο για την πυκνότητα μαγνητικής ροής, η οποία έχει την τιμή B_r . Η τιμή αυτή καλείται παραμένουσα μαγνήτιση στο υλικό. Η παραμένουσα μαγνήτιση είναι πολύ μικρή στα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά, ενώ στα σκληρά μαγνητικά υλικά, όπως τα υλικά των μονίμων μαγνητών, είναι αισθητά υψηλή. Για τον μηδενισμό αυτής της μαγνητικής επαγωγής, απαιτείται ένταση μαγνητικού πεδίου H_c . Λόγω συνεχούς μεταβολής του μαγνητικού πεδίου, η μαγνήτιση ακολουθεί την διαδρομή $abcdef$, δημιουργώντας έτσι τον παραπάνω βρόχο μαγνήτισης. Το εμβαδόν αυτού του βρόχου, ο οποίος καλείται βρόχος υστέρησης, καθορίζει τις απώλειες υστέρησης. Η ενέργεια αυτή χάνεται με τη μορφή θερμότητας, και συνεπώς πέραν της συνεισφοράς της στην απόδοση του κινητήρα, είναι ιδιαίτερα σημαντική και για την ανύψωση της θερμοκρασίας του, και συνεπώς για την αξιοπιστία της θερμικής συμπεριφοράς του.

Εν κατακλείδι ο τελικός υπολογισμός των απωλειών ισχύος υστέρησης ανά μονάδα όγκου, με βάση τον ορισμό της ενέργειας στη σχέση 2.45 γίνεται ως εξής:

$$Ph = \frac{dW}{dt} = Ph = \frac{d}{dt} \cdot \int_{total} H(B)dB \quad 2.46$$

Βασιζόμενοι στην παραπάνω αναλυτική μέθοδο, αποδεικνύεται ότι σε μαγνητικό κύκλωμα το οποίο περιέχει όγκο V υλικού πυρήνα, οι απώλειες υστέρησης υπολογίζονται με τον εξής τύπο:

$$Ph = k_h \cdot \omega \cdot B_{max}^\beta \cdot V \quad 2.47$$

όπου k_h και β , σταθερές που εξαρτώνται από τη γεωμετρία και τις ιδιότητες του υλικού, ω η γωνιακή συχνότητα περιστροφής του πεδίου και B_{max} η μέγιστη τιμή της μαγνητικής επαγωγής ([5], [10]).

Οι συνολικές απώλειες οι οποίες λαμβάνουν χώρα στον πυρήνα, δηλαδή στο σιδηρούν μέρος ενός κινητήρα, όταν αυτός διεγείρεται από ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο ορίζονται ως το άθροισμα των απωλειών δυνωρουμάτων και υστέρησης, όπως αυτές υπολογίστηκαν παραπάνω. Συνεπώς ισχύει :

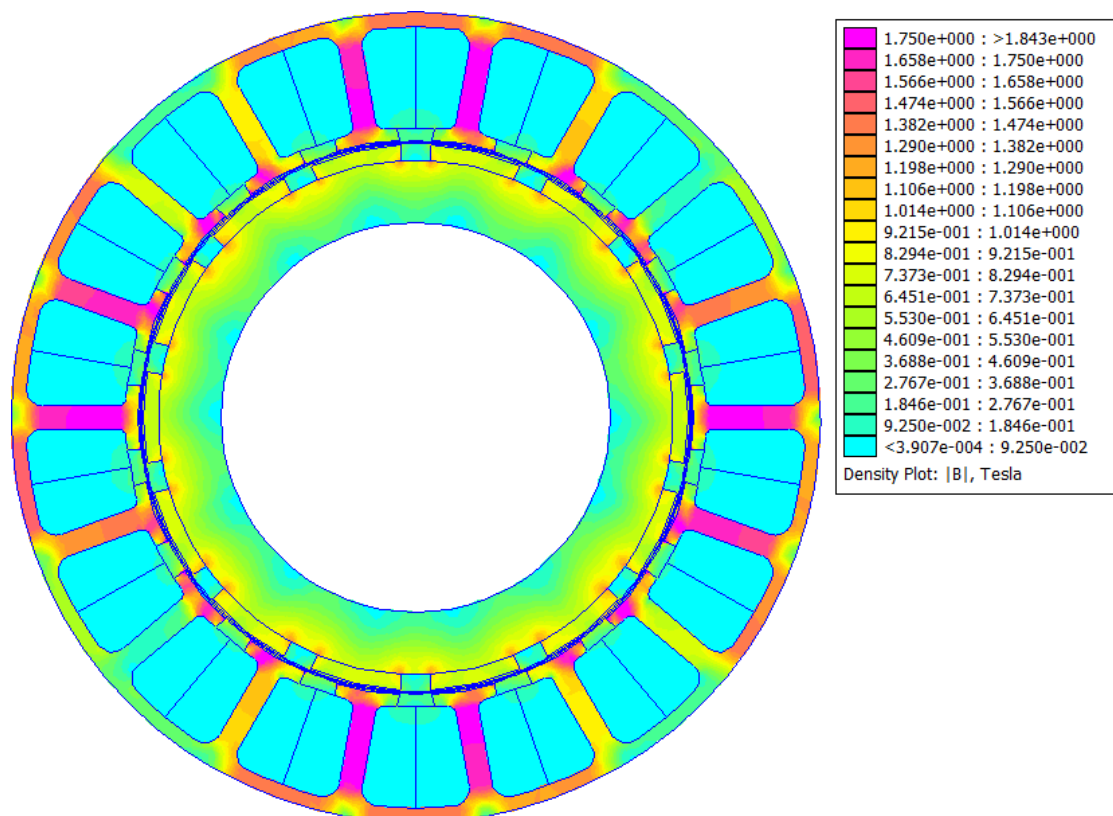
$$P_{fe} = P_c + P_h = \frac{\pi^2 \cdot f^2 \cdot \tau^2 \cdot B_{max}^2 \cdot V}{6 \cdot \rho} + kh \cdot \omega \cdot B_{max}^\beta \cdot V$$

2. 48

2.4.3.2.3 Εναλλακτικός υπολογισμός απωλειών σιδήρου

Παραπάνω ορίστηκε μία υπολογιστική μέθοδος για τον υπολογισμό των απωλειών σιδήρου. Όπως έχει προαναφερθεί οι απώλειες σιδήρου διακρίνονται σε απώλειες δυνωρουμάτων και απώλειες υστέρησης. Αμφότερες οι δύο κατηγορίες υπολογίστηκαν με την βοήθεια ορισμένων υπολογιστικών μεθόδων. Στις απώλειες υστέρησης θεωρήθηκαν κάποιες σταθερές, με βάση το υλικό το οποίο είχε επιλεγεί και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα. Ωστόσο δεδομένης της αλλαγής των κατασκευαστικών υλικών, οι σταθερές αυτές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκ νέου. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε μία αναλυτική μέθοδος υπολογισμού απωλειών σιδήρου.

Η διαδικασία βασίζεται στην χωρική απεικόνιση της μαγνητικής επαγωγής, μέσω του υπολογιστικού περιβάλλοντος FEMM, σε κάθε σημείο του κινητήρα. Η απεικόνιση αυτή γίνεται με κατάλληλη βαθμονόμηση των τιμών της μαγνητικής επαγωγής και αντιστοίχισή τους σε χρωματικές παλέτες. Παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα:



Σχήμα 2.15. Χρωματική απεικόνιση μαγνητικής επαγωγής

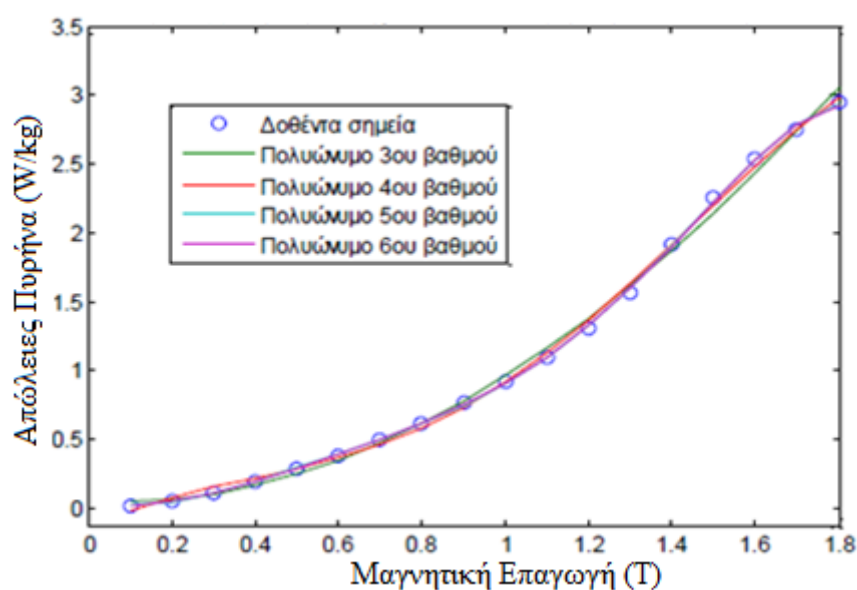
Η διαδικασία αυτή πρακτικά πλεγματοποιεί τον κινητήρα, δημιουργώντας μικροσκοπικά ορθογώνια παραλληλεπίπεδα επιφάνειας ενός rixel και βάθους ίσο με το ενεργό μήκος της μηχανής. Η παραπάνω εικόνα τίθεται υπό επεξεργασία, μέσω της οποίας είναι δυνατόν να γνωρίζουμε το ακριβές χρώμα του κάθε rixel και συνεπώς την τιμή της μαγνητικής επαγωγής σε κάθε σημείο του κινητήρα. Εν συνεχεία υπολογίζεται ο αριθμός των rixel που εμφανίζουν κάθε ένα εκ των διαφορετικών χρωμάτων και μέσω αυτού το ποσοστό του κάθε χρώματος στο γράφημα. Έτσι καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός του ποσοστού του όγκου του πυρήνα του κινητήρα, το οποίο διαρρέεται από καθεμία εκ των τιμών μαγνητικής επαγωγής που αναφέρονται στον πίνακα, πλησίον του γραφήματος.

Στις ιδιότητες κάθε υλικού υπάγονται και οι απώλειες πυρήνα του, σε συνθήκες διαφόρων δυνατών τιμών μαγνητικής επαγωγής. Παρακάτω φαίνονται οι τιμές απωλειών πυρήνα του αρχικού υλικού M235-35A, συναρτήσει διαφόρων τιμών μαγνητικής επαγωγής ως εξής:

Πίνακας 2.4. Απώλειες πυρήνα M235-35A, συναρτήσει μαγνητικής επαγωγής.

T	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
W/kg	0.02	0.06	0.11	0.20	0.29	0.38	0.50	0.62	0.77
T	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8
W/kg	0.92	1.10	1.31	1.56	1.92	2.25	2.53	2.75	2.94

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα παραπάνω σημεία δεν αποτελούν παρά ενδεικτικές συντεταγμένες της συνάρτησης απωλειών πυρήνα ως προς της μαγνητική επαγωγή. Συνεπώς για την αντιστοίχιση κάθε πιθανής τιμής μαγνητικής επαγωγής σε συγκεκριμένες απώλειες πυρήνα, απαραίτητος κρίνεται ο ακριβής ορισμός της συνάρτησης αυτής. Για τον σκοπό αυτό ακολουθεί μία διαδικασία προσέγγισης της ακριβούς συμπεριφοράς της συνάρτησης, μέσω των παραπάνω ενδεικτικών σημείων, υπο πολυωνμική μορφή. Στη διαδικασία θεωρήθηκαν πολυώνυμα διαφορετικού βαθμού, ώστε να βρεθεί αυτό που προσεγγίζει τα ενδεικτικά σημεία καλύτερα. Στο κάτωθι γράφημα απεικονίζεται η προαναφερθείσα διαδικασία. Αναδεικνύεται στην περίπτωση αυτή πώς το πολυώνυμο 6^{ου} βαθμού προσεγγίζει καλύτερα τα ενδεικτικά σημεία.



Σχήμα 2.16. Προσέγγιση καμπύλης απωλειών πυρήνα με πολυώνυμα διαφορετικού βαθμού.

Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η αντιστοίχιση οποιασδήποτε τιμής μαγνητικής επαγωγής στο σώμα του σιδήρου, σε συγκεκριμένη τιμή απωλειών πυρήνα.

Έτσι για τον τελικό υπολογισμό των απωλειών χρησιμοποιείται η σχέση:

$$Pfe = \sum_{i=1}^n loss,i \cdot d \cdot V,i$$

2. 49

Όπου $loss,i$ η i -οστή τιμή απωλειών πυρήνα εκφρασμένη σε W/kg, όπως υπολογίστηκε από την παραπάνω μέθοδο, d η πυκνότητα του υλικού και V,i η i -οστή τιμή όγκου πυρήνα, εκφρασμένη ως ποσοστό του συνολικού όγκου, ως εξής:

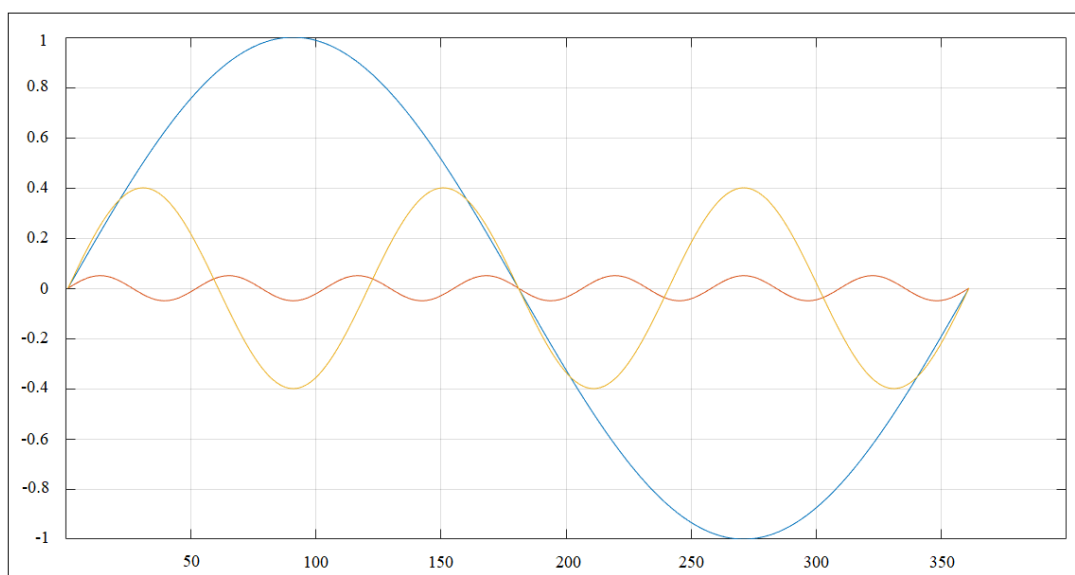
$$V,i = \pi \cdot V$$

2. 50

Όπου π το ποσοστό του i -οστού χρώματος στη χρωματική απεικόνιση της μαγνητικής επαγωγής.

2.4.3.3 Απώλειες μονίμων μαγνητών

Οι απώλειες μονίμων μαγνητών υπολογίζονται χρησιμοποιώντας μία αναλυτική διαδικασία, κατά την οποία γίνεται αρμονική ανάλυση της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο. Αναλυτικότερα οι γεωμετρίες του στάτη, δεδομένων των αυλακώσεων που αυτή περιέχει, αλλά και του δρομέα, δεδομένων των μαγνητών που τοποθετούνται σε αυτόν, δημιουργούν μία αλλοίωση στην μαγνητική επαγωγή του κινητήρα και επομένως στην αντί-HEΔ του η οποία έχει αρνητικές επιδράσεις στην ποιότητα της κυματομορφής της. Η αλλοίωση αυτή ονομάζεται χωρική αρμονική παραμόρφωση, και μεταφράζεται με την παρουσία παρασιτικών ημιτονικών συνιστωσών με μικρότερα πλάτη και μεγαλύτερες συχνότητες, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, οι οποίες ονομάζονται αρμονικές συνιστώσες.



Σχήμα 2.17. Αναπαράσταση αρμονικών συνιστωσών.

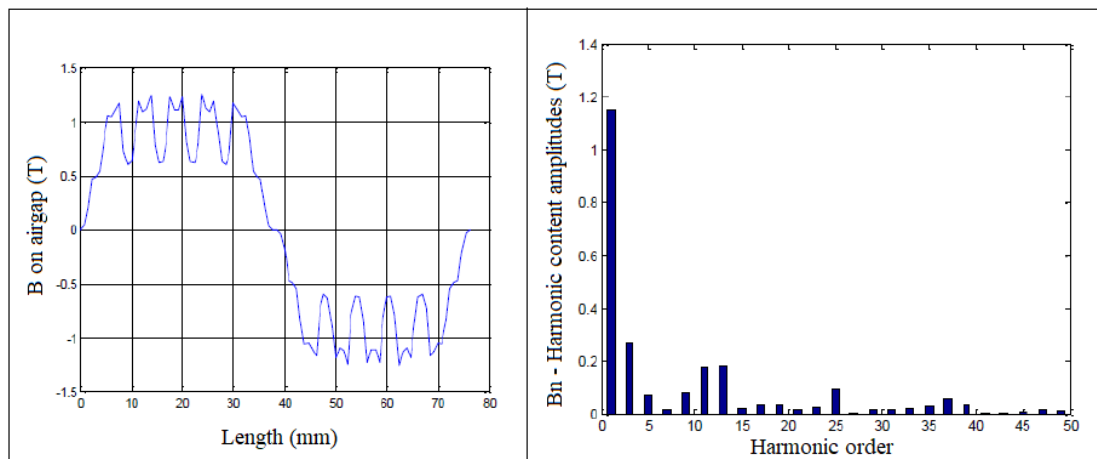
Η ύπαρξη των αρμονικών αυτών συνιστώσων, έχει ως αποτέλεσμα την επαγωγή δινορευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες οι οποίοι είναι διατεταγμένοι είτε στην περιφέρεια είτε στο εσωτερικό του δρομέα, με αποτέλεσμα την πρόκληση των απωλειών μόνιμων μαγνητών. Επειδή όμως οι απώλειες μόνιμων μαγνητών μπορούν να υπολογιστούν δύσκολα με βάση πολύπλοκες αναλυτικές μεθόδους, θεωρήθηκαν αμελητέες και ακολούθησε ανάλυση μόνο σχετικά με την αρμονική παραμόρφωση. Για να αξιολογηθεί η ποιότητα μιας οποιασδήποτε κυματομορφής, θα πρέπει η κυματομορφή αυτή να παραταθεί με σειρές Fourier, έτσι ώστε να είναι γνωστά τα πλάτη και οι συχνότητες των συνιστωσών της. Στο Σχήμα 2.18 φαίνεται η αναπαράσταση μίας κυματομορφής μαγνητικής επαγωγής η οποία εμπεριέχει αρμονικές παραμορφώσεις, καθώς και η ανάλυση Fourier που έγινε σε αυτήν, με σκοπό τον προσδιορισμό των πλατών και συχνοτήτων των παραμορφώσεων. Συγκεκριμένα η αναπαράσταση περιέχει το πλάτος της εκάστοτε αρμονικής, αλλά και την θέση της «νι-οστής» αρμονικής συχνότητας. Ο όρος «νι-οστή» αρμονική συχνότητα ορίζεται ως εξής:

$$f_n = n \cdot f \quad , \text{ για } n=1,3,5\dots \text{ κ.ο.κ}$$

2.51

όπου f η συχνότητα περιστροφής του πεδίου.

Η μελέτη αυτή πρέπει να γίνει για μήκος μίας πλήρους περιόδου, το οποίο στην περιφέρεια του δρομέα κατά μήκος των μαγνητών μεταφράζεται ως μήκος δύο διαδοχικών μαγνητών.



Σχήμα 2.18. Γραφική αναπαράσταση παραμορφωμένου σήματος πλήρους περιόδου, και της Fourier ανάλυσης των αρμονικών παραμορφώσεών του.

Για κυματομορφές εναλλασσόμενων μεγεθών, οι οποίες περιέχουν εκτός της θεμελιώδους και άλλες παρασιτικές συνιστώσες ορίζεται ένας συντελεστής που περιγράφει την ποιότητά τους. Ο συντελεστής αυτός ονομάζεται συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης. Εν προκειμένω για την μαγνητική επαγωγή ισχύει:

$$THD, B\% = \frac{\sqrt{B_{,3}^2 + B_{,5}^2 + B_{,7}^2 + \dots}}{B_{,1}} \cdot 100\%$$

2. 52

όπου $B_{,i}$ για $i=3,5,7$, κ.ο.κ, οι τάξεις της μαγνητικής επαγωγής των αντίστοιχων αρμονικών, και $B_{,1}$ η καλούμενη ως «πρώτη ή θεμελιώδης αρμονική» η οποία είναι η κυματομορφή συχνότητας f , δηλαδή η ημιτονική κυματομορφή της μαγνητικής επαγωγής.

2.4.3.4 Μηχανικές απώλειες

Οι μηχανικές απώλειες, αποτελούν το τελευταίο στάδιο των απωλειών, δηλαδή τις απώλειες που δημιουργούνται λόγω τριβής των μηχανικών μερών του κινητήρα, η λόγω ανεμισμού.

2.4.3.4.1 Απώλειες τριβής

Ο υπολογισμός των απωλειών τριβής είναι αρκετά δύσκολος, καθώς αποτελεί συνάρτηση πολλών παραμέτρων, όπως η γεωμετρία του κινητήρα, η ύπαρξη ή όχι λιπαντικού μέσου, οι μάζες των επιμέρους υλικών, η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής κ.α. Ωστόσο λόγω της ανάγκης προσδιορισμού τους για λόγους πληρότητας, γίνεται χρήση μιας υπολογιστικής μεθόδου η οποία με δοκιμές φαίνεται να προσεγγίζει με αρκετή ακρίβεια την τιμή των απωλειών τριβής. Η εν λόγω υπολογιστική μέθοδος αντιστοιχεί σε σύγχρονο κινητήρα μονίμων μαγνητών, και λαμβάνει υπόψιν τις παραπάνω παραμέτρους ως εξής:

$$P_{fr} = k_{fb} \cdot \frac{(m_r + m_{mag})}{1000} \cdot n$$

2. 53

όπου k_{fb} ένας εμπειρικός συντελεστής ο οποίος τίθεται ίσος με 3, m_r και m_{mag} οι μάζες του δρομέα και του μαγνήτη αντίστοιχα και n η σύγχρονη ταχύτητα του δρομέα σε στροφές ανα λεπτό.

2.4.3.4.2 Απώλειες ανεμισμού

Οι απώλειες ανεμισμού ή αλλιώς αεροδυναμικές απώλειες, δημιουργούνται όταν σε στρεφόμενο δρομέα, εισχωρεί αέρας στα διάφορα σημεία του διακένου, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται στροβιλισμοί και συνεπώς έντονες μη γραμμικότητες κατά τη λειτουργία. Για το λόγο αυτό ο στρεφόμενος δρομέας δεν μπορεί να είναι ένα τυχαίο σχήμα. Αντιθέτως φέρεται να είναι μια τέλεια μάζα με μεγάλες διαμέτρους, και με μικρό μήκος διακένου, ώστε το φαινόμενο αυτό της μη γραμμικότητας που δημιουργείται, να μειώνεται κατά το δυνατόν περισσότερο. Στην περίπτωση αυτή οι απώλειες που προκύπτουν λόγω ανεμισμού υπολογίζονται από την παρακάτω υπολογιστική μέθοδο, η οποία περιέχει διαχωρισμό για κινητήρες επιφανειακών και εσωτερικών μαγνητών ως εξής:

$$P_{wind} = \begin{cases} \frac{L \cdot (2 \cdot R_r + 2 \cdot H_{mag})^3 \cdot n^3}{10^6}, & \text{επιφανειακών μαγνητών} \\ \frac{L \cdot (2 \cdot R_r)^3 \cdot n^3}{10^6}, & \text{εσωτερικών μαγνητών} \end{cases}$$

2. 54

Όπου L το ενεργό μήκος, R_r η ακτίνα ρότορα, H_{mag} το πάχος μαγνήτη και n η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα.

Συνεπώς οι συνολικές απώλειες οι οποίες προκύπτουν λόγω της μηχανικής φύσεως του προς μελέτη αντικειμένου μπορούν να γραφούν ως το άθροισμα των απωλειών τριβής και ανεμισμού ως εξής:

$$P_{mec} = P_{fr} + P_{wind}$$

2. 55

Ωστόσο αξίζει να αναφερθεί πως κατά τη λειτουργία του κινητήρα υπάρχουν και άλλου είδους μηχανικές απώλειες, οι οποίες μάλιστα μπορούν να αποδειχθούν καταστροφικές για τον ίδιο.

Παρακάτω ακολουθεί μια σύντομη ανάλυση τέτοιων φαινομένων, τα οποία μάλιστα παρατηρήθηκαν πειραματικά σε εφαρμογές, ενώ μέχρι πρότινος η ύπαρξή τους ήταν άγνωστη. Κατά την περιστροφή του δρομέα, συγχρόνως με τα προαναφερθέντα μηχανικά φαινόμενα παρατηρούνται έντονα φαινόμενα ταλαντώσεων. Αυτές οι ταλαντώσεις δημιουργούν τους λεγόμενους «ρυθμούς». Ως ρυθμός ορίζεται ο συντονισμός των μικρού πλάτους ταλαντώσεων αυτών με τη συχνότητα περιστροφής του δρομέα. Ο συντονισμός αυτός είναι ικανός να καταστρέψει τη μηχανή. Οι ρυθμοί διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, σε καμπτικό και στατικό ρυθμό.

Ο καμπτικός ρυθμός παρατηρείται σε κάποια ταχύτητα, όπου ο δρομέας αρχίζει και εμφανίζει λυγισμό, με πιθανή συνέπεια να σπάσει. Ένας τρόπος αποφυγής αυτού του ρυθμού, είναι η αλλαγή σχεδιαστικής διαμόρφωσης της σχέσης διαμέτρου και ενεργού μήκους ώστε ο κινητήρας να μην εμφανίζει καμπτικούς ρυθμούς σε αυτή την ταχύτητα.

Ο στατικός ή δυναμικός ρυθμός δημιουργεί στρεπτικές ταλαντώσεις τμημάτων του κινητήρα, οι οποίες είναι μάλιστα μεταβλητές με τη συχνότητα λειτουργίας του. Αξίζει να σημειωθεί πως εν προκειμένω η βέλτιστη σχεδίαση δεν είναι επαρκής, καθώς οι στατικοί ρυθμοί μπορεί να διεγερθούν είτε από μια εφαρμόζουσα συχνότητα λειτουργίας, είτε και από παρασιτικές αρμονικές συχνότητες που δημιουργούνται κατά την λειτουργία του κινητήρα.

Οι δύο αυτές κατηγορίες ρυθμών, εμφανίζονται με σειρά αναφοράς σε χαμηλές (της τάξης των 100Hz) και σε υψηλές (της τάξης των 1000-10000Hz) συχνότητες αντίστοιχα.

2.4.3.5 Κατανεμημένες ή διαφεύγουσες απώλειες

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα ισχύος του Σχήματος 2.12, στις συνολικές απώλειες του κινητήρα περιλαμβάνεται και μία κατηγορία η οποία δεν έχει αναφερθεί ως τώρα. Οι απώλειες περί των οποίων ο λόγος ονομάζονται κατανεμημένες απώλειες, κατηγορία στην οποία περιλαμβάνονται αυτές οι οποίες δεν μπορούν να ενταχθούν σε μία από τις προηγούμενες. Όσο προσεκτικά και αν υπολογιστούν οι απώλειες του κινητήρα, ένα ποσοστό τους ξεφεύγει από τους υπολογισμούς που γίνονται σύμφωνα με τις προηγούμενες σχέσεις. Αυτό το ποσοστό αντιπροσωπεύεται στους υπολογισμούς από τις κατανεμημένες απώλειες, οι οποίες εν γένει θεωρείται ότι είναι το 1% της ισχύος εξόδου κατά τη λειτουργία πλήρους φορτίου.

2.4.4 Υπολογισμός απόδοσης

Όπως έχει προαναφερθεί, η απόδοση αποτελεί χαρακτηριστικό μείζονος σημασίας για τον κινητήρα. Σύμφωνα με τον τύπο της απόδοσης όπως αυτός ορίστηκε με τη σχέση 2.34, ισχύει ότι :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \quad \text{ή} \quad \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}}$$

Με βάση την παραπάνω αναλυτική μεθοδολογία, έχοντας υπολογίσει την ακριβή τιμή της ροπής, η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} = \frac{T_{mean} \cdot \omega_s}{T_{mean} \cdot \omega_s + P_{loss}}$$

2. 56

όπου T_{mean} υπολογίστηκε παραπάνω ως η μέση τιμή της ροπής για ονομαστική λειτουργία κινητήρα, ω_s η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και P_{loss} το άθροισμα των απωλειών όπως αυτές υπολογίστηκαν.

Συγκεκριμένα:

$$\omega, s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{P/2}$$

2. 57

Και

$$P, loss = P_{cu} + P_{fe} + P_{mec} + P_{\text{διαφευγ.}}$$

2. 58

2.4.5 Θερμική ανάλυση

Στα πλαίσια της επαρκούς ανάλυσης ηλεκτρικών κινητήρων, δεν θα μπορούσε να μην γίνει αναφορά στην θερμική συμπεριφορά τους. Η θερμική ανάλυση των ηλεκτρικών κινητήρων αποτελεί τελευταία, αλλά διόλου ευκαταφρόνητη παράμετρο για την βέλτιστη σχεδίαση και λειτουργία του κινητήρα. Ήδη έχει γίνει σαφές πώς η θερμοκρασία η οποία αναπτύσσεται στο εσωτερικό του κινητήρα είναι μείζονος σημασίας για τις απώλειες, όπως τις απώλειες χαλκού με τον τρόπο που αυτές ορίστηκαν, ενώ αξίζει να αναφερθεί πως υπερβολική αύξηση της μπορεί να επιφέρει σημαντικές αλλαγές στην συμπεριφορά των κατασκευαστικών υλικών, όπως του σιδήρου μειώνοντας έτσι την απόδοση αλλά και την αξιοπιστία του. Όμως δεν είναι μόνο ο σίδηρος που επηρεάζεται από την θερμοκρασία. Μεγάλες αυξήσεις θερμοκρασίας μπορούν να επιφέρουν καταστροφικές συνέπειες στην επίδοση των μόνιμων μαγνητών. Καθίσταται λοιπόν πασιφανές πως η θερμική ανάλυση είναι μείζονος σημασίας για την ορθή λειτουργία του κινητήρα. Οι κύριες πηγές θερμότητας ή θερμικών απωλειών, είναι: α) τα τυλίγματα στις άυλακες του κινητήρα, λόγω των απωλειών χαλκού, β) τα τμήματα σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας με υψηλό κορεσμό, όπως τα δόντια, λόγω των υψηλών απωλειών πυρήνα και γ) το σώμα των μόνιμων μαγνητών λόγω των απωλειών δινορρευμάτων ([8]). Παρόλα αυτά στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν κρίθηκε σκόπιμο να ακολουθήσει μία ανάλυση τέτοιου βεληνεκούς, καθώς κάτι τέτοιο θα απαιτούσε την ανεξάρτητη μελέτη της θερμοκρασιακής συμπεριφοράς του κινητήρα, αλλά και τη θεώρηση καινούριων στατικών μοντέλων. Σε κάθε περίπτωση η αναφορά στην σημαντικότητα της θερμικής ανάλυσης δεν θα μπορούσε να λείπει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Προκαταρκτική σχεδίαση ηλεκτρικού κινητήρα μονίμων μαγνητών

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται λεπτομερώς οι διαδικασίες που ακολουθούνται για την προκαταρκτική σχεδίαση σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών εσωτερικού δρομέα.

Συγκεκριμένα γίνεται χρήση αναλυτικών σχέσεων που αφορούν την διαστασιολόγηση του διακένου, στην οποία εμπεριέχεται το πάχος του ιδίου, η διάμετρος του δρομέα και το ενεργό μήκος του κινητήρα. Τα μεγέθη αυτά βρίσκονται με βάση τις επιθυμητές τιμές επίδοσης. Εν συνεχεία βάσει της επιθυμητής ταχύτητας περιστροφής, παράγονται περιοριστικές σχέσεις που αφορούν τον αριθμό των πόλων οι οποίοι θα μελετηθούν. Μέσω αυτού θα γίνει αντίστοιχη απαρίθμηση των αριθμών αυλάκων.

Έτσι, και με βάση τα παραπάνω, προσδιορίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά σχεδιασμού των ηλεκτρικών κινητήρων που θα μελετηθούν. Τα χαρακτηριστικά αυτά θεωρούνται αμετάβλητα καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης.

Σε ότι αφορά την διαδικασία μελέτης, αρχικά παρατίθενται οι δύο διαφορετικές τοπολογίες τυλιγμάτων πηνίων οι οποίες θα μελετηθούν, όπως αυτές έχουν προκύψει από το Κεφάλαιο 2. Ακολούθως παρατίθενται όλες οι εξαρτημένες και ανεξάρτητες γεωμετρικές μεταβλητές οι οποίες πρόκειται να μελετηθούν στο επόμενο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα θεωρούνται διαφορετικά σχήματα δοντιού στάτη, διαφορετικές τοπολογίες μαγνητών, σε συνέχεια της ανάλυσης του Κεφαλαίου 1, καθώς και μία πληθώρα ποσοτικών γεωμετρικών μεταβλητών στα οποία θα ακολουθήσει σχεδιαστική μελέτη.

3.2 Προκαταρκτική Σχεδίαση

Η προκαταρκτική σχεδίαση δεν οδηγεί στην λεπτομερή διαμόρφωση του κινητήρα αλλά πρόκειται για μια διαδικασία εκκίνησης απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση, καθώς καθορίζει τα όρια των μεταβλητών σχεδίασης. Στην ουσία προσδιορίζει ένα ασφαλές σημείο εκκίνησης της γεωμετρίας του κινητήρα για την διαδικασία οριστικής σχεδίασης. Η διαδικασία προκαταρκτικής σχεδίασης περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

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

Για την υλοποίηση της προκαταρκτικής σχεδίασης, απαραίτητη κρίνεται η θεώρηση των επιθυμητών χαρακτηριστικών του προς μελέτη κινητήρα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θεωρήθηκαν ως επιθυμητά χαρακτηριστικά τα εξής:

- Ροπή εξόδου (T) = 10 Nm
- Στροφές ανά λεπτό ($\Sigma\Lambda\Lambda$) = 450
- Ισχύς εξόδου (P_{out}) = 470 W

Κατά την διαδικασία ανάλυσης των δεδομένων, θεωρήθηκε μελέτη κινητήρα σταθερού όγκου, με σκοπό την ανάδειξη της σημαντικότητας των υπολοίπων χαρακτηριστικών του στην έξοδο. Ο όγκος του κινητήρα προέκυψε με βάση τα παραπάνω επιθυμητά χαρακτηριστικά με τη χρήση υπολογιστικών μεθόδων, και θεωρήθηκε σταθερός σε όλη την διεξαγωγή της μελέτης.

3.2.1 Διαστασιολόγηση διακένου

Η διαστασιολόγηση του διακένου αφορά την προκαταρκτική σχεδίαση του νοητού κυλινδρικού φλοιού που σχηματίζεται ανάμεσα σε στάτη και δρομέα. Οι διαστάσεις αυτού ορίζονται από τις μεταβλητές D_g και L , που αντιστοιχούν στη διάμετρο του δρομέα, επαυξημένη κατά το πάχος του εν λόγω διακένου μεταξύ των δύο μερών του κινητήρα και στο ενεργό του μήκος. Η προκαταρκτική σχεδίαση του διακένου γίνεται με βάση ορισμένες τυπικές τιμές βασικών μαγνητικών, ηλεκτρικών και θερμικών μεγεθών, οι οποίες αναλύονται στην συνέχεια.

3.2.1.1 Επιφάνεια διακένου

Όπως έχει προαναφερθεί, η διαστασιολόγηση του διακένου κατέχει μείζονα σημασία για την επίδοση του κινητήρα. Η μέγιστη τιμή της επαγόμενης ροπής στο διάκενο T_e , υπολογίζεται βάσει της επαφτομενικής πίεσης των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο ως εξής:

$$T, max = \frac{F, t \cdot D, g}{2}$$

3. 1

όπου

$$F, t = P, t \cdot A$$

3. 2

71

και

$$A = \pi \cdot L \cdot D, g \quad 3.3$$

Συνεπώς :

$$T, max = \frac{\pi}{2} \cdot L \cdot D, g^2 \cdot P, t \quad 3.4$$

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

$$F, t = L \oint_c B, n \cdot B, t dl \quad 3.5$$

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

$$P, t = \frac{F, t}{A} = \frac{1}{\pi \cdot D, g \cdot \mu_0} \cdot \oint_c B, n \cdot B, t dl \quad 3.6$$

Εμπειρικά η μέση μαγνητική φόρτιση στο διάκενο B επιλέγεται συνήθως ίση με:

$$B = 0,6 T \quad 3.7$$

Θεωρώντας ότι η γωνία μεταξύ της ακτινικής και της επαπτομενικής συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου είναι $\theta=45^\circ$ προκύπτει:

$$B, n = B, t = B \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \quad 3.8$$

Καταληκτικά:

$$T, max = \frac{D, g^2 \cdot L}{2 \cdot \mu_0} \cdot \pi \cdot B, n \cdot B, t \quad 3.9$$

$$T, max = \frac{D, g^2 \cdot L}{4 \cdot \mu_0} \cdot \pi \cdot B^2 \quad 3.10$$

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω, η επαγόμενη από το πεδίο ροπή, εξαρτάται από το γινόμενο του τετραγώνου της διαμέτρου διακένου και του ενεργού μήκους του κινητήρα. Όμως η διαστασιολόγηση του διακένου δεν επηρεάζει μόνο την επίδοση. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι διαστάσεις του διακένου επηρεάζουν τόσο την απόδοση, όσο και τις μηχανικές αντοχές του κινητήρα. Εύκολα φαίνεται ότι τόσο η ροπή, όσο και η ισχύς του κινητήρα επηρεάζονται πολυωνμικά από την διάμετρο του διακένου, με μεγαλύτερο βαθμό από ότι από το ενεργό μήκος του. Συνεπώς κρίνεται απαραίτητος ο προσδιορισμός των δύο αυτών παραμέτρων, για τον υπολογισμό των επιθυμητών μεγεθών.

Στο σημείο αυτό πρέπει να ληφθούν υπόψη οι απαιτήσεις τις οποίες πρέπει να ικανοποιεί ο κινητήρας σε ροπή, ονομαστική ταχύτητα και ισχύ εξόδου. Για υψηλές απαιτήσεις ροπής, συνίσταται η επιλογή μεγάλης διαμέτρου διακένου, καθώς έτσι επιτυγχάνεται υψηλότερη παραγόμενη ροπή, λόγω της αύξησης της απόστασης του διακένου από τον άξονα. Αντιθέτως, η απόδοση της μηχανής δεν αυξάνεται κατ' ανάγκη όταν η αναλογία L/D_g είναι μειωμένη. Ο λόγος είναι ότι σε περίπτωση μεγάλης διαμέτρου διακένου σε σχέση με το μήκος της μηχανής, αυξάνεται το ποσοστό του τυλίγματος που βρίσκεται έξω από την ενεργή περιοχή του πυρήνα και κατά συνέπεια οι θερμικές απώλειες. Επίσης, μια μηχανή με πολύ επίμηκες διάκενο έχει μεγάλη μάζα πυρήνα και αναμένεται να εμφανίζει αυξημένες απώλειες πυρήνα, επομένως δεν επιτυγχάνει τη βέλτιστη απόδοση. Επιπρόσθετα, το μικρό αξονικό μήκος επιφέρει μεγάλες τιμές ροής σκέδασης στο διάκενο. Αντίθετα, για εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων, η τυπική προσέγγιση σχεδίασης είναι η επιλογή μεγάλου αξονικού μήκους και όχι η αύξηση της διαμέτρου, ώστε να επιτευχθεί αύξηση της ισχύος. Με αυτό τον τρόπο διατηρείται η επιφανειακή ταχύτητα δρομέα σε λογικές τιμές και έτσι αποφεύγονται υψηλές τιμές φυγόκεντρων δυνάμεων και τοπικών απωλειών σιδήρου. Παράλληλα, οι δρομείς μεγάλου ενεργού μήκους μπορεί να εμφανίζουν έντονη ταλαντωτική συμπεριφορά, λόγω μηχανικών μεταβατικών, με την αύξηση της ταχύτητας.

Η μηχανική αντοχή του δρομέα και η διαστασιολόγηση του διακένου εξαρτώνται και από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Σε μικρές ταχύτητες περιστροφής προτιμάται μικρός λόγος L/D_g . Σε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής, η οριακή τάση διακένου περιορίζει τον δρομέα σε μικρή ακτίνα και πλέον η επιθυμητή ισχύς λαμβάνεται με αύξηση του αξονικού μήκους της μηχανής. Και σε αυτή την περίπτωση όμως, υπάρχει μηχανικό όριο στην αύξηση του λόγου L/D_g , το οποίο συνίσταται στην ακαμψία του σώματος του δρομέα και την διατήρηση του διακένου.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναλαμβάνει να βελτιστοποιήσει την βασική γεωμετρία κινητήρα μονίμων μαγνητών, θεωρώντας σταθερό αρχικό όγκο μηχανής, με δεδομένο λόγο L/D_g . Η επιλογή των δύο αυτών παραμέτρων γίνεται με βάση την θεώρηση μελέτης κινητήρα μικρών ταχυτήτων. Θεωρήσαμε την μελέτη με ενεργό μήκος $L=130\text{mm}$ και διάμετρο εσωτερικού δρομέα $D_g=66\text{mm}$. Έτσι ο λόγος L/D_g προκύπτει ίσος με 1.9697. Η επιλογή της θεώρησης περί σταθερού όγκου στην μελέτη έγινε με σκοπό την ανάδειξη της μείζονος σημασίας των υπολοίπων γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κινητήρα, συμπεριλαμβανομένων του σχήματος δοντιών, της τοπολογίας των μαγνητών και άλλων γεωμετρικών μεγεθών στην διαμόρφωση του.

3.2.1.2 Πάχος διακένου

Το πάχος του διακένου είναι μείζονος σημασίας για την αποτελεσματική λειτουργία της μηχανής στην εκάστοτε εφαρμογή. Πρωτεύοντα ρόλο στην ποιοτική επιλογή του κατέχει το γεγονός πώς η ικανότητα ροπής του κινητήρα μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με αυτή της τιμής του ιδίου. Η γενική αρχή λοιπόν σχεδίασης στην οποία στηρίζεται η επιλογή του κατάλληλου πάχους διακένου, είναι πως όσο μικρότερη είναι αυτή η παράμετρος, τόσο μεγαλύτερες θα είναι οι συνιστώσες πυκνότητας δύναμης, ή ισοδύναμα της πίεσης, με αποτέλεσμα το μέγεθος της ροπής να είναι σημαντικά υψηλότερο. Ωστόσο, η μείωση του πάχους διακένου, επιφέρει ταυτόχρονη αύξηση του αρμονικού περιεχομένου της αντί-HEΔ του κινητήρα, η οποία δεν μπορεί να αγνοηθεί. Τέλος η μεταβλητή αυτή υπαγορεύεται από τις ανοχές των εδράσεων ή τις κατασκευαστικές ανοχές της μηχανής. Στην πράξη γίνεται χρήση πληθώρας εμπειρικών τιμών για το πάχος του διακένου, οι οποίες κυμαίνονται ανάμεσα σε 0,5 και 1mm σε μηχανές μικρής ισχύος.

Αρχική θεώρηση για το πάχος διακένου είναι η τιμή $l_g = 0,7 \text{ mm}$. Στην συνέχεια ακολουθούν δοκιμές για διαφορετικές τιμές του πάχους διακένου, ανάμεσα στα 0,5 και 1mm, από τις οποίες θα προκύψει η τελική διαμόρφωσή του.

Με βάση τις δύο παραπάνω παραδοχές προκαταρκτικής σχεδίασης, και στηριζόμενοι στην σχέση 3.9, η μέγιστη επαγόμενη ροπή στο διάκενο υπολογίζεται ως εξής:

$$T, \max = \frac{D, g^2 \cdot L}{4 \cdot \mu_0} \cdot \pi \cdot B^2 = \frac{((66 + 0,7 \cdot 2) \cdot 10^{-3})^2 \cdot 130 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot \pi \cdot 0,6 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = >$$

3. 11

$$T, \max = 15,9943 \text{ N}\cdot\text{m}$$

3. 12

Φυσικά η παραπάνω τιμή αποτελεί την μέγιστη και όχι την ονομαστική τιμή της επαγόμενης στο διάκενο ροπής για την δεδομένη τιμή μαγνητικού πεδίου. Η τιμή αυτή μπορεί πράγματι να αποδοθεί στο σύστημα, υπό την παρουσία όμως χρονικών περιορισμών, δηλαδή μόνο για μικρές χρονικά μεταβατικές καταστάσεις στις οποίες ο κινητήρας απαιτείται να αποδώσει μεγαλύτερη ροπή, και όχι για την ονομαστική μόνιμη λειτουργία. Στην ονομαστική μόνιμη κατάσταση επιθυμητή τιμή ροπής είναι τα 10N·m, την οποία θα προσπαθήσουμε να προσεγγίσουμε κατά τη διάρκεια της μελέτης.

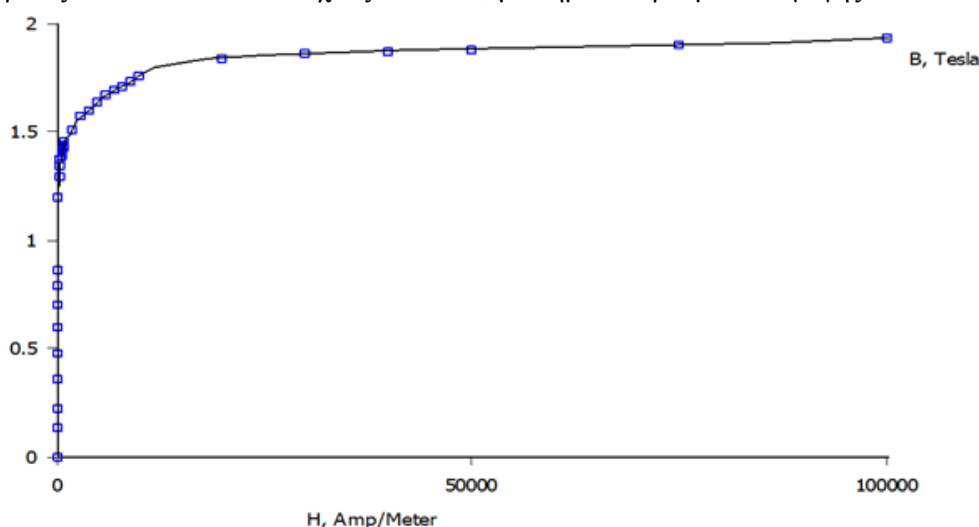
3.2.2 Ειδική μαγνητική φόρτιση

Η ειδική μαγνητική φόρτιση η αλλιώς μέση τιμή πυκνότητας μαγνητικής ροής B συνδέει τον αριθμό των πόλων P με την ροή ανά πόλο Φ μιας μηχανής ως εξής:

$$B, \text{av} = \frac{P \cdot \Phi}{\pi \cdot D, g \cdot L}$$

3. 13

Όπου D_g η διάμετρος του δρομέα και L το ενεργό μήκος τη μηχανής. Το μέγεθος αυτό, μονάδα μέτρησης του οποίου είναι τα T (Tesla), λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται ανάμεσα σε 0,4 έως 0,7 T. Η ανώτατη τιμή του εξαρτάται από το φαινόμενο κορεσμού του σιδηρομαγνητικού υλικού στα δόντια του στάτη. Συνεπώς αναδεικνύεται η σημασία επιλογής του καταλληλότερου υλικού. Υψηλή τιμή μαγνητικής φόρτισης συνεπάγεται αντίστοιχα υψηλή τιμή επιδιδόμενης ροπής, ωστόσο επιφέρει υψηλές απώλειες πυρήνα ιδιαίτερα στο σημείο κορεσμού του σιδηρομαγνητικού υλικού. Παρακάτω φαίνεται η συμπεριφορά της μαγνητικής λαμαρίνας τύπου M235 35A πάχους 0.35 mm, με σημείο κορεσμού επαγωγής τα 1.5 T.



Σχήμα 3.1. Καμπύλη μαγνήτισης λαμαρίνας τύπου M235 35^A, πάχους 0,35mm.

Η λαμαρίνα αυτή θα χρησιμοποιηθεί ως κατασκευαστικό υλικό του κινητήρα στο πρώτο μέρος της ανάλυσης, ενώ στην συνέχεια θα ακολουθήσει μελέτη με βάση τα χαρακτηριστικά σιδηρομαγνητικών λαμαρινών.

3.2.3 Ειδική ηλεκτρική φόρτιση

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

$$ac = \frac{3 \cdot N_i \cdot P \cdot I_{rms}}{\pi \cdot D, g}$$

3. 14

όπου N_i ο συνολικός αριθμός ελιγμάτων ανά φάση, και I_{rms} η ενεργός τιμή του ρεύματος.

Η παράμετρος αυτή λαμβάνει τιμές από 15.000 AE/m έως 45.000 AE/m . Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση καθώς και η ειδική μαγνητική φόρτιση που αναλύθηκε πρωτίστως αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες στην ικανότητα παραγωγής ροπής. Ταυτόχρονα η ηλεκτρική φόρτιση συνδέεται με τις απώλειες χαλκού της μηχανής.

Τα δύο παραπάνω μεγέθη συνδέονται με τη λεγόμενη σχέση εξόδου της ηλεκτρικής μηχανής, η οποία δίνει μια εκτίμηση της ροπής ή της ισχύος εξόδου. Όπως έχει προαναφερθεί, η ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης E , δίνεται από τη σχέση:

$$E_{rms} = 4.44 \cdot k_w \cdot f \cdot N_i \cdot \Phi$$

3. 15

Όπου k_w ο συντελεστής τυλίγματος, f η συχνότητα περιστροφής του πεδίου και Φ η μαγνητική ροή ανά πόλο.

Η φαινόμενη ισχύς της μηχανής δίνεται από τη σχέση:

$$S = 3 \cdot E_{rms} \cdot I_{rms}$$

3. 16

Η μηχανική ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα ορίζεται σαν συνάρτηση της ηλεκτρικής συχνότητας περιστροφής ως εξής:

$$n = \frac{120 \cdot f}{P}$$

3. 17

Από όλες τις προαναφερθείσες σχέσεις προκύπτει η παρακάτω:

$$S = 1.1 \cdot k_w \cdot \pi^2 \cdot B_{av} \cdot ac \cdot D, g^2 \cdot L \cdot n$$

3. 18

μέσω της οποίας αναδεικνύεται πώς η φαινόμενη ισχύς του κινητήρα, είναι ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου του διακένου και ανάλογη του ενεργού του μήκους. Επομένως κατά τη σχεδίαση ενός κινητήρα είναι ιδιαίτερα σημαντικό να βρεθεί ο κατάλληλος συνδυασμός ειδικής ηλεκτρικής φόρτισης, ειδικής μαγνητικής φόρτισης, διαστάσεων διακένου και ενεργού μήκους, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ισχύς στην έξοδο χωρίς αυτό να σημαίνει μείωση απόδοσης, αύξηση βάρους ή κόστους.

3.2.4 Συχνότητα περιστροφής των ρευμάτων

Η συχνότητα περιστροφής των ρευμάτων αποτελεί χαρακτηριστικό μείζονος σημασίας για τον κινητήρα, πρωταρχικά επειδή προσδιορίζει την ταχύτητα περιστροφή του, ή αλλιώς την μηχανική του περιστροφή. Η μηχανική συχνότητα περιστροφής n σε Στροφές Ανά Λεπτό (ΣΑΛ) σε σχέση με την συχνότητα περιστροφής των ρευμάτων f , συμπεριλαμβανομένου του αριθμού των πόλων του κινητήρα είναι:

$$n = 120 \cdot \frac{f}{P}$$

3. 19

Δεδομένης λοιπόν της εξάρτησης της μηχανικής συχνότητας περιστροφής του κινητήρα από τις εν λόγω παραμέτρους, μία συγκεκριμένη τιμή της μπορεί να επιτευχθεί με διαφορετικούς συνδυασμούς πόλων P και ηλεκτρικής συχνότητας f . Ο λόγος πόλων/ηλεκτρικής συχνότητας προκύπτει ως εξής:

$$\frac{P}{f} = \frac{120}{n} = \frac{4 \cdot \pi}{\omega, m}$$

3. 20

Η ως άνω περιοριστική σχέση, δίνει τα δυνατά ζεύγη αριθμού πόλων και συχνότητας πεδίου, για την επίτευξη μηχανικής ταχύτητας n .

Βασιζόμενοι λοιπόν στα παραπάνω, θεωρήσαμε μία επιθυμητή ταχύτητα με βάση την οποία θα συνεχίσουμε την μελέτη μας. Επιλεγθείσα τιμή για την μηχανική ταχύτητα εκφρασμένη σε ττροφές ανά λεπτό (ΣΑΛ) είναι:

$$n = 450 \text{ ΣΑΛ}$$

3. 21

Έτσι από την σχέση 3.20 προκύπτει ο παρακάτω περιοριστικός κανόνας σε σχέση με τον επιλεγέντα αριθμό πόλων:

$$\frac{P}{f} = \frac{120}{450} = 0.2667$$

3. 22

Ταυτόχρονα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η συχνότητα περιστροφής των ρευμάτων καθορίζει με άμεσο τρόπο τη διακύμανση των απωλειών πυρήνα. Συνεπώς η επιλογή μεγάλης συχνότητας μπορεί να αυξήσει με πολυωνυμικό ρυθμό τις απώλειες αυτές, μειώνοντας σημαντικά την απόδοση του κινητήρα. Αυτό επιβάλλει επιλογή επαρκώς μικρής συχνότητας πεδίου και συνεπώς ανάλογη επιλογή αριθμού πόλων. Στηριζόμενοι λοιπόν στην παραπάνω παραδοχή, και με βάση εμπειρικούς κανόνες, η τιμή της συχνότητας που επιλέγεται ως άνω όριο για την λειτουργία του κινητήρα είναι τα 50Hz. Επομένως για τον αριθμό των πόλων ισχύει η παρακάτω περιοριστική σχέση:

$$P \leq 13$$

3. 23

Ωστόσο όπως είναι γνωστό για τον αριθμό των πόλων ισχύει και η κάτωθι σχέση:

$$P = 2 \cdot p$$

3. 24

Συνεπώς η περιοριστική σχέση 3.23 αντιστοιχεί στις παρακάτω πιθανές τιμές πόλων:

Πίνακας 3.1. Επιτρεπτές τιμές αριθμού πόλων.

$P = 2$	$P = 4$	$P = 6$	$P = 8$	$P = 10$	$P = 12$
---------	---------	---------	---------	----------	----------

Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί πώς οι κινητήρες με περισσότερους πόλους, έχουν ελαφρύτερο μαγνητικό κύκλωμα, καθώς η ποσότητα της μαγνητικής ροής που διέρχεται από τον έναν πόλο στον άλλο είναι αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των πόλων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα μέρη του σιδηρομαγνητικού υλικού, δηλαδή τα δόντια, το σώμα του στάτη και το σώμα του δρομέα, να μπορούν να μειωθούν σε μέγεθος, χωρίς να αυξηθούν τα επίπεδα κορεσμού του σιδήρου.

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι για χαμηλή ταχύτητα περιστροφής ο αριθμός των πόλων δύναται να αυξηθεί, διατηρώντας σχετικά μικρή συχνότητα, έτσι ώστε οι απώλειες πυρήνα να είναι σχετικά χαμηλές, συγκρινόμενες με τις απώλειες χαλκού.

Επίσης, μέσω της χρήσης συγκεντρωμένων τυλιγμάτων, η αύξηση του αριθμού των πόλων αναμένεται να ελαττώσει και τις απώλειες χαλκού καθώς αυξάνοντας τους πόλους μειώνεται το πάχος του δοντιού, επομένως μειώνεται τόσο το μήκος των επιμέρους αγωγών, όσο και το μήκος των αγωγών εκτός ενεργού κυκλώματος. Μείωση του μήκους συνεπάγεται μείωση της αντίστασης των αγωγών οδηγώντας σε μείωση των ωμικών απωλειών των τυλιγμάτων. Έτσι λοιπόν, για συγκεκριμένο επίπεδο τάσης, αναμένονται μικρότερες απώλειες χαλκού για μεγαλύτερο αριθμό πόλων.

Με βάση λοιπόν τον τύπο της ειδικής μαγνητικής φόρτισης στην σχέση 3.13 ισχύει:

$$B, \text{αν} = \frac{P \cdot \Phi}{\pi \cdot D, g \cdot L}$$

Και ο αριθμός ελιγμάτων των πηνίων κάθε φάσης, με βάση τον ορισμό της επαγόμενης τάσης προκύπτει:

$$N, i = \frac{E, \text{rms}}{4.44 \cdot f \cdot \frac{P}{2} \cdot \Phi}$$

3. 25

3.2.5 Πυκνότητα Ρεύματος Τυλίγματος

Ιδιαίτερα σημαντικό μέγεθος, για την λειτουργία του κινητήρα είναι η πυκνότητα ρεύματος τυλίγματος. Όπως έχει ήδη προαναφερθεί, κατά τη διαδικασία μελέτης ηλεκτρικών κινητήρων, γίνεται η παραδοχή διατήρησης σταθερής πυκνότητας ρεύματος. Η διατήρηση σταθερής εφαρμοζόμενης πυκνότητας ρεύματος και όχι σταθερού ρεύματος, οφείλεται στην τυπική θεώρηση κατά τη σχεδίαση μηχανών περί εξασφάλισης αξιοπιστίας θερμικής συμπεριφοράς. Τα τυλίγματα της μηχανής είναι άμεσα συνυφασμένα με το μέτρο της πυκνότητας ρεύματος. Η παραπάνω θεώρηση βασίζεται στο γεγονός ότι τόσο στην ονομαστική λειτουργία, όσο και σε κατάσταση υπερφόρτισης, οι θερμικές απώλειες που προκαλούνται, επιφέρουν αύξηση της θερμοκρασίας της μηχανής με κίνδυνο καταστροφής των υλικών (εφόσον ξεπεραστεί το

θερμικό όριο αντοχής τους) ή τον υποβιβασμό της μονωτικής ικανότητας των μονώσεων που χρησιμοποιούνται.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ενεργός τιμή του φασικού ρεύματος που διαρρέει τα τυλίγματα υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{coil} = \frac{J_{max} \cdot ff \cdot S_{slot}}{N}$$

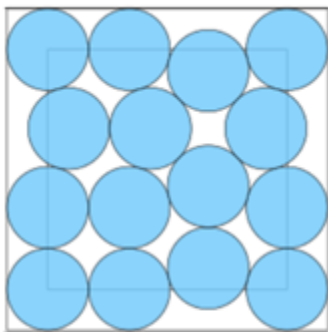
3. 26

Όπου J_{max} η RMS τιμή της πυκνότητας ρεύματος που εφαρμόζεται, ff ο συντελεστής πληρότητας τη αύλακος, S_{slot} το εμβαδόν της εν λόγω αύλακος και N ο αριθμός ελιγμάτων των πηνίων ανά αύλακα.

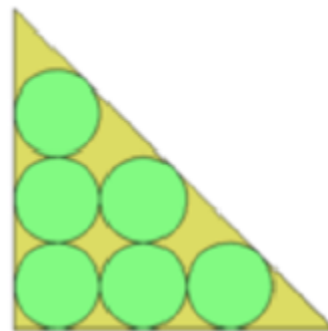
Ταυτόχρονα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η πυκνότητα ρεύματος είναι υπεύθυνη για την σημαντικότερη μορφή απωλειών, τις απώλειες χαλκού. Συνεπώς μεγάλη αύξηση πυκνότητας ρεύματος, θα επέφερε ιδιαίτερα υψηλές απώλειες κινητήρα, αυξάνοντας έτσι το κόστος λειτουργίας.

Για το λόγο αυτό, θεωρείται συνήθως ένα εμπειρικό όριο πυκνότητας ρεύματος της τάξης των $4 A/mm^2$, πάνω από το οποίο εμφανίζεται η ανάγκη εξαναγκασμένης ψύξης, το οποίο για μία εφαρμογή περιορισμένης ισχύος όπως η παρούσα, θα μπορούσε να είναι ένα σύστημα τεχνητού αερισμού.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμη από τον συγγραφέα μία αναφορά στον συντελεστή πληρότητας και το εμβαδόν της αύλακος. Ως συντελεστή πληρότητας ορίζεται το ποσοστό εκφρασμένο με βάση το 1, υπό το οποίο κρίνεται δυνατόν να «πληρείται» ο χώρος εντός της αύλακος από περιελίξεις πηνίων. Όπως είναι κατανοητό, λόγω της συμπαγούς κυλινδρικής γεωμετρίας των καλωδίων χαλκού, τα οποία απαρτίζουν τα πηνία, είναι αδύνατον μία αύλακα να γεμίσει εξολοκλήρου από αυτά, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



**Βέλτιστη διανομή
15 κύκλων σε
τετράγωνο**



**Βέλτιστη διανομή
6 κύκλων σε
τρίγωνο**

Σχήμα 3.2. Γραφική περιγραφή του συντελεστή πληρότητας σε ενδεικτικά σχήματα: α) σε τετράγωνο και β) σε τρίγωνο

Στο σχήμα αυτό, εύκολα φαίνεται η διαφορά της πληρότητας μεταξύ των δύο ενδεικτικών σχημάτων. Για τον λόγο αυτό στην παρούσα εργασία επιχειρείται η επιλογή διαφορετικών σχημάτων δοντιών, με σκοπό την κατά το δυνατόν αύξηση του ρεύματος που διατρέχει κάθε στιγμή την εκάστοτε αύλακα.

3.3 Αρχικοποίηση κυρίων χαρακτηριστικών κινητήρα

Για την διεξαγωγή της παραμετροποιημένης σχεδίασης του ηλεκτρικού κινητήρα, απαραίτητη κρίνεται η αρχικοποίηση των σταθερών ανεξαρτήτων μεταβλητών ή αλλιώς κυρίων χαρακτηριστικών του, και στην συνέχεια η απαρίθμηση των προς μελέτη μεταβλητών δρομέα και στάτη. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται στο σύνολό τους οι κύριες ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης του κινητήρα.

Πίνακας 3.2. Κύρια χαρακτηριστικά σχεδίασης ηλεκτρικού κινητήρα

<i>Κύρια Χαρακτηριστικά Κινητήρα</i>		
<i>Συμβολικό όνομα</i>	<i>Φυσική σημασία</i>	<i>Τιμή</i>
<i>Γενικά χαρακτηριστικά</i>		
m	Αριθμός φάσεων	3
JN_{rms}	Ονομαστική πυκνότητα ρεύματος	4 A/mm ²
-	Βροχοειδές τύλιγμα διπλής στρώσεως	-
L	Ενεργό μήκος	130mm
<i>Σταθερές σχεδίασης στάτη</i>		
Rso	Εξωτερική ακτίνα στάτη	52mm
rfl	Καμπυλότητα Δοντιού-Yoke	$\frac{\pi}{8}$
<i>Σταθερές σχεδίασης δρομέα</i>		
Rri	Ακτίνα άξονα	25mm
Rro	Εσωτερική ακτίνα μαγνήτη	33mm
Hmag	Πάχος μαγνήτη	2mm
Mag_percent	Εύρος Μαγνήτη	75%

3.3.1 Τυλίγματα στάτη

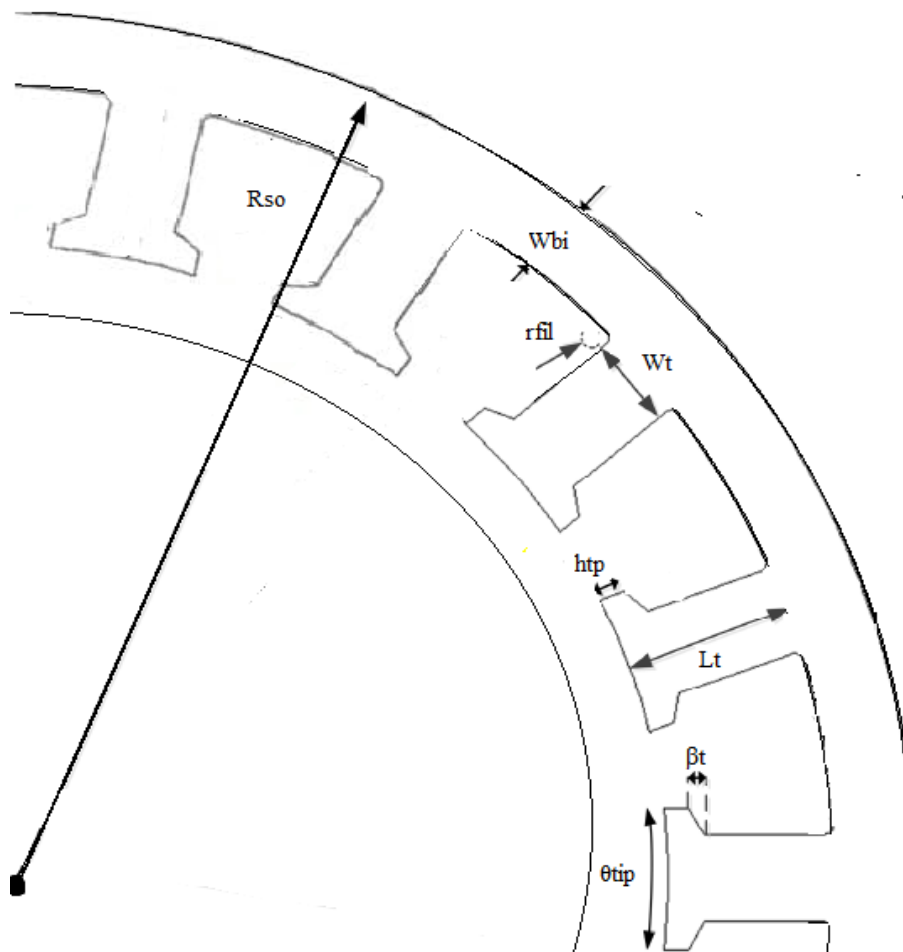
Πριν γίνει σχετική αναφορά στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, σχετική διερεύνηση θα πραγματοποιηθεί στα τυλίγματα των πηνίων του στάτη. Η εν λόγω διερεύνηση πραγματοποιήθηκε με σκοπό να συναχθούν περεταίρω γνώσεις, να αναδειχθούν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και όχι να συγκριθούν μεταξύ τους τα δύο διαφορετικά τυλίγματα, διαδικασία η οποία θα ήτο ανώφελη. Η μελέτη σε ό,τι αφορά τα τυλίγματα των πηνίων στον στάτη θα γίνει μεταξύ των εξής τοπολογιών:

- Κατανεμημένο τύλιγμα διπλής στρώσεως με κλασματικό βήμα 5/6
- Συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των φάσεων

Οι δύο αυτές διαφορετικές διαμορφώσεις τυλιγμάτων στις αύλακες του στάτη, έχουν επεξηγηθεί σαφώς στο κεφάλαιο 2, και συνεπώς κρίνεται σκόπιμο να εφαρμοσθούν στην μελέτη χωρίς περεταίρω επεξήγηση. Δεδομένης της διαδικασίας αντιδιαστολής μεταξύ των χαρακτηριστικών των δύο τύπων τυλιγμάτων, η ανάλυση που θα ακολουθήσει θα πραγματοποιηθεί ξεχωριστά για τις δύο κατηγορίες.

3.3.2 Παραμετρική σχεδίαση στάτη

Η σχεδίαση των κύριων χαρακτηριστικών του στάτη, βασίζεται μόνο στην εξωτερική του διάμετρο. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, θεωρήθηκε κινητήρας σταθερού όγκου, συνεπώς όπως και στον δρομέα, εξωτερική διάμετρος στάτη και ενεργό μήκος θεωρούνται αμετάβλητα. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται σχηματικά τα χαρακτηριστικά του στάτη.



Σχήμα 3.3. Σχηματική αναπαράσταση των χαρακτηριστικών του στάτη.

Στο Σχήμα 3.3, παρουσιάζονται εκτός των κυρών χαρακτηριστικών του στάτη, και οι ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης, οι οποίες θα μελετηθούν στην παρούσα διπλωματική. Οι μεταβλητές αυτές θεωρούνται στον παρακάτω πίνακα ως εξής:

Πίνακας 3.3. Ανεξάρτητες μεταβλητές στάτη

Ανεξάρτητες μεταβλητές στάτη		
Συμβολικό όνομα	Φυσική σημασία	Τιμή
Q	Αριθμός αυλάκων	3 6 9 12 15 18 21 24 30 36 42 48 54 60
Wt	Πλάτος δοντιού	2,25 - 3,75 mm
T_percent	Εύρος Δοντιού	(40%- 99%)
htp	Ύψος Βάσης Δοντιού	0,43 - 2,23
Lt	Ύψος Δοντιού	5,0 - 16,0

Ωστόσο μέρος της παραμετρικής σχεδίασης του στάτη, αποτελούν και οι μεταβλητές οι οποίες εξαρτώνται από τις ανεξάρτητες μεταβλητές μελέτης, και οι οποίες φαίνονται παρακάτω:

Πίνακας 3.4. Εξαρτημένες μεταβλητές στάτη

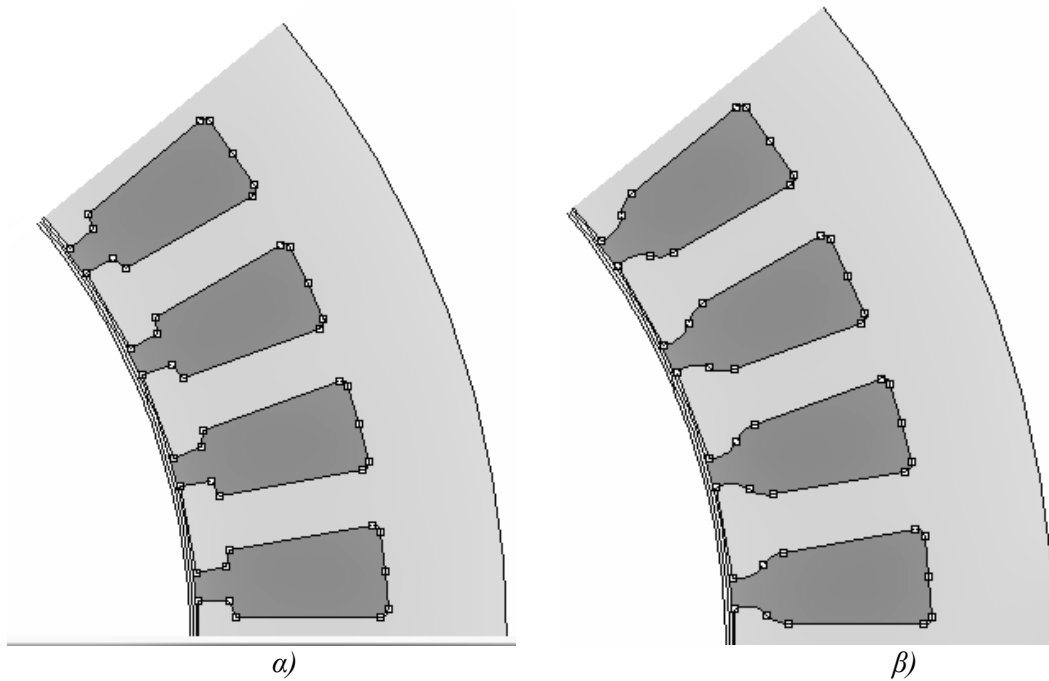
<i>Εξαρτημένες μεταβλητές στάτη</i>		
<i>Συμβολικό όνομα</i>	<i>Φυσική σημασία</i>	<i>Εξάρτηση</i>
Θs	Βήμα Αύλακος	$\frac{2 \cdot \pi}{Q}$
Θtip	Σχετικό εύρος δοντιού	T_percent · Θs
Wbi	Πάχος σώματος στάτη	Rso - Rro - lg - Lt - Hm

Μέρος της διερεύνησης του στάτη αποτελούν τα διαφορετικά σχήματα δοντιών τα οποία εφαρμόστηκαν στον κινητήρα. Οι διαφορές μεταξύ των εν λόγω τύπων δοντιών έγκεινται στο σχήμα βάσεως και στο σχήμα σώματος τους ([4]).

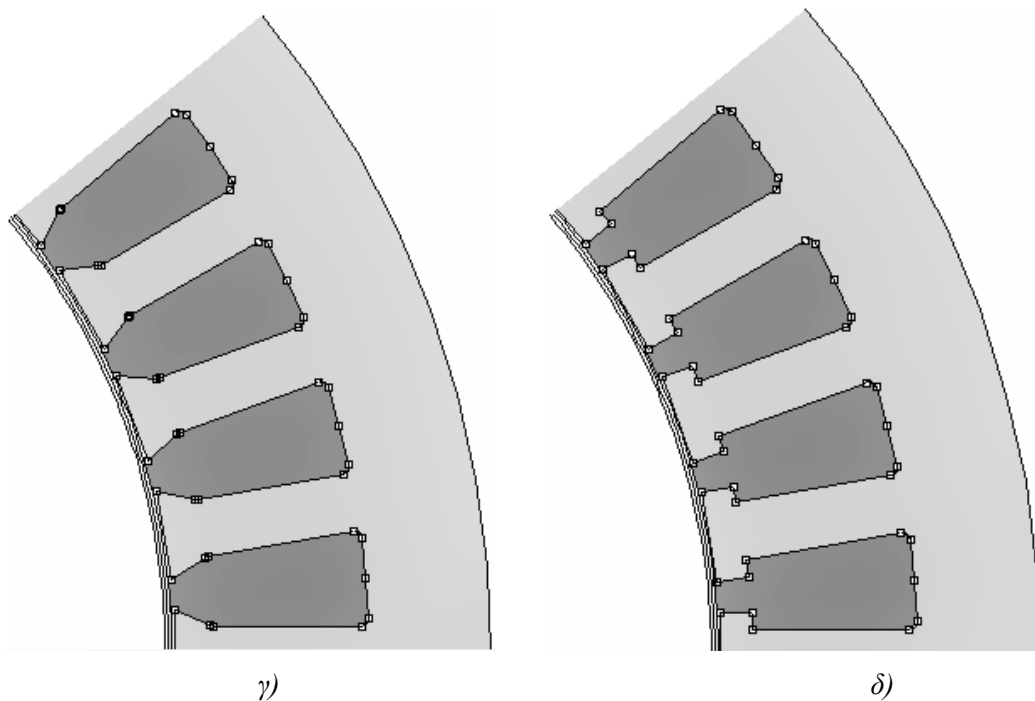
Θεωρήθηκαν οι εξής οκτώ (8) διαμορφώσεις δοντιών:

- α) Δόντι τραπεζίου βάσεως
- β) Δόντι στρογγυλής βάσεως
- γ) Δόντι τριγωνικής βάσεως
- δ) Δόντι ορθογωνίου βάσεως
- ε) Δόντι τραπεζίου βάσεως με καμπυλότητες στο σώμα
- στ) Δόντι στρογγυλής αύλακος
- ζ) Δόντι τραπεζίου σώματος αυξανόμενου πάχους
- η) Δόντι τραπεζίου σώματος μειούμενου πάχους

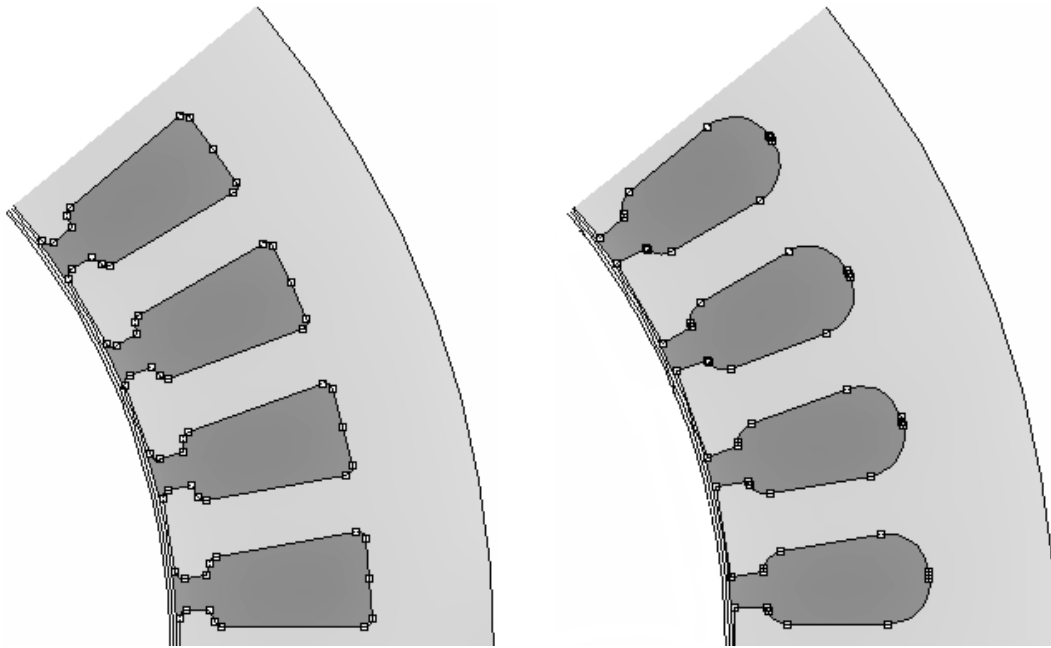
Παρακάτω παρουσιάζονται σχηματικά οι άνωθι διαμορφώσεις δοντιού, όπως αυτές περιγράφηκαν και θεωρήθηκαν από τον συγγραφέα:



Σχήμα 3.4.1. Διαφορετικές διαμορφώσεις δοντιών που θα μελετηθούν: α) τραπεζίου βάσεως, β) στρογγυλής βάσεως



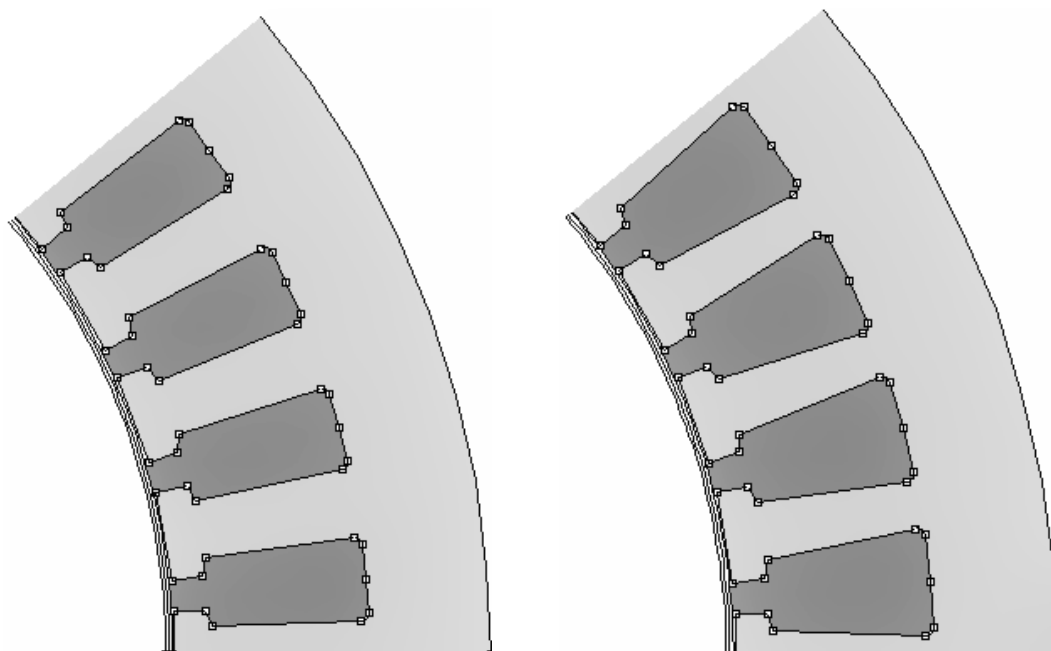
Σχήμα 3.4.2. Διαφορετικές διαμορφώσεις δοντιών που θα μελετηθούν: γ) τριγωνικής βάσεως, δ) ορθογωνίου βάσεως



ε)

στ)

Σχήμα 3.4.3. Διαφορετικές διαμορφώσεις δοντιών που θα μελετηθούν: ε) τραπεζίου βάσεως με καμπυλότητες στο σώμα, στ) στρογγυλής άυλακος



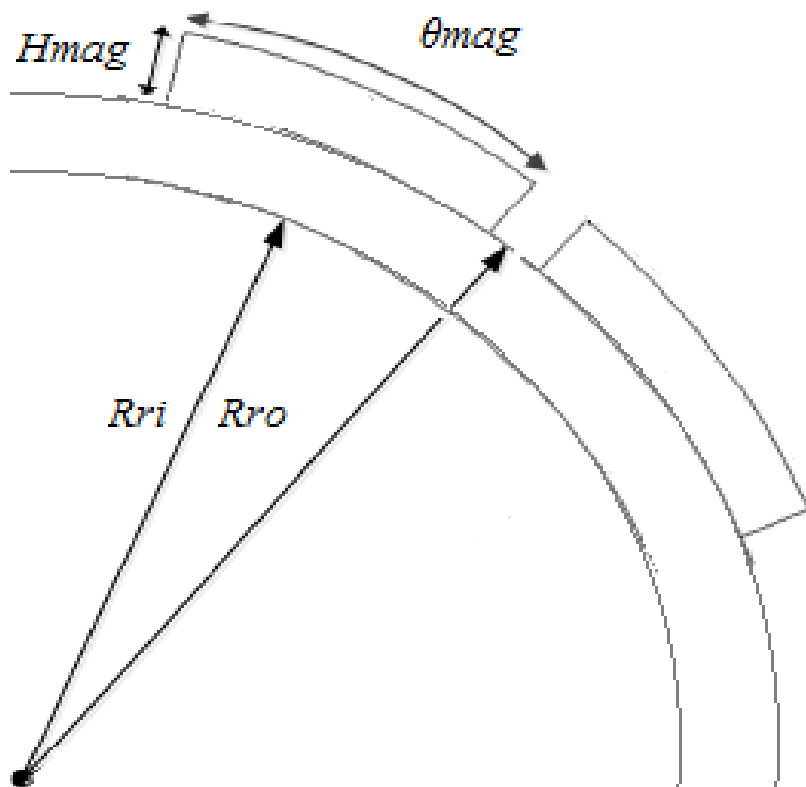
η)

θ)

Σχήμα 3.4.4. Διαφορετικές διαμορφώσεις δοντιών που θα μελετηθούν: η) τραπεζίου σώματος αυξανόμενου πάχους, θ) τραπεζίου σώματος μειούμενου πάχους

3.3.3 Παραμετρική σχεδίαση δρομέα

Η παραμετρική σχεδίαση του δρομέα, γίνεται με βάση τα προαναφερθέντα κύρια χαρακτηριστικά. Θεωρούνται σταθερές διαστάσεις τόσο σε εσωτερική όσο και σε εξωτερική διάμετρο, και σταθερό ενεργό μήκος. Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζονται σχηματικά τα προαναφερθέντα κύρια χαρακτηριστικά δρομέα.



Σχήμα 3.5. Σχηματική αναπαράσταση των κυρίων χαρακτηριστικών του δρομέα και των μαγνητών.

Κατά την παραμετρική σχεδίαση του δρομέα, εκτός των κυρίων χαρακτηριστικών του, ορίζονται και οι εξής ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης:

Πίνακας 3.5. Ανεξάρτητες μεταβλητές δρομέα.

Ανεξάρτητες μεταβλητές δρομέα		
Συμβολικό όνομα	Φυσική σημασία	Τιμή
P	Αριθμός πόλων	2 4 6 8 10 12 14
lg	Πάχος διακένου	0,5 - 0,9mm

Με βάση τις ως άνω ανεξάρτητες μεταβλητές θα γίνει η σχετική διερεύνηση, για διαφορετικούς αριθμούς πόλων και τιμές πάχους διακένου. Όπως και προηγουμένως, μέρος της παραμετρικής σχεδίασης του δρομέα, αποτελούν και οι εξαρτημένες μεταβλητές σχεδίασης. Κατά την σχεδίαση λοιπόν του δρομέα, εκτός των κυρίων χαρακτηριστικών του, και δεδομένης της μελέτης διαφορετικών ζευγών πόλων-αυλάκων, εμφανίζονται ορισμένες εξαρτημένες μεταβλητές σχεδίασης.

Οι μεταβλητές αυτές φαίνονται παρακάτω:

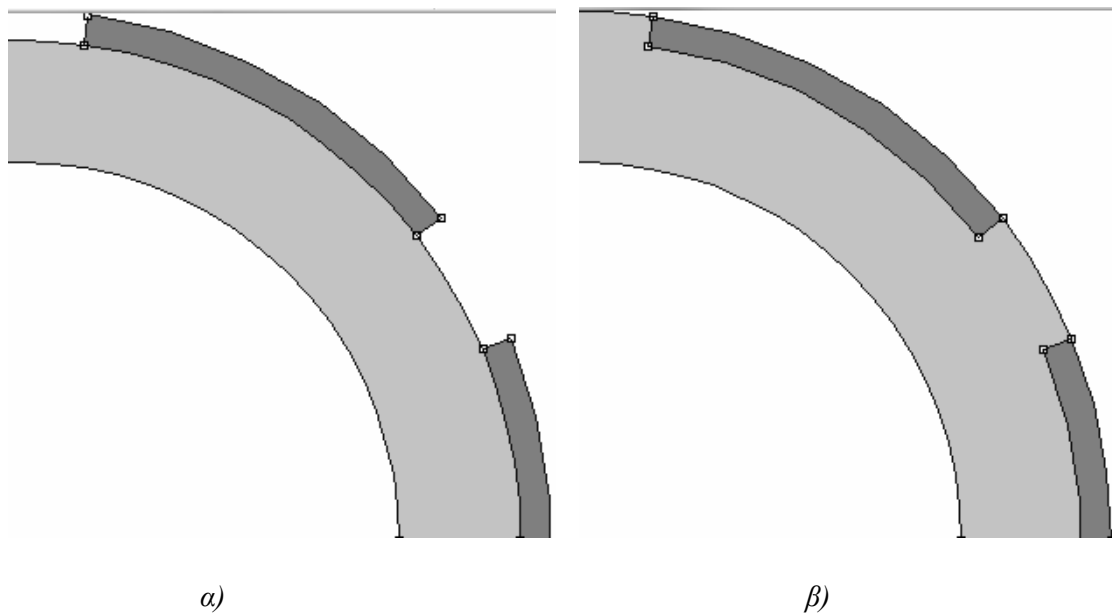
Πίνακας 3.6. Εξαρτημένες μεταβλητές δρομέα.

<i>Εξαρτημένες μεταβλητές δρομέα</i>		
<i>Συμβολικό όνομα</i>	<i>Φυσική σημασία</i>	<i>Εξάρτηση</i>
Θpole	Πολικό βήμα	$\frac{2 \cdot \pi}{P}$
Θmag	Σχετικό εύρος Μαγνήτη	Mag_percent · Θpole

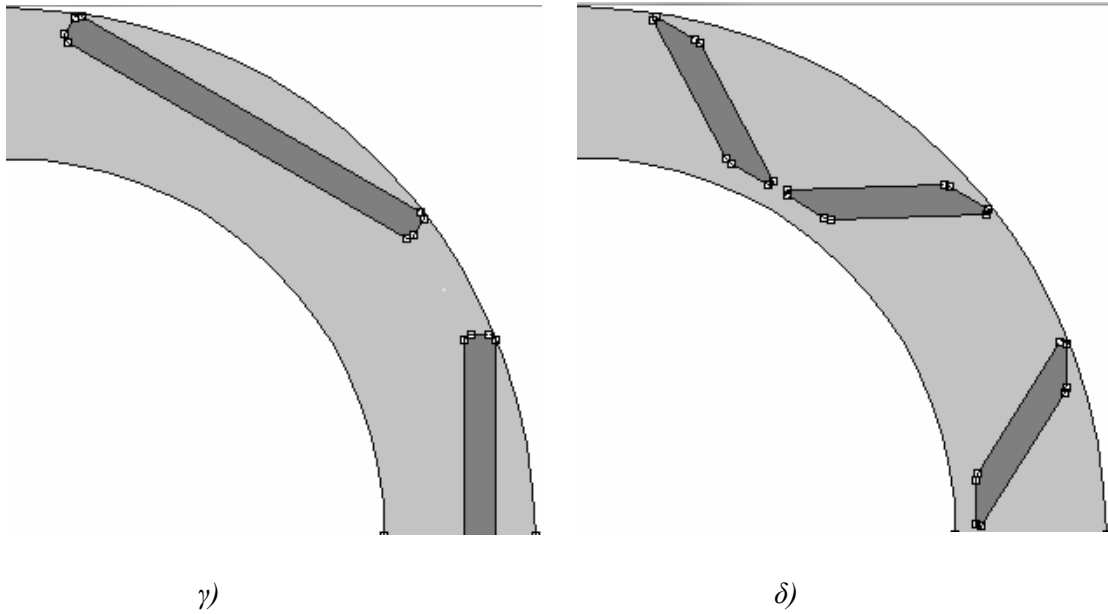
Μέρος την διερεύνησης αποτελούν και οι διαφορετικές τοπολογίες μαγνήτη, οι οποίες εφαρμόζονται στον κινητήρα. Για λόγους εγκυρότητας της συγκριτικής μελέτης, και όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι διαστάσεις των μαγνητών θεωρούνται σταθερές. Συγκεκριμένα θεωρήθηκε σταθερό πάχος μαγνήτη, και σταθερή γωνία εύρους του, σε όλες τις διαφορετικές τοπολογίες.

Θεωρήθηκαν οι παρακάτω διαφορετικές τοπολογίες μαγνητών:

- α) Επιφανειακοί μαγνήτες
- β) Εσωτερικοί μαγνήτες
- γ) Εσωτερικοί ευθύγραμμοι μαγνήτες
- δ) Εσωτερικοί μαγνήτες τύπου V



Σχήμα 3.6.1. Διαφορετικές τοπολογίες μαγνητών που θα μελετηθούν: α) Επιφανειακοί μαγνήτες, β) Εσωτερικοί μαγνήτες



Σχήμα 3.6.2. Διαφορετικές τοπολογίες μαγνητών που θα μελετηθούν: γ) Εσωτερικού ευθύγραμμοι μαγνήτες και δ) Εσωτερικοί μαγνήτες τύπου V.

Αξίζει να αναφερθεί πως στα πλαίσια ανάλυσης μίας διπλωματικής εργασίας, δεν είναι δυνατόν να περιληφθούν όλες οι διαφορετικές τοπολογίες μαγνητών, καθώς ούτε και όλες οι διαφορετικές γεωμετρίες υπό τις οποίες αυτές εμφανίζονται. Συγκεκριμένα σε ότι αφορά την τοπολογία εσωτερικών μονίμων μαγνητών τύπου V, δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί ανάλυση σχετικά με την γωνία τοποθέτησής τους ως προς άξονα x'x του δρομέα, καθώς αυτό θα απαιτούσε μία ξεχωριστή ανάλυση μεγάλου βεληνεκούς. Για τον λόγο αυτό θεωρήθηκε ενδεικτική γεωμετρία της τοπολογίας αυτής με γωνία μαγνητών ως προς τον άξονα x'x ίση με:

$$\theta = \frac{2\pi}{P}$$

με στόχο την κατά το δυνατόν σφαιρική ανάλυση του προβλήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Συγκριτική μελέτη κινητήρων μονίμων μαγνητών και βελτιστοποίηση γεωμετρίας των

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό καταγράφονται τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής σχεδιαστικής μελέτης. Όπως έχει προαναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, η μελέτη εμπεριέχει μία μεγάλη πληθώρα παραμέτρων οι οποίες θα εξετασθούν διεξοδικά. Η διαδικασία βασίζεται στην ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων αυτών, μεταβάλλοντας κάθε φορά μόνο μία μεταβλητή βελτιστοποίησης, και επιλέγοντας το τοπικό βέλτιστο. Η ανάλυση ευαισθησίας καθορίζει το κατά πόσο μεταβάλλονται τα αποτελέσματα του μοντέλου, όταν υπάρξουν αλλαγές στα δεδομένα ή στο ίδιο το μοντέλο.

Η διεξαγωγή της ανάλυσης γίνεται μέσω του λειτουργικού προγραμματιστικού περιβάλλοντος Matlab, στο πρόγραμμα ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης Femm, βασιζόμενο στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

Εν πρώτοις ορίζεται ο τύπος της αντικειμενικής συνάρτησης, μέσω της οποίας γίνεται η «βαθμολόγηση» του εκάστοτε προς μελέτη κινητήρα. Η αντικειμενική συνάρτηση, αποτελεί μια συνάρτηση πολλών μεταβλητών, ανάμεσα στις οποίες είναι όλες οι μεταβλητές ενδιαφέροντος εξόδου του κινητήρα. Η συνάρτηση αυτή ορίζεται με βάση τους στόχους που έχουν τεθεί για την έξοδο του κινητήρα στο Κεφάλαιο 3.

Εν συνεχεία ακολουθεί η διαδικασία βελτιστοποίησης γεωμετρίας, ξεχωριστά για τα δύο είδη τυλιγμάτων στάτη. Από την μελέτη αυτή προκύπτουν δύο διαφορετικές τελικές γεωμετρίες, με διαφορετικά χαρακτηριστικά εξόδου.

4.2 Σχεδιαστική πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση

Ο όρος βελτιστοποίηση αναφέρεται στην αναζήτηση βέλτιστων παραμέτρων ενός - συνήθως περίπλοκου - συστήματος. Στην θεωρία η βελτιστοποίηση διατυπώνεται σαν πρόβλημα ελαχιστοποίησης ή μεγιστοποίησης μιας συνάρτησης μίας μεταβλητής ή πολλών μεταβλητών. Ενώ στην ελαχιστοποίηση (ή μεγιστοποίηση) συναρτήσεων μίας μεταβλητής μπορούν να χρησιμοποιηθούν αναλυτικές και αλγεβρικές μέθοδοι για τον ακριβή ορισμό ελάχιστων (ή μέγιστων), στη μελέτη συναρτήσεων πολλών μεταβλητών χρησιμοποιούνται κυρίως αριθμητικές μέθοδοι για έναν προσεγγιστικό ορισμό ελάχιστων (ή μέγιστων) σημείων. Στην πράξη, σε ότι αφορά την βελτιστοποίηση σχεδίασης ηλεκτρικών κινητήρων, είναι πολύ δύσκολο να αναπτυχθούν αναλυτικές μέθοδοι οι οποίες να οδηγούν σε ένα σαφές και απόλυτο αποτέλεσμα. Για το λόγο αυτό γίνεται σχεδιαστική προσέγγιση του προβλήματος, μέσω προσομοιώσεων, στα αποτελέσματα των οποίων γίνεται αναλυτική μελέτη η οποία μπορεί να οδηγήσει σε ένα όχι απόλυτο, αλλά σαφές και πλήρως τεκμηριωμένο τοπικό βέλτιστο.

Στην βελτιστοποίηση γεωμετρίας και διαμόρφωσης ηλεκτρικών κινητήρων, η μελέτη γίνεται με βάση τα πρωτεύοντα μεγέθη εξόδου του κινητήρα (επίδοση ροπής T_e και απόδοση ισχύος P_{out}), αλλά και δευτερεύοντα μεγέθη που συσχετίζονται με τα πρώτα (ταλαντώσεις ροπής, αρμονική παραμόρφωση αντί-HEΔ THD και απώλειες ισχύος P_{loss}).

Από τα παραπάνω προκύπτει πώς η συγκριτική μελέτη μεταξύ διαφορετικών ηλεκτρικών κινητήρων, αποτελεί πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Για τον λόγο αυτό θεωρήθηκε πολυκριτηριακή αντικειμενική συνάρτηση ή αλλιώς αντικειμενικός σκοπός, με βάση την οποία αναδεικνύεται η «καταλληλότητα» ή μη του εκάστοτε κινητήρα. Η εν λόγω αντικειμενική συνάρτηση κατασκευάζεται με βάση τους στόχους που έχουν τεθεί από τον σχεδιαστή σε ότι αφορά τα μεγέθη εξόδου ως εξής:

$$f, objective = [W, T \quad W, P_{losses} \quad W, THD, flunct.] \cdot \left[\begin{array}{c} \frac{T, i}{T, target} \\ \frac{P_{losses, target}}{P_{losses, i}} \\ \frac{THD, target}{THD, i} + \frac{flunct, target}{flunct, i} \end{array} \right]$$

4. 1

Στην παραπάνω αντικειμενική συνάρτηση, έχουν ορισθεί ορισμένα βάρη (W), τα οποία αναδεικνύουν τη σημαντικότητα κάθε κριτηρίου στην τελική αξιολόγηση, με βάση ποσοστό επί τοις εκατό (%). Συγκεκριμένα έχουν θεωρηθεί:

Πίνακας 4.1. Βάρη αντικειμενικής συνάρτησης

Βάρος ροπής	$W, T = 54,4 \%$
Βάρος Απωλειών ισχύος	$W, P_{losses} = 25\%$
Βάρος Αρμονικής παραμόρφωσης και ταλαντώσεων ροπής	$W, THD, flunct = 20,6 \%$

Αντιστοίχως όπως φαίνεται στην σχέση 4.1 έχουν οριστεί και τα μεγέθη «στόχοι», τα οποία επιθυμείται να προσεγγιστούν. Σε ότι αφορά αυτά τα μεγέθη λοιπόν έχει θεωρηθεί:

Πίνακας 4.2. Επιθυμητά αποτελέσματα-στόχοι

Επιθυμητή τιμή ροπής	$T_{target} = 10 \text{ Nm}$
Επιθυμητή τιμή απωλειών ισχύος	$P_{losses,target} = 20 \text{ W}$
Επιθυμητή τιμή αρμονικής παραμόρφωσης	$THD_{target} = 20\%$
Επιθυμητή τιμή ταλαντώσεων ροπής	$f_{unc,t,target} = 5\%$

4.2.1 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με καταναμημένα τυλίγματα κλασματικού βήματος

Στο πρώτο μέρος της μελέτης, γίνεται ανάλυση ηλεκτρικών κινητήρων καταναμημένου τυλίγματος διπλής στρώσεως. Μεταξύ των δύο στρώσεων των τυλιγμάτων θεωρείται κλασματικό βήμα 5/6.

4.2.1.1 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου ζευγών πόλων-αυλάκων

Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 3, ο προς μελέτη αριθμός πόλων ενέχει ορισμένους περιορισμούς, βάσει της σχέσης 3.22, που περιγράφει την εξάρτησή αυτών, συναρτήσεως της μηχανικής ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα και της συχνότητας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Στηριζόμενοι στην παραπάνω παραδοχή λόγω επιπλέον περιορισμού σε ότι αφορά την ηλεκτρική συχνότητα f , προκύπτει το εξής πεδίο ορισμού του αριθμού των πόλων:

$$P \leq 13$$

Ωστόσο όπως είναι γνωστό για τον αριθμό των πόλων ισχύει η κάτωθι σχέση:

$$P = 2 \cdot p$$

Συνεπώς η περιοριστική σχέση 3.23 αντιστοιχεί στις παρακάτω πιθανές τιμές πόλων:

Πίνακας 4.3. Επιτρεπτές τιμές αριθμού πόλων.

$P = 2$	$P = 4$	$P = 6$	$P = 8$	$P = 10$	$P = 12$	$P = 14$
---------	---------	---------	---------	----------	----------	----------

Για τους σκοπούς της εργασίας αυτής επιλέχθηκε να μελετηθεί και ο πρώτος αριθμός πόλων που δεν ικανοποιεί την παραπάνω περιοριστική σχέση, με σκοπό να αναδειχθεί η σημασία του περιορισμού. Έτσι στον Πίνακα 4.3, φαίνεται εκτός των επιτρεπτών τιμών που ικανοποιούν τον περιορισμό 3.23, και η τιμή $P=14$.

Κατά αντιστοιχία του αριθμού των πόλων, θεωρήθηκε ο αριθμός των αυλάκων. Μετά από μελέτη διαφαίνεται πώς ένας πολύ μεγάλος αριθμός αυλάκων μειώνει σημαντικά την επίδοση και απόδοση του κινητήρα, ενώ αυξάνει εκθετικά τον προγραμματιστικό χρόνο που απαιτείται για την ανάλυσή του και την πολυπλοκότητα κατασκευής του. Το παραπάνω συμπέρασμα αναδεικνύεται στην συνέχεια. Σημαντικό να αναφερθεί είναι πώς για το λόγο αυτό, παράλληλα με την αύξηση του αριθμού των πόλων, μειώνονται τα αντίστοιχα ζεύγη με αριθμό αυλάκων. Ως άνω όριο αριθμού αυλάκων για την μελέτη λοιπόν αυτή προέκυψε εμπειρικά και μετά από παρατηρήσεις η τιμή $Q=72$.

Έτσι τα 28 ζεύγη πόλων-αυλάκων που θεωρήθηκαν στην μελέτη είναι τα εξής:

Πίνακας 4.4. Επιλεγέντα προς μελέτη ζεύγη πόλων-αυλάκων.

<i>P</i>	<i>Q</i>
2	6
2	12
2	18
2	24
2	30
2	36
2	42
2	48
2	54
2	60

<i>P</i>	<i>Q</i>
4	12
4	24
4	36
4	48
4	60
4	72

<i>P</i>	<i>Q</i>
6	18
6	36
6	54
6	72

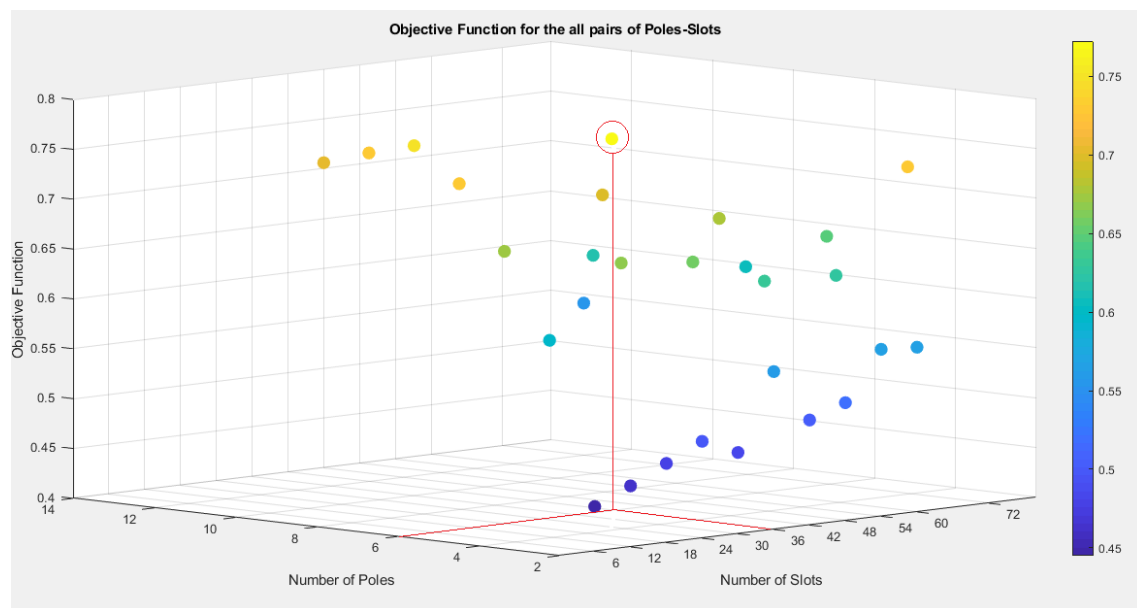
<i>P</i>	<i>Q</i>
10	30
10	60

<i>P</i>	<i>Q</i>
12	36
12	72

<i>P</i>	<i>Q</i>
8	24
8	48
8	72

<i>P</i>	<i>Q</i>
14	42

Παρακάτω φαίνεται ένα τρισδιάστατο διάγραμμα, όπου στον άξονα x'x αντιστοιχεί ο αριθμός των πόλων, στον άξονα y'y αντιστοιχεί ο αριθμός των αυλάκων και στον άξονα z'z παρουσιάζονται οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης, όπως αυτή ορίστηκε παραπάνω και προέκυψε από την σχεδιαστική μέθοδο.



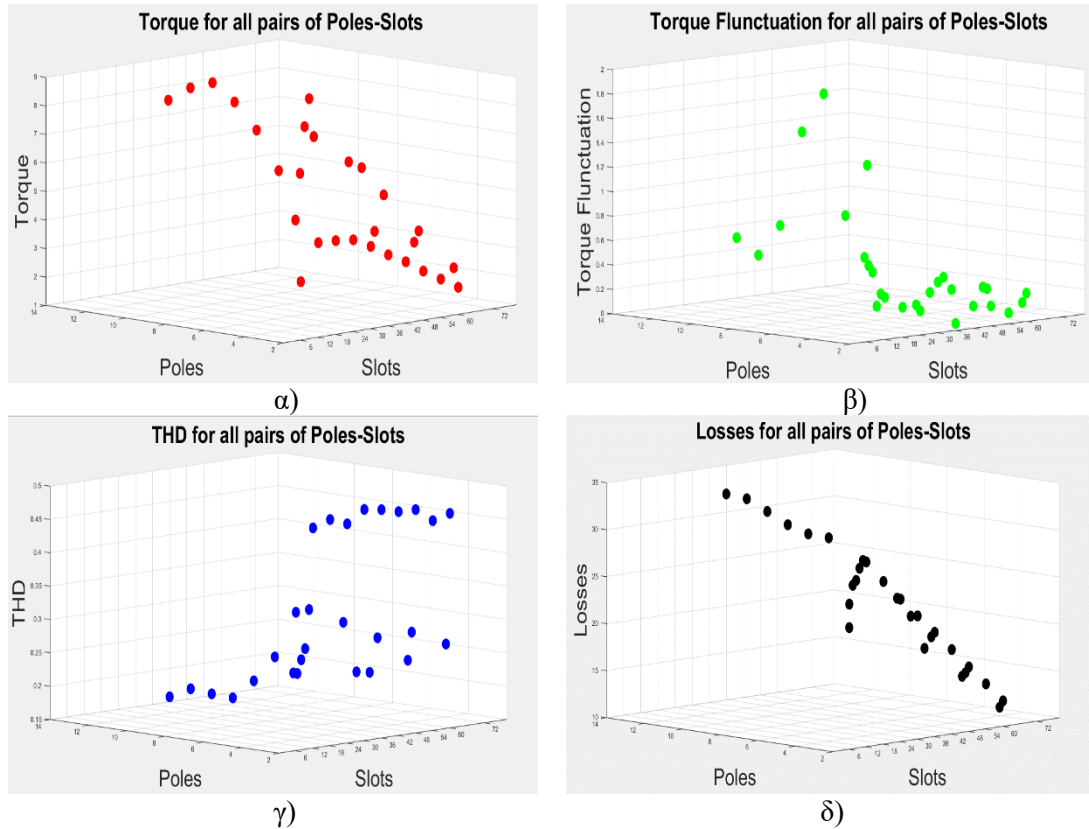
Σχήμα 4.1. Διάγραμμα αναπαράστασης της μεταβολής της αντικειμενικής συνάρτησης, για διαφορετικά ζεύγη πόλων-αυλάκων.

Όπως φαίνεται από το γράφημα, ολικό μέγιστο των θεωρηθέντων ζευγών πόλων-αυλάκων είναι το ζεύγος :

$$P = 6, Q = 36$$

4. 2

Εντούτοις, δεδομένου ότι η διαμόρφωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης εξαρτάται από βάρη που έχουν θεωρηθεί από τον συγγραφέα, κρίνεται σκόπιμο να παρατεθούν τα γραφήματα που περιγράφουν ξεχωριστά την ροπή, την διακύμανση της ροπής, την αρμονική παραμόρφωση και τις απώλειες ισχύος. Τα γραφήματα αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.2:



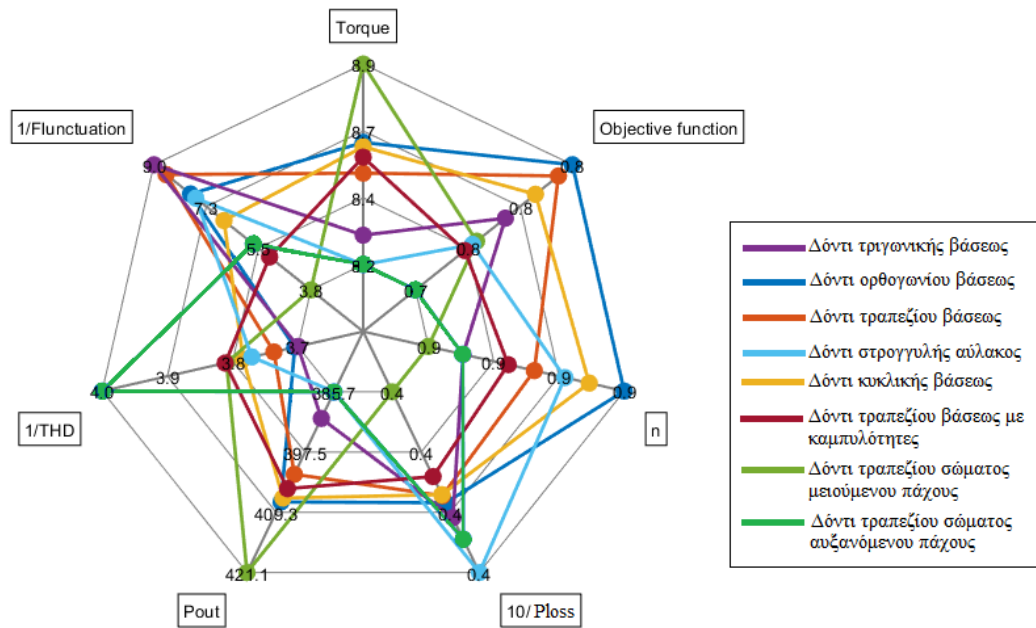
Σχήμα 4.2. Διαγράμματα αναπαράστασης της μεταβολής α) της ροπής, β) της διακύμανσης της ροπής, γ) της αρμονικής παραμόρφωσης και δ) των απωλειών ισχύος για διαφορετικά ζεύγη πόλων-αυλάκων.

4.2.1.2 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου διαμορφώσεων δοντιού

Θεωρήθηκαν οκτώ (8) διαφορετικές διαμορφώσεις δοντιών. Για την ορθή αναπαράσταση των αποτελεσμάτων των κινητήρων με διαφορετικές διαμορφώσεις δοντιών, έγινε χρήση της τεχνικής Taguchi. Στην τεχνική αυτή αναπαράστασης μεγεθών, σχεδιάζεται ένα πολύγωνο, με τόσες γωνίες όσες οι προς μελέτη παράμετροι εξόδου. Σε κάθε ακτίνα του πολυγώνου τοποθετούνται αναλογικά οι τιμές των διαφορετικών παραμέτρων, έτσι ώστε να αναδεικνύονται σε ένα διάγραμμα, όλα τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε κινητήρα, με το βέλτιστο της κάθε παραμέτρου να τοποθετείται στην αντίστοιχη γωνία του πολυγώνου, και το χειρίστο κοντινότερα στο κέντρο του. Εν προκειμένω για την αναπαράσταση όλων των παραμέτρων εξόδου, απαιτήθηκε η σχεδίαση ενός επταγώνου, στις ακτίνες του οποίου τοποθετήθηκαν τα εξής χαρακτηριστικά κινητήρα:

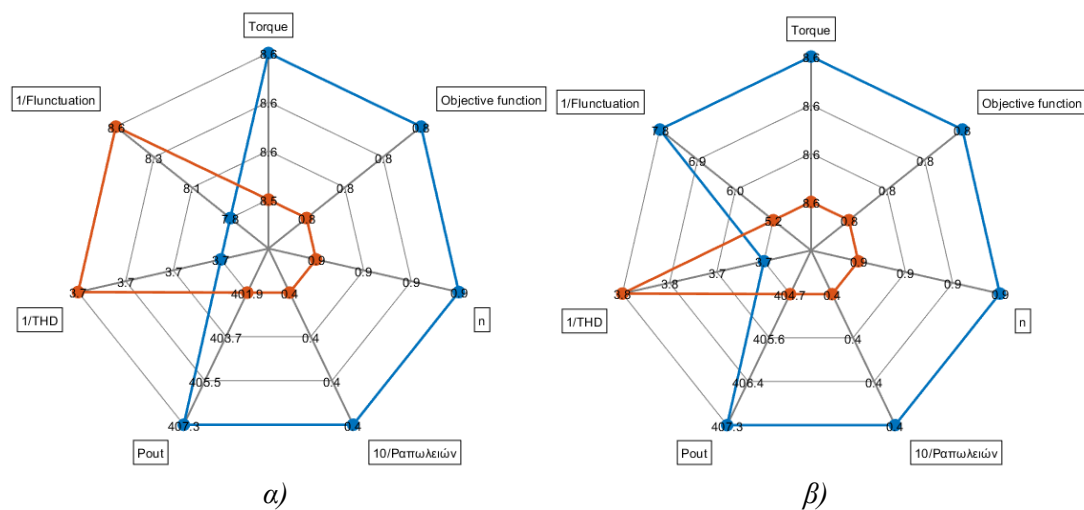
- Ροπή (T)
- Ο λόγος $\frac{1}{\text{Ταλαντώσεις ροπής (Flunct.)}}$
- Ο λόγος $\frac{1}{\text{Αρμονική παραμόρφωση (THD)}}$
- Η ισχύς εξόδου (P_{out})
- Ο λόγος $\frac{1}{\text{Απωλειες ισχύος (Ploss)}}$
- Η απόδοση (η)
- Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (Objective function)

Παρακάτω φαίνεται η χρήση της τεχνικής Taguchi για τις οκτώ, διαφορετικές διαμορφώσεις δοντιών, όπως αυτές περιγράφονται στο Σχήμα 3.4 του Κεφαλαίου 3.

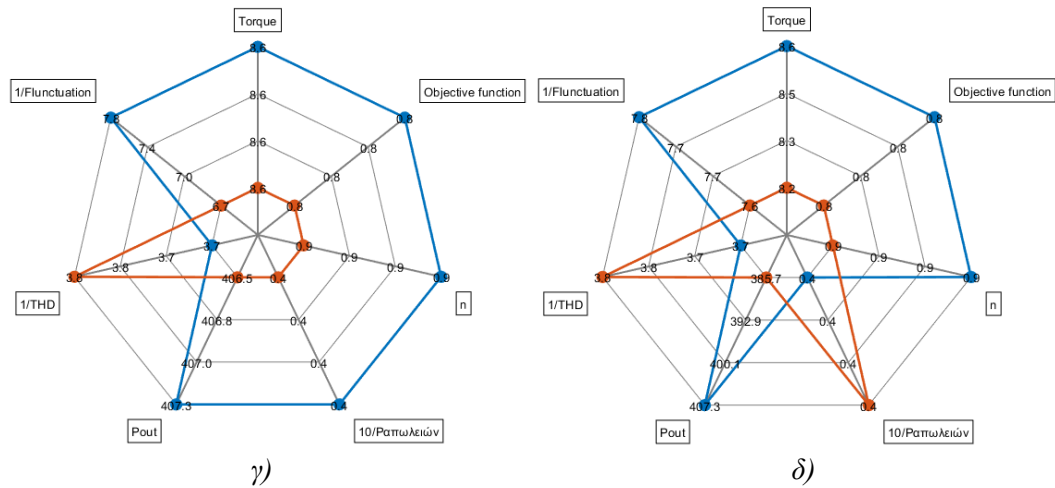


Σχήμα 4.3. Γραφική αναπαράσταση των χαρακτηριστικών κινητήρων με διαφορετικές διαμορφώσεις δοντιών.

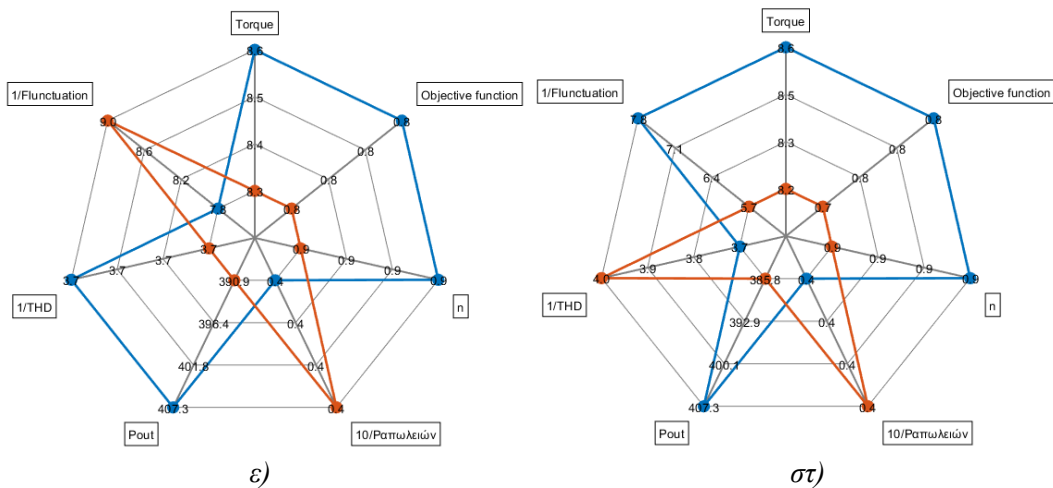
Από το παραπάνω γράφημα, διαφαίνεται πώς τα σημεία κυρίαρχου ενδιαφέροντος (ροπή, ταλαντώσεις ροπής, ισχύς εξόδου, απώλειες ισχύος και αρμονική παραμόρφωση) οδηγούν στην επιλογή της διαμορφώσεως δοντιού ορθογωνίου βάσεως. Αυτό άλλωστε φαίνεται και από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της εν λόγω διαμόρφωσης, η οποία είναι μεγαλύτερη από αυτές των υπολοίπων διαμορφώσεων. Ωστόσο λόγω της έντονης πυκνότητας του παραπάνω γραφήματος, δεδομένου του μεγάλου αριθμού συγκρινόμενων διαμορφώσεων, κρίθηκε σκόπιμη η συγκριτική αναπαράσταση καθεμίας εκ των υπολοίπων διαμορφώσεων με την επιλεχθείσα. Για την ευκρίνεια των συγκρινόμενων γραφημάτων επιλέχθηκε σταθερό μπλέ χρώμα για την επιλεχθείσα διαμόρφωση, και πορτοκαλί για όλες τις υπόλοιπες.



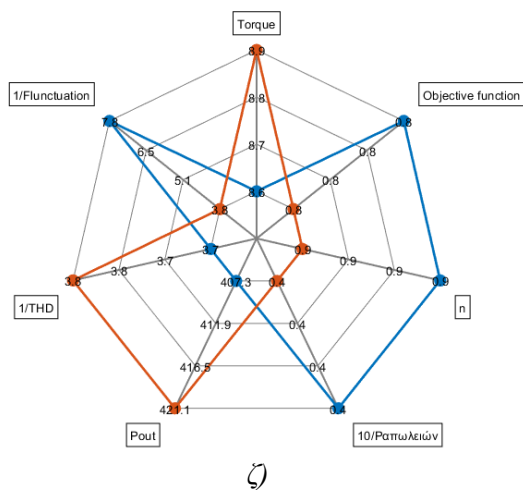
Σχήμα 4.4.1. Συγκριτική παρουσίαση μεταξύ της επιλεχθείσας και των διαμορφώσεων: α) τραπέζιου βάσεως, β) τραπέζιου βάσεως με καμπυλότητες



Σχήμα 4.4.2. Συγκριτική παρουσίαση μεταξύ της επιλεχθείσας και των διαμορφώσεων: γ) κυκλικής βάσεως, δ) στρογγυλής άβλακος



Σχήμα 4.4.3. Συγκριτική παρουσίαση μεταξύ της επιλεχθείσας και των διαμορφώσεων: ε) τριγωνικής βάσεως, στ) τραπεζίου σώματος αυξανόμενου πάχους



Σχήμα 4.4.4. Συγκριτική παρουσίαση μεταξύ της επιλεχθείσας και της διαμόρφωσης: ζ) τραπεζίου σώματος μειούμενου πάχους.

Από τα παραπάνω γραφήματα, εκτός της επιλογής βέλτιστου με βάση τους στόχους της μελέτης, μπορούν να αναδειχθούν τα εξής συμπεράσματα για κινητήρα κατανεμημένου τυλίγματος:

1. Οι διαμορφώσεις ορθογωνίου και κυκλικής βάσεως εμφανίζουν συνδυαστικά υψηλότερες τιμές ροπής και απόδοσης.
2. Οι διαμορφώσεις δοντιού τριγωνικής και τραπεζοειδούς βάσεως επιφέρουν μείωση στις ταλαντώσεις της ροπής.
3. Οι διαμορφώσεις τραπεζοειδούς βάσεως με καμπυλότητες, τραπεζίου σώματος αυξανόμενου πάχους και κυκλικής βάσεως, επιφέρουν μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης.
4. Οι διαμορφώσεις στρογγυλής αύλακος, τραπεζίου σώματος αυξανόμενου πάχους και τριγωνικής βάσεως επιφέρουν μικρότερες τιμές απωλειών.

4.2.1.3 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου ποσοστού εύρους δοντιού ως προς το βήμα αύλακος (T percent)

Όπως έχει προαναφερθεί στην μελέτη εμπεριέχεται η ανάλυση μεταβλητών που αφορούν τα ποσοτικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του στάτη. Η μεταβλητή T percent, εκφράζει το ποσοστό του εύρους δοντιού, ως προς το βήμα αύλακος. Έτσι διαμορφώνεται το εύρος δοντιού θ_{tip} , όπως αυτό φαίνεται στο Σχήμα 3.3. του Κεφαλαίου 3 υπό την ακόλουθη σχέση:

$$\theta_{tip} = (T \text{ percent}) \cdot \theta_s$$

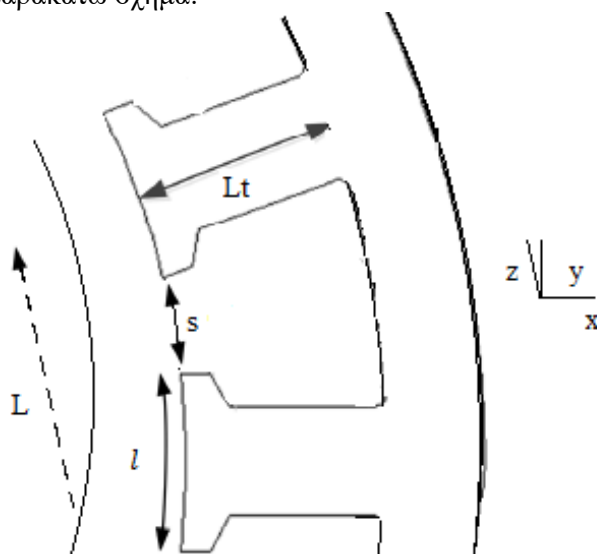
4. 3

Όπου:

$$\theta_s = \frac{2 \cdot \pi}{Q}$$

4. 4

Η παράμετρος αυτή επηρεάζει άμεσα την απόσταση μεταξύ των βάσεων των δοντιών « s », όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.5. Σχηματική αναπαράσταση της απόστασης μεταξύ των βάσεων δύο διαδοχικών δοντιών

Βάσει αναλυτικών μεθόδων, αποδεικνύεται ότι η μεταβολή της μαγνητικής ενέργειας που οφείλεται σε μία αύλακα μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\Delta w, m0s = \frac{l^2 L}{4 \cdot \pi \cdot \mu_0} \cdot \left[\left(1 + \frac{s}{l}\right) \cdot \log \left(1 + \frac{s}{l}\right) + \left(1 - \frac{s}{l}\right) \cdot \log \left(1 - \frac{s}{l}\right) \right] \cdot \frac{B^2}{2}$$

4. 5

όπου l το πλάτος βάσεως δοντιού (το οποίο αντιστοιχεί σε θ_{tip}), s η απόσταση μεταξύ των βάσεων δύο διαδοχικών δοντιών και L το ενεργό μήκος του κινητήρα.

Για κινητήρες με μικρά έως μέτρια ανοίγματα εγκοπών, με λόγο s/l έως 0,2, παίρνουμε την ακόλουθη κατά προσέγγιση έκφραση για w_{m0s} :

$$\Delta w, m0s = \frac{s^2 \cdot L}{4 \cdot \pi \cdot \mu_0} \cdot B^2$$

4. 6

Στο σημείο αυτό είναι σημαντική η εισαγωγή ενός νέου μεγέθους, της ροπής Cogging. Πρόκειται για μία παρασιτική ροπή η οποία μπορεί να επηρεάσει δραστικά την ακρίβεια ελέγχου ταχύτητας και θέσης των σύγχρονων κινητήρων μόνιμου μαγνήτη. Ως εκ τούτου, αξίζει να εισαχθεί η ελαχιστοποίηση αυτού του είδους ροπής ως ένα από τα κριτήρια βελτιστοποίησης στη διαδικασία σχεδιασμού αυτών των κινητήρων. Η ροπή Cogging παράγεται από το άθροισμα της μεταβολής της μαγνητικής ενέργειας όλων των υποδοχών. Η συμβολή μιας σχισμής στη ροπή Cogging λαμβάνεται με βάση τις τιμές w_{m0s} της μαγνητικής ενέργειας, όπως αυτή υπολογίστηκε στον τύπο 4.6 :

$$C_{cog, slot} = \frac{-\delta w, m0s(\theta)}{\delta \theta}$$

4. 7

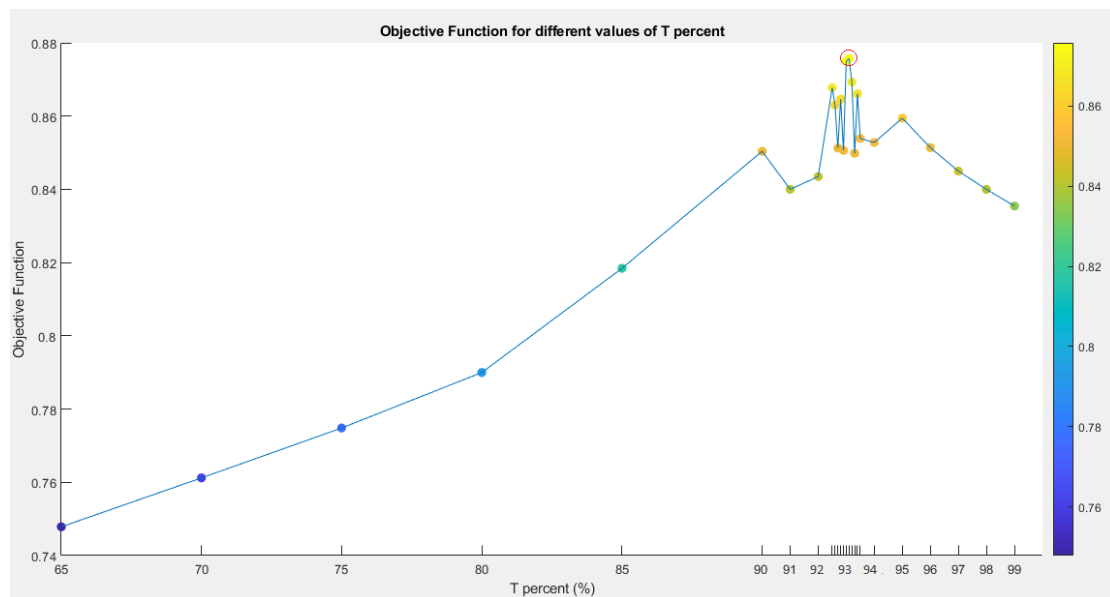
Από τα προηγούμενα προκύπτει πως η μείωση της παρασιτικής αυτής ροπής, μπορεί να πραγματοποιηθεί με μείωση της απόστασης μεταξύ των βάσεων δύο διαδοχικών δοντιών s ([11]).

Κατά την μελέτη ευαισθησίας της εν λόγω παραμέτρου το βήμα ανάλυσης μειώθηκε σημαντικά στην περιοχή μεγιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης, με σκοπό την πληρέστερη πληροφόρηση σχετικά με το τοπικό μέγιστο. Συγκεκριμένα όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.5, αρχικά το βήμα ανάλυσης της παραμέτρου θεωρήθηκε 5%. Στην συνέχεια στο σημείο εύρεσης τοπικού μεγίστου των τιμών αυτών, το βήμα μειώθηκε στο 1%, ενώ τέλος για την επαρκή προσέγγιση του ολικού μεγίστου, το βήμα ανάλυσης τέθηκε ίσο με 0.1%. Οι τιμές ποσοστού εύρους δοντιού ως προς το βήμα αύλακος ανάμεσα στις οποίες πραγματοποιήθηκε η μελέτη είναι οι εξής:

Πίνακας 4.5. Τιμές μελέτης ποσοστού εύρους δοντιού ως προς το βήμα αύλακος (T percent).

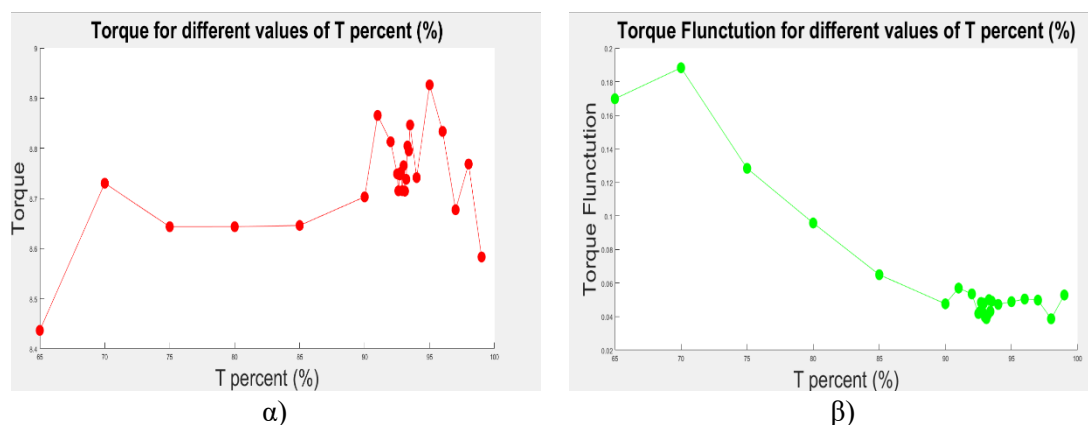
T percent (%)											
65.0		70.0		75.0		80.0		85.0			
90.0		91.0		92.0							
92.5	92.6	92.7	92.8	92.9	93.0	93.1	93.2	93.3	93.4	93.5	
94.0		95.0		96.0		97.0		98.0		99.0	

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, για τις τιμές του ποσοστού εύρους δοντιού που αναφέρθηκαν παραπάνω:

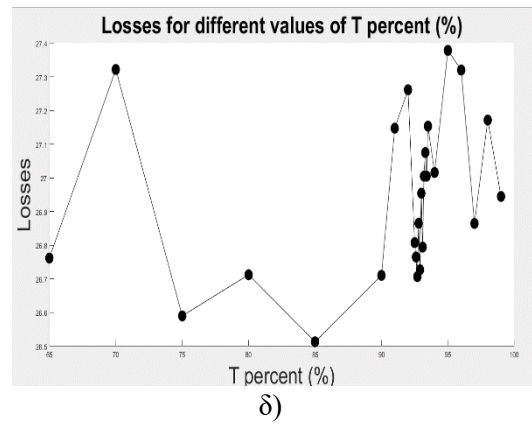
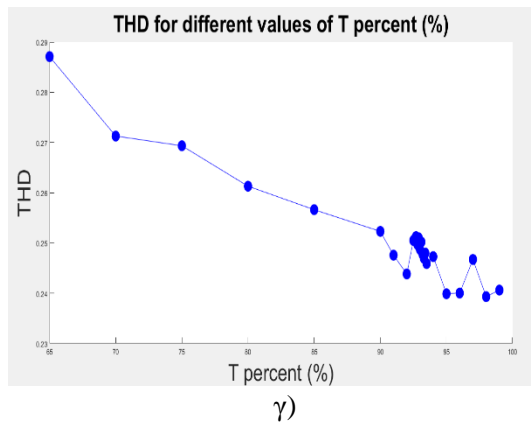


Σχήμα 4.6. Γραφική αναπαράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης για μεταβολή του ποσοστού εύρους δοντιού ως προς το βήμα αύλακος.

Τα γραφήματα που περιγράφουν ξεχωριστά την ροπή, την διακύμανση της ροπής, την αρμονική παραμόρφωση και τις απώλειες ισχύος φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 4.7.1. Γραφική αναπαράσταση α) της ροπής και β) της διακύμανσης της ροπής για μεταβολή του ποσοστού εύρους δοντιού ως προς το βήμα αύλακος.



Σχήμα 4.7.2. Γραφική αναπαράσταση γ) της αρμονικής παραμόρφωσης και δ) των απωλειών ισχύος για μεταβολή του ποσοστού εύρους δοντιού ως προς το βήμα αύλακος.

Η προαναφερθείσα διαδικασία ανάλυσης, με ακρίβεια τριών δεκαδικών ψηφίων, προσφέρει μια αρκετά πλήρη εικόνα του ολικού μεγίστου της αντικειμενικής συνάρτησης για μεταβολή της παραμέτρου ποσοστού εύρους δοντιού ως προς το βήμα αύλακος (T percent). Η τελική επιλεγείσα τιμή όπως αυτή προέκυψε από την προηγούμενη σχεδιαστική μελέτη είναι:

$$T \text{ percent} = 93.1\%$$

4. 8

Η μελέτη θα συνεχιστεί θεωρώντας πλέον σταθερή αυτή την τιμή για το ποσοστό εύρους δοντιού ως προς το βήμα αύλακος.

4.2.1.4 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου πλάτους δοντιού (Wt)

Το πλάτος δοντιού αποτελεί σημαντικότερη παράμετρο σε ότι αφορά τα σημεία ενδιαφέροντος του κινητήρα, καθώς επηρεάζει άμεσα το εμβαδόν της αύλακος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.3 του Κεφαλαίου 3. Για αυξημένο εμβαδόν αύλακος, και δεδομένης της θεώρησης σταθερής πυκνότητας ρεύματος, η ένταση ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει κάθε αύλακα αυξάνεται. Εύκολα λοιπόν φαίνεται ότι η επιλογή μιας επαρκώς μικρής τιμής πλάτους δοντιού θα προσδώσει αυξημένες δυνατότητες ροπής στον κινητήρα, και συνεπώς αυξημένη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης. Ωστόσο, όπως θα φανεί και από την ακόλουθη ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου, σημαντική μείωση του πλάτους δοντιού, μπορεί να επιφέρει αποτελέσματα αντίθετα των αναμενομένων. Συγκεκριμένα η επιλογή σημαντικά μικρού πλάτους δοντιού, είχε καταστροφικές συνέπειες στις ταλαντώσεις ροπής τις οποίες αύξησε δραματικά, στην αρμονική παραμόρφωση, αλλά και στις απώλειες ισχύος του κινητήρα, κυρίως λόγω των αυξημένων απωλειών χαλκού. Για τον λόγο αυτό κρίνεται αναγκαία η λεπτομερής ανάλυση, για την εύρεση τοπικού μεγίστου της αντικειμενικής συνάρτησης.

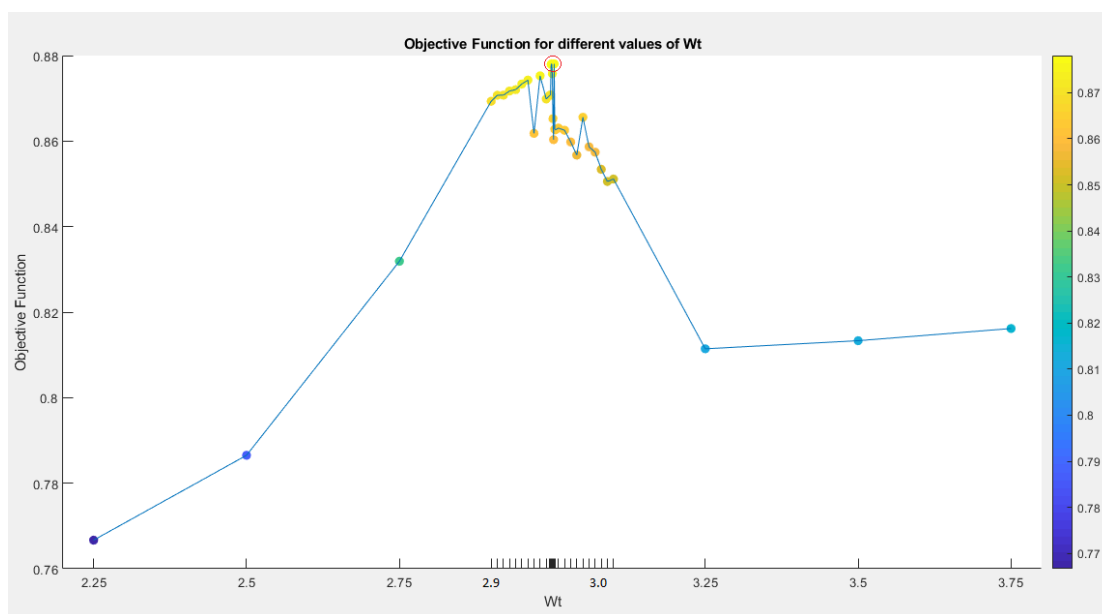
Όπως και προηγουμένως κατά την μελέτη ευαισθησίας παραμέτρου το βήμα ανάλυσης μειώθηκε σημαντικά στην περιοχή μεγιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης. Συγκεκριμένα το βήμα ανάλυσης θεωρήθηκε αρχικά 0.25mm. Στην συνέχεια στο σημείο εύρεσης τοπικού μεγίστου των τιμών αυτών, το βήμα μειώθηκε στο 0.1mm και 0.01mm, ενώ τέλος για την ανάδειξη του ολικού μεγίστου, το βήμα ανάλυσης τέθηκε ίσο με 0.001mm.

Συγκεκριμένα οι τιμές πλάτους δοντιού στις οποίες έγινε η μελέτη είναι οι εξής:

Πίνακας 4.6. Τιμές μελέτης πλάτους δοντιού (W_t).

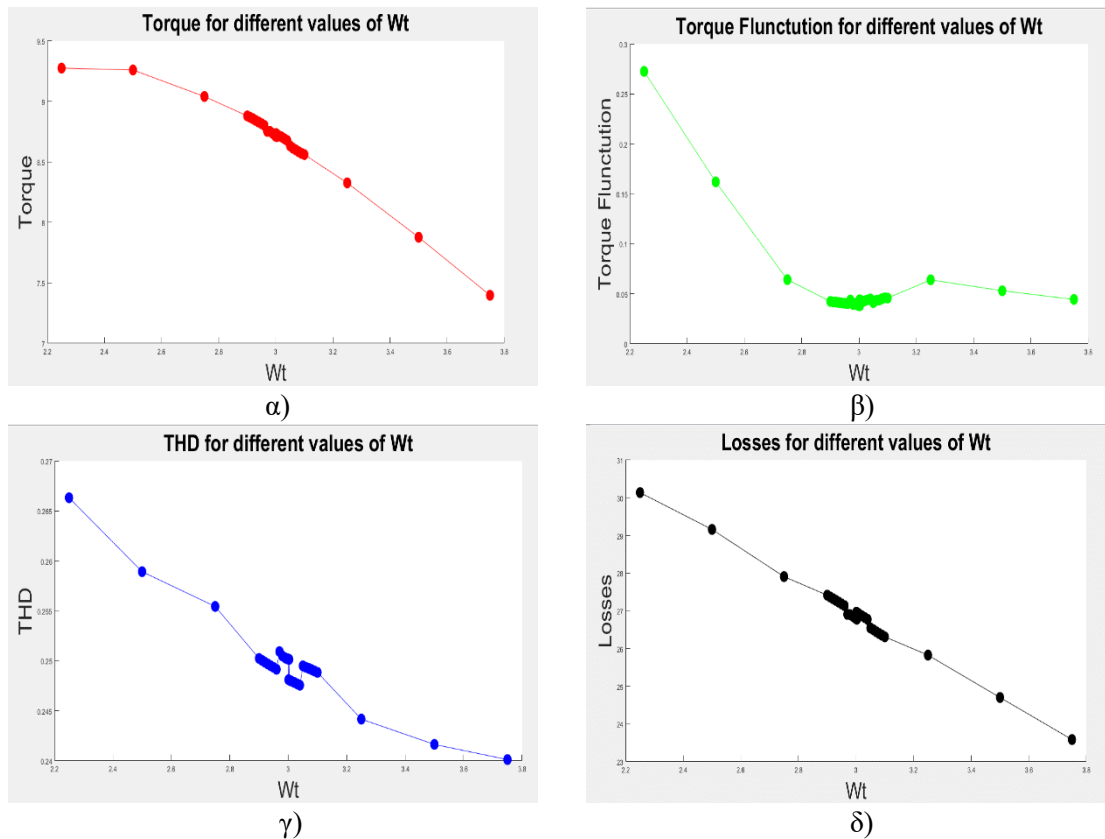
Wt (mm)										
2.25			2.5			2.75				
2.9	2.91	2.92	2.93	2.94	2.95	2.96	2.97	2.98	2.99	
2.995	2.996	2.997	2.998	2.999	3.000	3.001	3.002	3.003	3.004	3.005
3.01	3.02	3.03	3.04	3.05	3.06	3.07	3.08	3.09	3.10	
3.25			3.5			3.75				

Παρακάτω παρουσιάζεται η μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, για τις προαναφερθείσες τιμές πλάτους δοντιού:



Σχήμα 4.8. Γραφική αναπαράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης για μεταβολή του πλάτους δοντιού.

Τα γραφήματα που περιγράφουν ξεχωριστά την ροπή, την διακύμανση της ροπής, την αρμονική παραμόρφωση και τις απώλειες ισχύος φαίνονται παρακάτω, στο Σχήμα 4.9.



Σχήμα 4.9. Γραφική αναπαράσταση α) της ροπής, β) της διακύμανσης της ροπής, γ) της αρμονικής παραμόρφωσης και δ) των απωλειών ισχύος για μεταβολή του πλάτους δοντιού.

Το ολικό μέγιστο της αντικειμενικής συνάρτησης με βάση την ανάλυση της παραμέτρου πλάτους δοντιού (Wt) προκύπτει για την τιμή :

$$Wt = 2.999 \text{ mm}$$

4. 9

Θεωρώντας πλέον σταθερή αυτή την τιμή για το πλάτος δοντιού θα συνεχιστεί η μελέτη.

4.2.1.5 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου ύψους βάσεως δοντιού (h_{tp})

Η ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων συνεχίζεται με το ύψος της βάσεως του δοντιού, όπως αυτό φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Ομοιοτρόπως με το πλάτος δοντιού, το ύψος βάσεως επηρεάζει άμεσα το εμβαδόν άυλακος, όπως φαίνεται και στο προαναφερθέν σχήμα, και συνεπώς τη συνολική ένταση ρεύματος που την διαρρέει. Επομένως η επιλογή μιας μικρής τιμής για το ύψος βάσεως δοντιού, θα αυξήσει την πυκνότητα ροπής του κινητήρα. Ωστόσο η σημαντική μείωση της μεταβλητής αυτής αυξάνει ταυτόχρονα με την τιμή και τις ταλαντώσεις της επαγόμενης ροπής αλλά και την αρμονική παραμόρφωση (THD), και τις απώλειες ισχύος του κινητήρα.

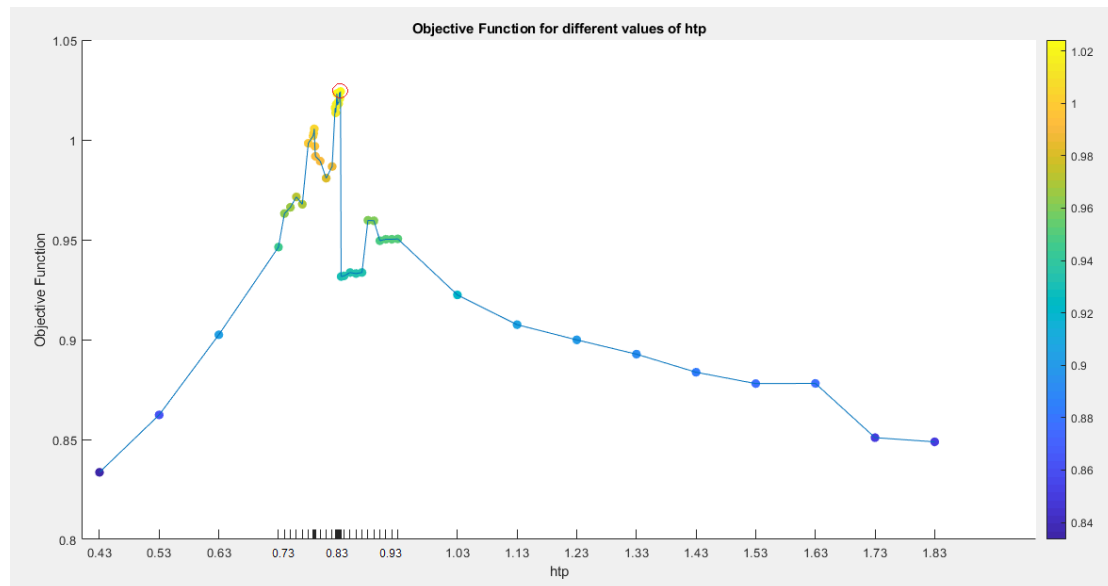
Το βήμα ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρου ύψους βάσεως δοντιού, θεωρήθηκε αρχικά ίσο με 0.1mm. Εν συνεχεία στην περιοχή εμφάνισης τοπικού μεγίστου η τιμή του βήματος ανάλυσης θεωρήθηκε ίση με 0.01mm. Εν τέλει για λόγους ακρίβειας, η ανάλυση έγινε με βήμα 0.001mm.

Συγκεκριμένα οι τιμές ύψους βάσεως δοντιού ανάμεσα στις οποίες έγινε η ανάλυση ευαισθησίας είναι οι εξής:

Πίνακας 4.7. Τιμές μελέτης ύψους βάσεως δοντιού.

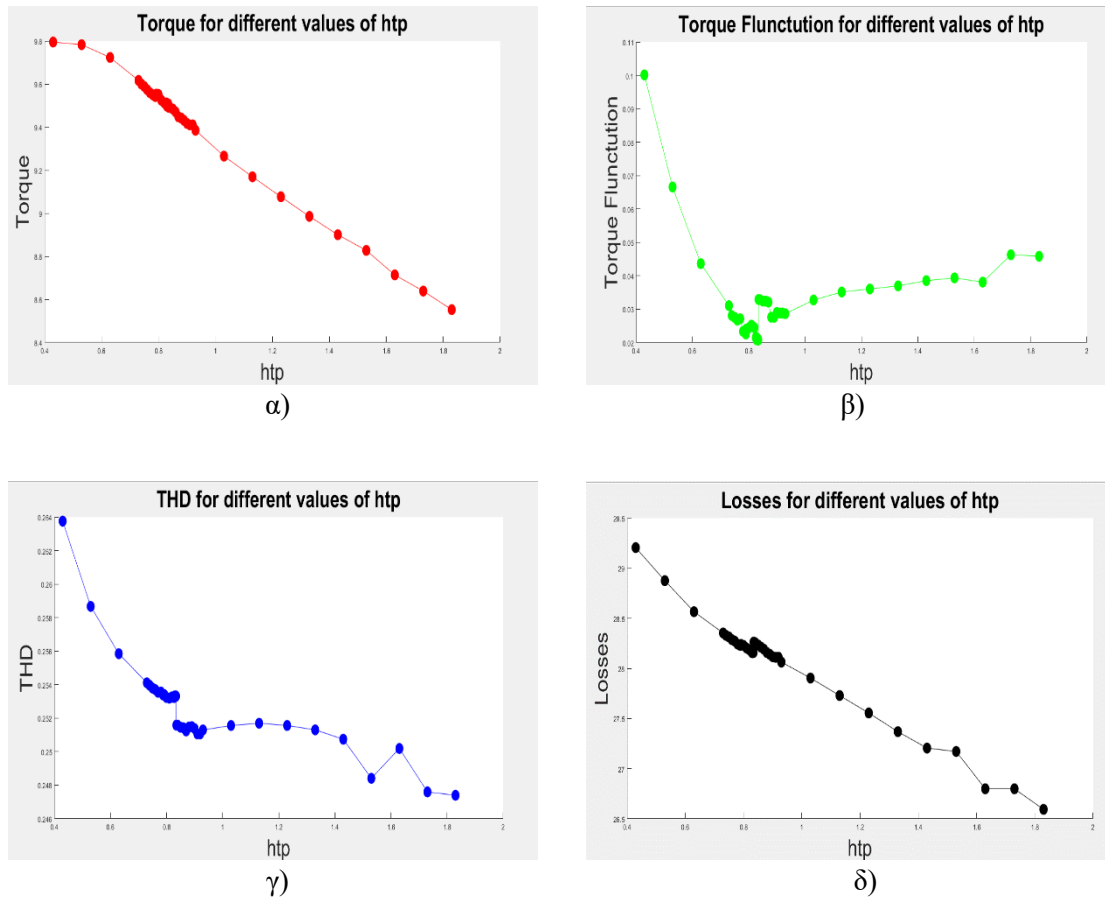
htp (mm)										
0.43			0.53			0.63				
0.73		0.74		0.75		0.76		0.77		0.78
0.788		0.789		0.790		0.791		0.792		
0.80			0.81			0.82				
0.825	0.826	0.827	0.828	0.829	0.830	0.831	0.832	0.833	0.834	0.835
0.84		0.85		0.86		0.87		0.88		0.89
0.90		0.91		0.92		0.93		1.03		1.13
1.23		1.33		1.43		1.53		1.63		1.73
1.83										

Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται η μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, για τις προαναφερθείσες τιμές ύψους βάσεως δοντιού:



Σχήμα 4.10. Γραφική αναπαράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης για μεταβολή του ύψους βάσεως δοντιού.

Τα γραφήματα που περιγράφουν ξεχωριστά την ροπή, την διακύμανση της ροπής, την αρμονική παραμόρφωση και τις απώλειες ισχύος φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 4.11. Γραφική αναπαράσταση α) της ροπής, β) της διακύμανσης της ροπής, γ) της αρμονικής παραμόρφωσης και δ) των απωλειών ισχύος για μεταβολή του ύψους βάσεως δοντιού.

Το ολικό μέγιστο της αντικειμενικής συνάρτησης με βάση την ανάλυση της παραμέτρου ύψους βάσεως δοντιού (htp) δίνεται για την τιμή :

$$htp = 0.834 \text{ mm}$$

4. 10

Στη συνέχεια της μελέτης η τιμή του ύψους βάσεως δοντιού θα θεωρείται σταθερά.

4.2.1.6 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου ύψους δοντιού (Lt)

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.3 του Κεφαλαίου 3, η μεταβολή του ύψους δοντιού επηρεάζει με ανάλογο τρόπο και το εμβαδόν της αύλακος. Ταυτόχρονα αντιστρόφως ανάλογα της αύξησης του ύψους δοντιού επηρεάζεται το πάχος σώματος του στάτη (Wbi). Συνεπώς καθίσταται πασιφανές πώς η μεταβλητή αυτή δεν μπορεί να αυξηθεί σε τέτοιο βαθμό, ώστε το πάχος σώματος στάτη να μην εγκυάται την συμπαγή κατασκευή του κινητήρα. Επιπροσθέτως σημαντική αύξηση της μεταβλητής αυτής, μειώνει την πυκνότητα ροπής, ενώ αυξάνει τις ταλαντώσεις ροπής, την αρμονική παραμόρφωση και τις απώλειες ισχύος του κινητήρα.

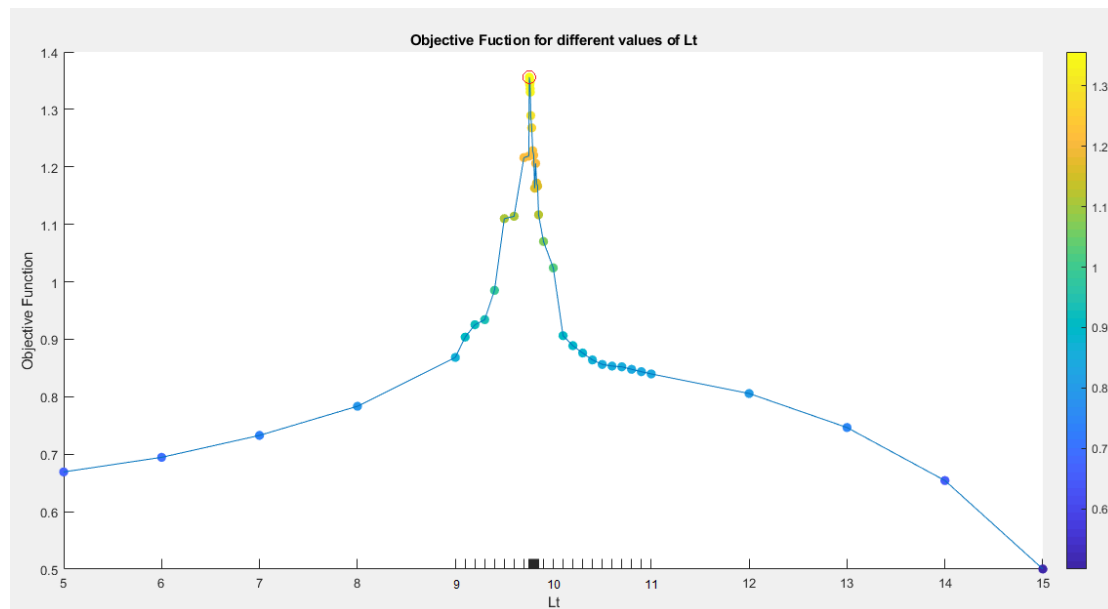
Το βήμα ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρου ύψους δοντιού, θεωρήθηκε αρχικά ίσο με 1mm. Εν συνεχεία στην περιοχή εμφάνισης τοπικού μεγίστου η τιμή του βήματος ανάλυσης θεωρήθηκε ίση με 0.1mm. Η διαδικασία μελέτης συνεχίστηκε με βήμα ανάλυσης 0,01mm, και τέλος για την καλύτερη προσέγγιση του ολικού μεγίστου θεωρήθηκε βήμα ανάλυσης ίσο με 0.001mm.

Συγκεκριμένα οι τιμές ύψους δοντιού ανάμεσα στις οποίες έγινε η ανάλυση ευαισθησίας είναι οι εξής:

Πίνακας 4.8. Τιμές μελέτης ύψους δοντιού.

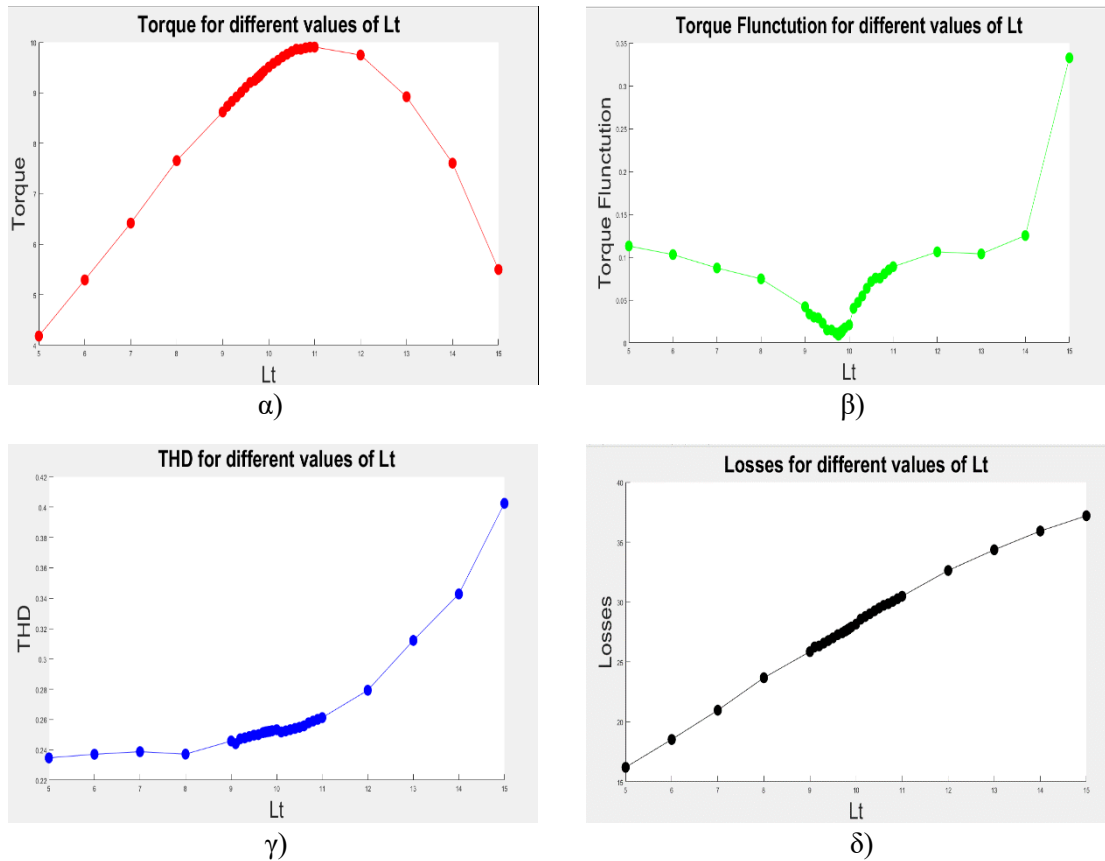
Lt (mm)																								
5					6					7					8					9				
9.1			9.2			9.3			9.4			9.5			9.6			9.7						
9.75																								
9.755		9.756		9.757		9.758		9.759		9.760		9.761		9.762		9.763		9.764		9.765				
9.77		9.78		9.79		9.80		9.81		9.82		9.83		9.84		9.85								
10			11			12			13			14			15									

Παρακάτω παρουσιάζεται η μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, για τις προαναφερθείσες τιμές ύψους δοντιού:



Σχήμα 4.12. Γραφική αναπαράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης για μεταβολή του ύψους δοντιού.

Τα γραφήματα που περιγράφουν ξεχωριστά την ροπή, την διακύμανση της ροπής, την αρμονική παραμόρφωση και τις απώλειες ισχύος φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 4.13. Γραφική αναπαράσταση α) της ροπής, β) της διακύμανσης της ροπής, γ) της αρμονικής παραμόρφωσης και δ) των απωλειών ισχύος για μεταβολή του ύψους δοντιού.

Το ολικό μέγιστο της αντικειμενικής συνάρτησης με βάση την ανάλυση της παραμέτρου ύψους δοντιού (L_t) προκύπτει για την τιμή :

$$L_t = 9.756 \text{ mm}$$

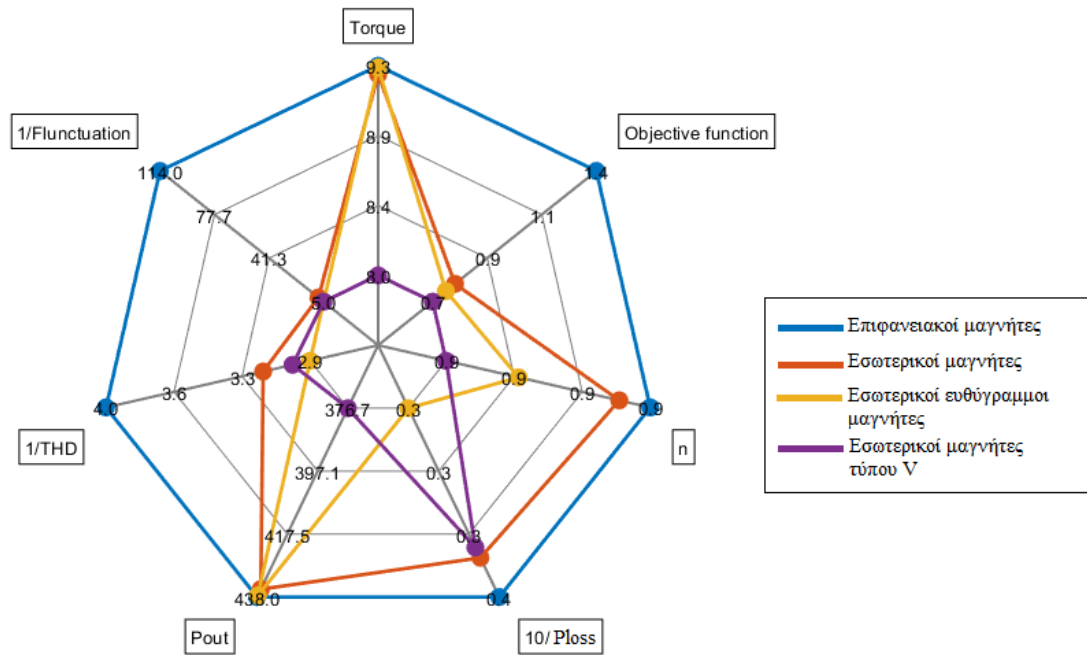
4. 11

Θεωρώντας πλέον σταθερή αυτή την τιμή για το ύψος δοντιού θα συνεχιστεί η μελέτη.

4.2.1.7 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου τοπολογίας μαγνήτη

Θεωρήθηκαν τέσσερις (4) διαφορετικές τοπολογίες μαγνητών, στις οποίες τέθηκε σταθερό πάχος μαγνήτη, και σταθερή γωνία εύρους του. Όπως και στην μελέτη της διαμόρφωσης δοντιών, για την ορθή αναπαράσταση των αποτελεσμάτων των κινητήρων με διαφορετικές τοπολογίες μαγνητών, έγινε χρήση της τεχνικής Taguchi.

Παρακάτω φαίνεται η χρήση της τεχνικής Taguchi για τις τέσσερις διαφορετικές τοπολογίες μαγνητών, όπως αυτές περιγράφονται στην εικόνα 3.6 του Κεφαλαίου 3.



Εικόνα 4.14. Γραφική αναπαράσταση των χαρακτηριστικών κινητήρων με διαφορετικές τοπολογίες μαγνητών.

Όπως εύκολα φαίνεται, η τοπολογία επιφανειακών μαγνητών αποδίδει καλύτερα από τις υπόλοιπες σε όλα τα σημεία κυριάρχου ενδιαφέροντος (ροπή, ταλαντώσεις ροπής, ισχύς εξόδου, απώλειες ισχύος και αρμονική παραμόρφωση).

Συνεπώς η μελέτη θα συνεχιστεί θεωρώντας αυτή την τοπολογία μαγνητών.

4.2.1.8 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου πάχους διακένου (lg)

Όπως έχει προαναφερθεί, το πάχος του διακένου είναι παράμετρος μείζονος σημασίας για τη λειτουργία του κινητήρα. Γενική αρχή σχεδίασης είναι πως όσο μικρότερη είναι αυτή η παράμετρος, τόσο μεγαλύτερες θα είναι οι συνιστώσες πυκνότητας ροπής. Ωστόσο, η μείωση του πάχους διακένου, επιφέρει ταυτόχρονη αύξηση του αρμονικού περιεχομένου της αντί-HEΔ του κινητήρα, η οποία δεν μπορεί να αγνοηθεί.

Το βήμα ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρου πάχους διακένου, θεωρήθηκε αρχικά ίσο με 0.05mm. Εν συνεχεία στις περιοχές εμφάνισης τοπικού μεγίστου η τιμή του βήματος ανάλυσης θεωρήθηκε ίση με 0.01mm. Εν κατακλείδι για την καλύτερη προσέγγιση του ολικού μεγίστου θεωρήθηκε βήμα ανάλυσης ίσο με 0.001mm.

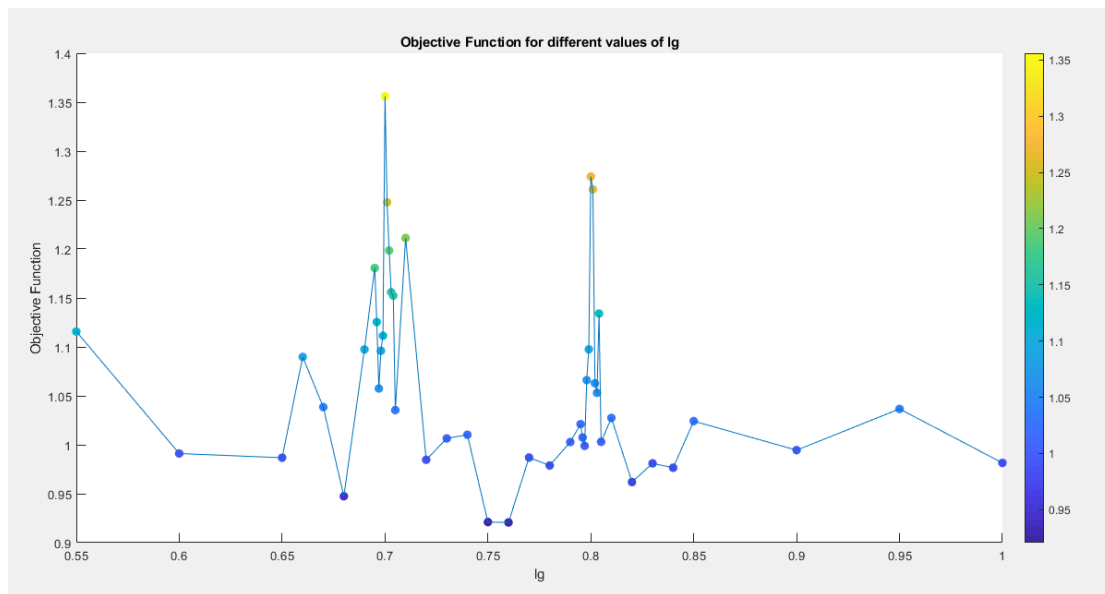
Το πάχος διακένου αποτελεί παράμετρο στην οποία τα χαρακτηριστικά μεγέθη ενδιαφέροντος του κινητήρα εμφανίζουν ιδιαίτερα μεγάλη ευαισθησία. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.16, μικρές αλλαγές στην τιμή του, επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τις τιμές ροπής, ταλαντώσεων ροπής, αρμονικής παραμόρφωσης και απωλειών ισχύος.

Οι τιμές πάχους διακένου ανάμεσα στις οποίες έγινε η ανάλυση ευαισθησίας είναι οι εξής:

Πίνακας 4.9. Τιμές μελέτης πάχους διακένου.

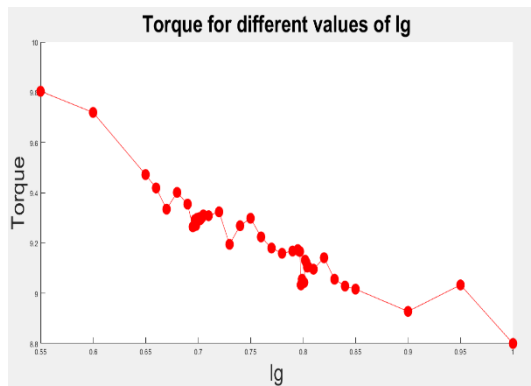
lg (mm)											
0.55			0.6			0.65					
0.66		0.67		0.68		0.69					
0.695	0.696	0.697	0.698	0.699	0.700	0.701	0.702	0.703	0.704	0.705	
0.71		0.72		0.73		0.74		0.75		0.76	
0.77	0.78	0.79									
0.795	0.796	0.797	0.798	0.799	0.800	0.801	0.802	0.803	0.804	0.805	
0.85		0.90		0.95		1.00					

Στο κάτωθι σχήμα παρουσιάζεται η μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, για τις προαναφερθείσες τιμές πάχους διακένου:

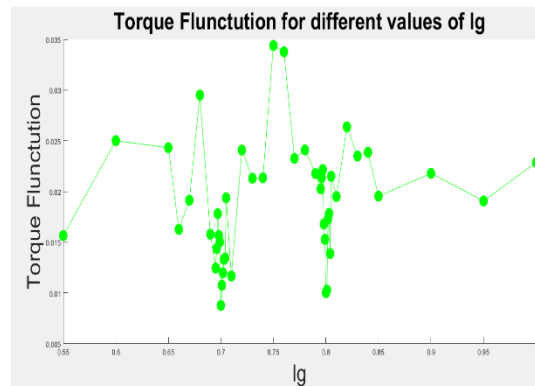


Σχήμα 4.15. Γραφική αναπαράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης για μεταβολή του πάχους διακένου.

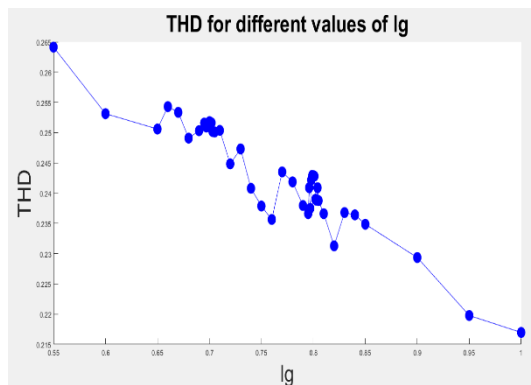
Τα γραφήματα που περιγράφουν ξεχωριστά την ροπή, την διακύμανση της ροπής, την αρμονική παραμόρφωση και τις απώλειες ισχύος παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.16:



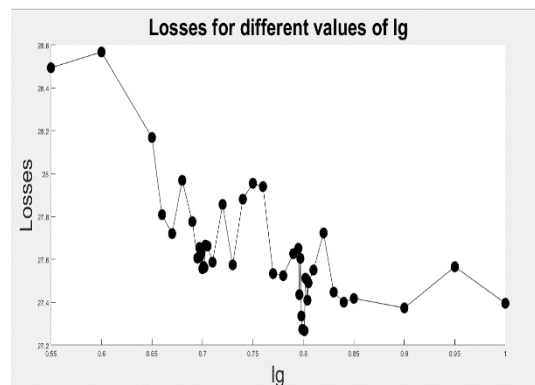
α)



β)



γ)



δ)

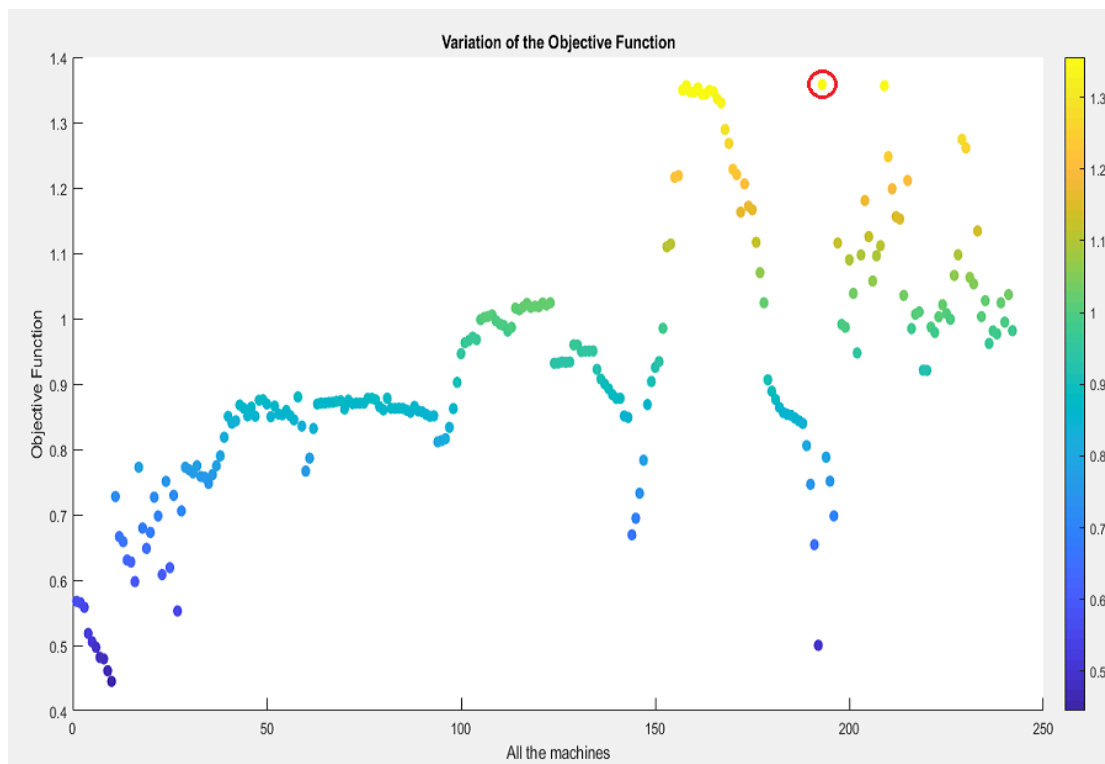
Σχήμα 4.16. Γραφική αναπαράσταση α) της ροπής, β) της διακύμανσης της ροπής, γ) της αρμονικής παραμόρφωσης και δ) των απωλειών ισχύος για μεταβολή του πάχους διακένου.

Το ολικό μέγιστο της αντικειμενικής συνάρτησης με βάση την ανάλυση της παραμέτρου πάχους διακένου εμφανίζεται στην τιμή :

$$lg = 0.7 \text{ mm}$$

4.2.1.9 Χαρακτηριστικά μεγέθη ενδιαφέροντος τελικού κινητήρα

Συνολικά μελετήθηκαν διακόσιοι σαράντα δύο (242) τριφασικοί κινητήρες με κατανομημένο τύλιγμα διπλής στρώσεως κλασματικού βήματος με βάση την ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων όπως αυτή ορίστηκε στα παραπάνω υπό-κεφάλαια. Παρακάτω παρουσιάζεται γραφικά η διακύμανση της αντικειμενικής συνάρτησης, όπως αυτή προέκυψε από όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν:



Σχήμα 4.17. Γραφική αναπαράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης καθ'όλη την διάρκεια της διαδικασίας.

Τα χαρακτηριστικά του προκύπτοντος, εκ της παραπάνω ανάλυσεως ευαισθησίας παραμέτρων, κινητήρα φαίνονται παρακάτω:

- ❖ $P = 6, Q = 36 \Rightarrow q=2$
- ❖ $f=22.5 \text{ Hz}$
- ❖ $\Sigma A A=450$
- ❖ $T_{,mean} = 9.30 \text{ Nm}$
- ❖ $\text{Ταλαντώσεις Ροπής (\%)} = 0,88$
- ❖ $\text{Αρμονική Παραμόρφωση THD (\%)} = 25.18$
- ❖ $\text{Ισχύς εξόδου} = 438 \text{ W}$
- ❖ $\text{Απώλειες ισχύος} = 27.5$
- ❖ $\text{Απόδοση ισχύος (\%)} = 94.08$

4.2.2 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με συγκεντρωμένα τυλίγματα χωρίς επικάλυψη των φάσεων

Στο δεύτερο μέρος της μελέτης, γίνεται ανάλυση ηλεκτρικών κινητήρων συγκεντρωμένου τυλίγματος διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των φάσεων.

4.2.2.1 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου ζευγών πόλων-αυλάκων

Ομοίως με την σχετική ανάλυση ηλεκτρικού κινητήρα με καταναμημένα τυλίγματα, ο αριθμός των δυνατών πόλων ενέχει ορισμένους περιορισμούς. Με εντελώς ανάλογο τρόπο με την υπό-νότητα 4.2.1.1, θεωρήθηκαν οι εξής τιμές πόλων:

Πίνακας 4.10. Επιτρεπτές τιμές αριθμού πόλων.

$P = 2$	$P = 4$	$P = 6$	$P = 8$	$P = 10$	$P = 12$	$P = 14$
---------	---------	---------	---------	----------	----------	----------

Με βάση τον Πίνακα 2.2, του κεφαλαίου 2, μπορούμε να επιλέξουμε τα δυνατά ζεύγη πόλων-αυλάκων για την παρακάτω μελέτη. Για λόγους ευκολίας ο πίνακας αυτός επισυνάπτεται στην παρούσα σελίδα.

Πίνακας 4.11. Πίνακας αποδεκτών συνδυασμών μεταξύ πόλων αυλάκων, για συγκεντρωμένο τυλίγμα διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των φάσεων, και οι αντίστοιχοι συντελεστές τυλίγματος.

Q_s/p	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
6	0,866		0,866	0,5		0,5	0,866		0,866	0,5		0,5	0,866		0,866	0,5		0,5	0,866
9	0,617	0,866	0,945	0,945	0,866	0,617	0,328		0,328	0,617	0,866	0,945	0,945	0,866	0,617	0,328		0,328	0,617
12	$q = 1$		0,866	0,933		0,933	0,866								0,866	0,933		0,933	0,866
15			0,621	0,866		0,951	0,951		0,866	0,621								0,62	0,866
18		$q = 1$		0,647	0,866	0,902	0,945		0,945	0,902	0,866	0,647							
21						0,866	0,89		0,953	0,953		0,89	0,866						
24			$q = 1$			0,76	0,866		0,933	0,95	0,945	0,95	0,933		0,866	0,76			
27								0,866	0,877	0,915		0,954	0,954	0,945	0,915	0,877	0,866		
30				$q = 1$					0,866	0,874		0,936	0,951		0,951	0,936		0,874	0,866
33										0,866		0,903	0,928		0,954	0,954		0,928	0,903
36					$q = 1$						0,866	0,867	0,902	0,933	0,945	0,953		0,953	0,945
39												0,866	0,863		0,918	0,936		0,954	0,954
42						$q = 1$							0,866		0,89	0,913		0,945	0,953
45														0,866	0,859	0,886		0,927	0,945
48							$q = 1$								0,866	0,857		0,905	0,933
51																0,866		0,88	0,901
54								$q = 1$									0,866	0,854	0,877
57																		0,866	0,852
60									$q = 1$										0,866

$q = 1/2, 1/4$	$q = 3/8, 3/10$	$Q_s = 21 + 6k, p = Q_s \pm 1, k = 0,1,2, \dots$
$q = 3/7, 3/11$	$q = 5/14, 5/16$	$Q_s = 24 + 6k, p = Q_s \pm 2, k = 0,1,2, \dots$
$q = 2/5, 2/7$	ακατάλληλο	$k_{w1} < 0,866$

Έτσι τα 16 ζεύγη πόλων-αυλάκων που θεωρήθηκαν στην μελέτη είναι τα εξής:

Πίνακας 4.12. Επιλεγέντα προς μελέτη ζεύγη πόλων-αυλάκων.

P	Q
2	3

P	Q
8	6
8	9
8	12

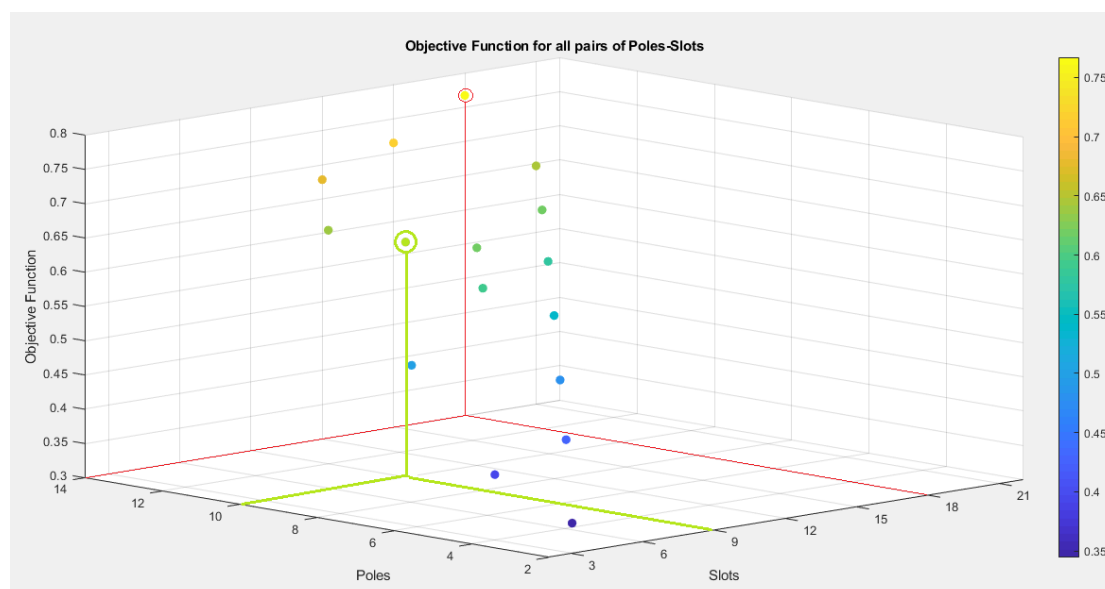
P	Q
12	9
12	18

P	Q
4	3
4	6

P	Q
10	9
10	12
10	15

P	Q
14	12
14	15
14	18
14	21

Παρακάτω φαίνεται ένα τρισδιάστατο διάγραμμα, όπου στον άξονα x'x αντιστοιχεί ο αριθμός των πόλων, στον άξονα y'y αντιστοιχεί ο αριθμός των αυλάκων και στον άξονα z'z παρουσιάζονται οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης, όπως αυτή ορίστηκε παραπάνω και προέκυψε από την σχεδιαστική μέθοδο.

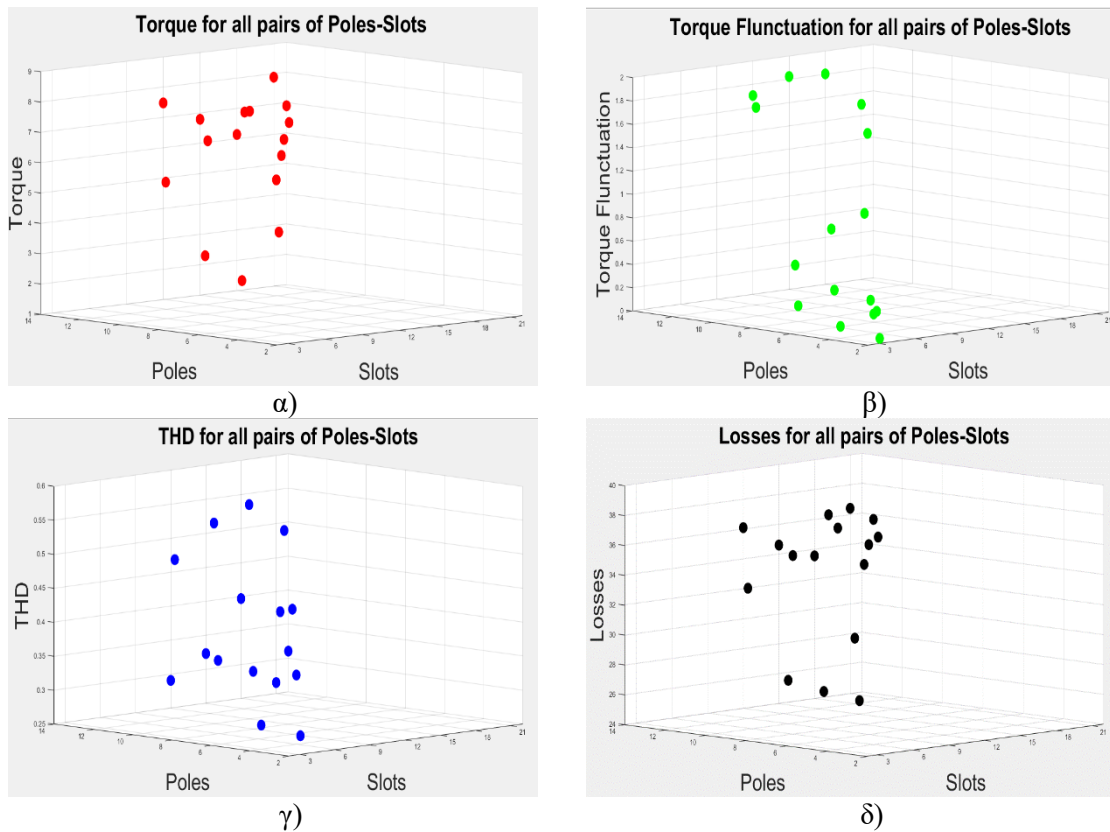


Σχήμα 4.18. Διάγραμμα αναπαράστασης της μεταβολής της αντικειμενικής συνάρτησης, για διαφορετικά ζεύγη πόλων-αυλάκων.

Όπως φαίνεται από το γράφημα ολικό μέγιστο των θεωρηθέντων ζευγών πόλων-αυλάκων είναι το ζεύγος :

$$P = 14, Q = 18$$

Όπως ακριβώς και στην μελέτη των κατανεμημένων τυλιγμάτων, σκόπιμο κρίθηκε να παρατεθούν τα γραφήματα που περιγράφουν ξεχωριστά την ροπή, την διακύμανση της ροπής, την αρμονική παραμόρφωση και τις απώλειες ισχύος, συναρτήσει των ζευγών πόλων-αυλάκων. Τα γραφήματα αυτά ακολουθούν στο Σχήμα 4.19:



Σχήμα 4.19. Διάγραμμα αναπαράστασης της μεταβολής α) της ροπής, β) της διακύμανσης της ροπής, γ) της αρμονικής παραμόρφωσης και δ) των απωλειών ισχύος συνάρτησης, για διαφορετικά ζεύγη πόλων-αυλάκων.

Στην παραπάνω συγκριτική μελέτη, παρατηρείται πως τα ζεύγη πόλων αυλάκων με αριθμό πόλων $P=14$, αντιστοιχούν σε υψηλότερες τιμές αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με τα υπόλοιπα ζεύγη. Ωστόσο με βάση τις περιοριστικές σχέσεις που έχουν οριστεί στο κεφάλαιο 3, ο αριθμός των πόλων δεν θα έπρεπε να υπερβαίνει την τιμή 13. Η παραπάνω θεώρηση προέκυψε από τον περιορισμό της ηλεκτρικής συχνότητας λειτουργίας f έως 50Hz, με σκοπό την αποφυγή υψηλών απωλειών ισχύος.

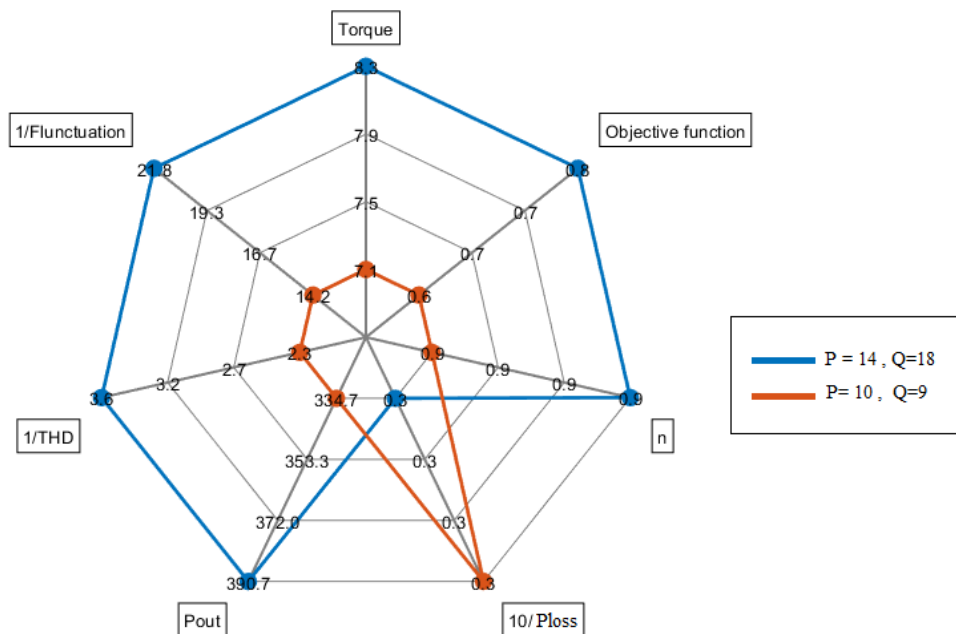
Εν προκειμένω, η διαφορά των μεγεθών ενδιαφέροντος μεταξύ των κινητήρων με αριθμό πόλων $P=14$ και των υπολοίπων κινητήρων, είναι σημαντική. Για τον λόγο αυτό θεωρήθηκε μία ξεχωριστή σύγκριση μεταξύ των δύο καλύτερων διαμορφώσεων των ομάδων με $P=14$, και με $P<13$ όπως ορίζει ο περιορισμός. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.18, τα προς σύγκριση ζεύγη είναι τα εξής:

$$\alpha) P = 14, Q = 18$$

$$\beta) P = 10, Q = 9$$

Από το Σχήμα 4.20, εύκολα φαίνεται η υπεροχή του κινητήρα «α» ως προς όλα τα χαρακτηριστικά ενδιαφέροντος με μοναδικό μειονέκτημα τις απώλειες ισχύος εξόδου. Ωστόσο από την εκτενή μελέτη των αποτελεσμάτων, παρατηρούμε πως η διαφορά μεταξύ των απωλειών ισχύος των δύο επιλεγέντων κινητήρων είναι μικρότερη των 2 W.

Συνεπώς εν προκειμένω η επιλογή αριθμού πόλων που υπερβαίνει κατ' ελάχιστον την περιοριστική σχέση του Κεφαλαίου 3, δεν επέφερε σημαντικές επιπτώσεις στην τιμή των απωλειών ισχύος.



Σχήμα 4.20. Γραφική αναπαράσταση των χαρακτηριστικών κινητήρων για τα δύο διαφορετικά ζεύγη πόλων-αυλάκων.

Η ως άνω παρατήρηση, οδηγεί στην επιλογή του κινητήρα με το εξής ζεύγος πόλων-αυλάκων:

$$P = 14, Q = 18$$

4. 14

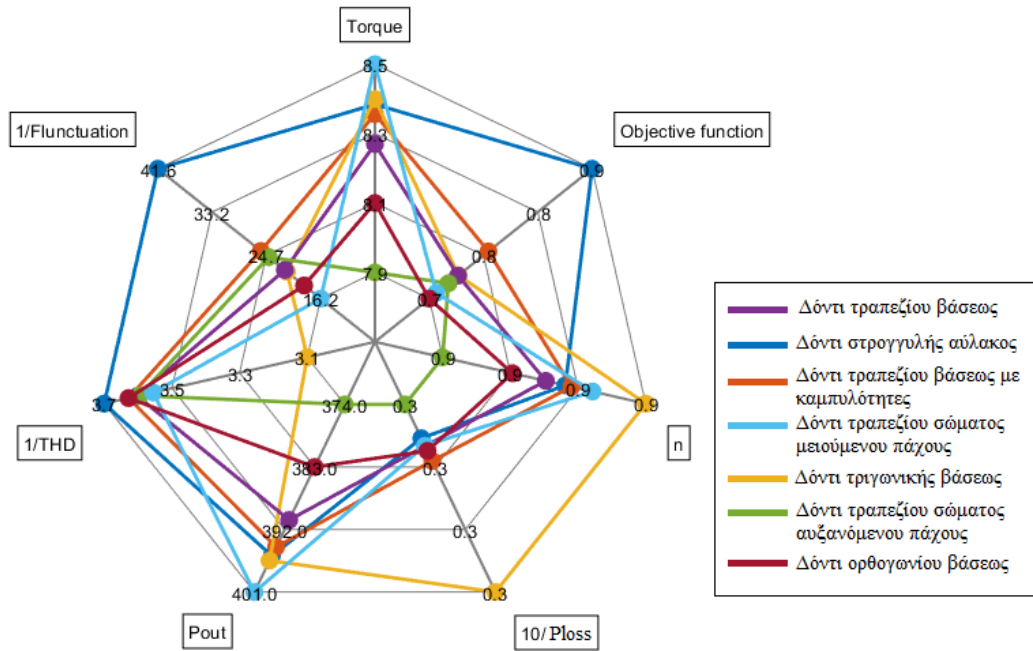
Με βάση την θεωρία της ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρων, η διαδικασία θα συνεχιστεί θεωρώντας σταθερούς αριθμούς Πόλων-Αυλάκων, και μεταβάλλοντας άλλες παραμέτρους.

4.2.2.2 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου διαμορφώσεων δοντιού

Θεωρήθηκαν οκτώ (8) διαφορετικές διαμορφώσεις δοντιών, από τις οποίες στο συγκεντρωμένο τύλιγμα θα μελετηθούν οι επτά (7). Στην διαμόρφωση δοντιού στρογγυλής βάσεως το λειτουργικό πρόγραμμα εμφάνισε αδυναμία πλεγματοποίησης του κινητήρα για τις παραμέτρους εισόδου που του δόθηκαν, με αποτέλεσμα να παραληφθεί για την συνέχεια της εργασίας.

Για την ορθή αναπαράσταση των αποτελεσμάτων των κινητήρων με διαφορετικές διαμορφώσεις δοντιών, έγινε χρήση της τεχνικής Taguchi.

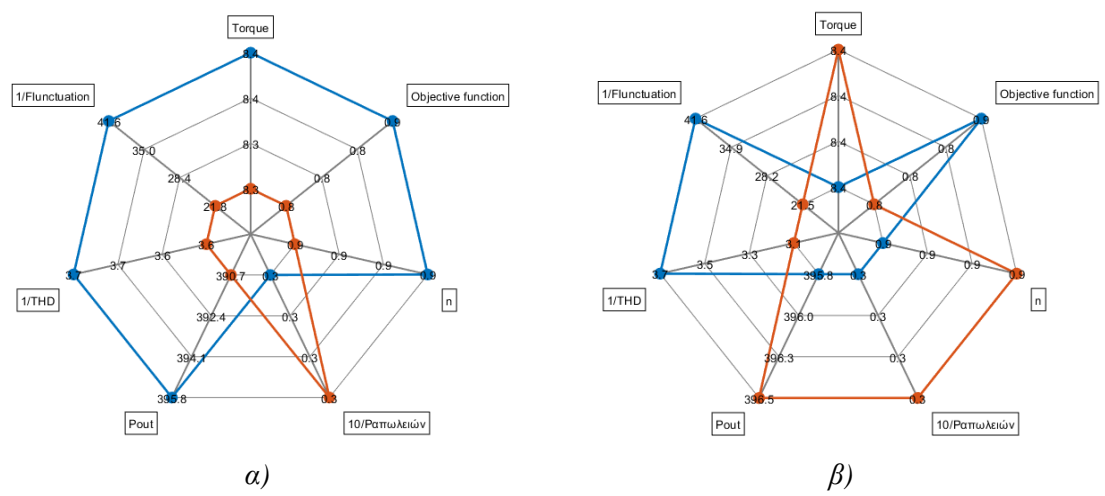
Στο Σχήμα 4.21 φαίνεται η χρήση της τεχνικής αυτής για τις επτά εκ των οκτώ διαφορετικές διαμορφώσεις δοντιών, όπως αυτές περιγράφονται στην εικόνα 3.4 του Κεφαλαίου 3.



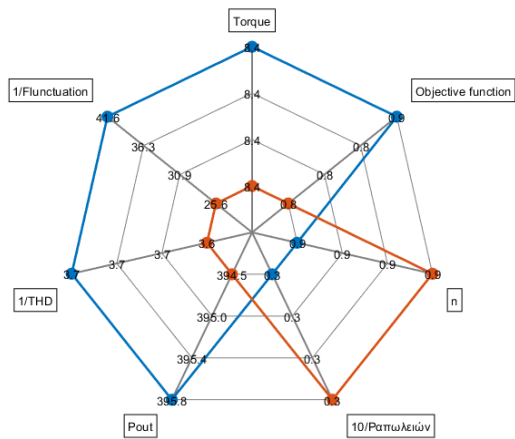
Σχήμα 4.21. Γραφική αναπαράσταση των χαρακτηριστικών κινητήρων με διαφορετικές διαμορφώσεις δοντιών.

Από το παραπάνω γράφημα, διαφαίνεται πώς τα σημεία κυριάρχου ενδιαφέροντος (ροπή, ταλαντώσεις ροπής, ισχύς εξόδου, απώλειες ισχύος και αρμονική παραμόρφωση) οδηγούν στην επιλογή της διαμορφώσεως δοντιού στρογγυλής αύλακος. Αυτό φαίνεται και από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της εν λόγω διαμόρφωσης, η οποία είναι μεγαλύτερη από των υπολοίπων διαμορφώσεων. Ωστόσο λόγω της έντονης πυκνότητας του παραπάνω γραφήματος, δεδομένου του μεγάλου αριθμού συγκρινόμενων διαμορφώσεων, κρίθηκε σκόπιμη η συγκριτική αναπαράσταση καθεμιάς εκ των υπολοίπων διαμορφώσεων με την επιλεχθείσα.

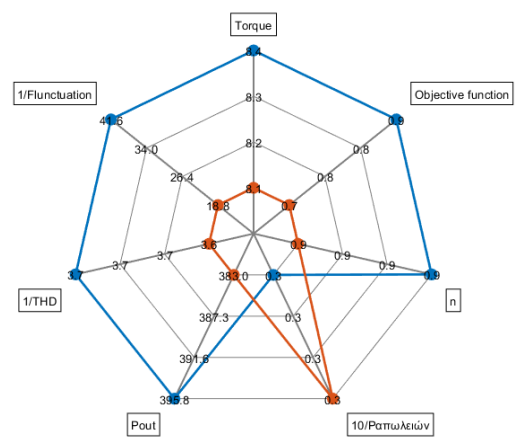
Για την ευκρίνεια των συγκρινόμενων γραφημάτων επιλέχθηκε σταθερό μπλέ χρώμα για την επιλεχθείσα διαμόρφωση, και πορτοκαλί για όλες τις υπόλοιπες. Έτσι τα γραφήματα που προέκυψαν είναι τα παρακάτω:



Σχήμα 4.22.1 Συγκριτική παρουσίαση μεταξύ της επιλεχθείσας και των εναλλακτικών διαμορφώσεων δοντιού: α) τραπεζίου βάσεως β) τριγωνικής βάσεως

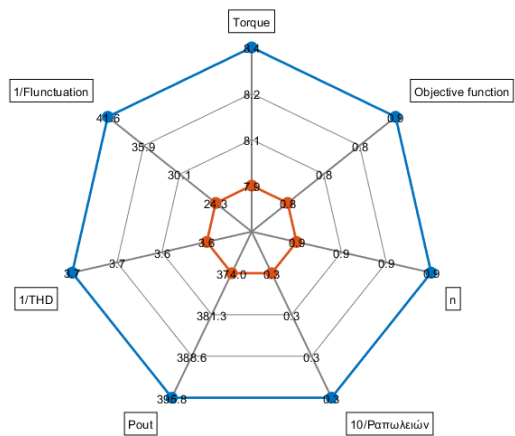


γ)

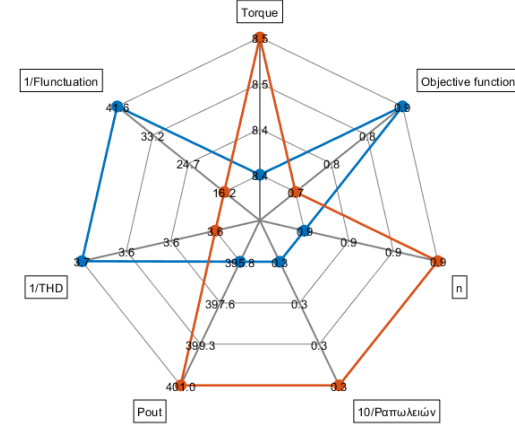


δ)

Σχήμα 4.22.2 Συγκριτική παρουσίαση μεταξύ της επιλεχθείσας και των εναλλακτικών διαμορφώσεων δοντιού: γ) τραπεζίου βάσεως με καμπυλότητες δ) ορθογωνίου βάσεως



ε)



ζ)

Σχήμα 4.22.3. Συγκριτική παρουσίαση μεταξύ της επιλεχθείσας και των εναλλακτικών διαμορφώσεων δοντιού ε) τραπεζίου σώματος αυξανόμενου πάχους ζ) τραπεζίου σώματος μειούμενου πάχους

Από τα παραπάνω γραφήματα, εκτός της επιλογής βέλτιστου με βάση τους στόχους της μελέτης, μπορούν να αναδειχθούν τα εξής συμπεράσματα για κινητήρα συγκεντρωμένου τυλίγματος διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των φάσεων:

1. Οι διαμορφώσεις δοντιών τραπεζίου σώματος μειούμενου πάχους, τριγωνικής βάσεως και στρογγυλής αύλακος εμφανίζουν υψηλότερες τιμές ροπής.
2. Η διαμόρφωση δοντιού στρογγυλής αύλακος εμφανίζει σημαντικά μειωμένες τιμές ταλαντώσεων ροπής και αρμονικής παραμόρφωσης.
3. Η διαμόρφωση δοντιού τριγωνικής βάσεως εμφανίζει σημαντικά μειωμένες απώλειες ισχύος, και υψηλές τιμές απόδοσης.

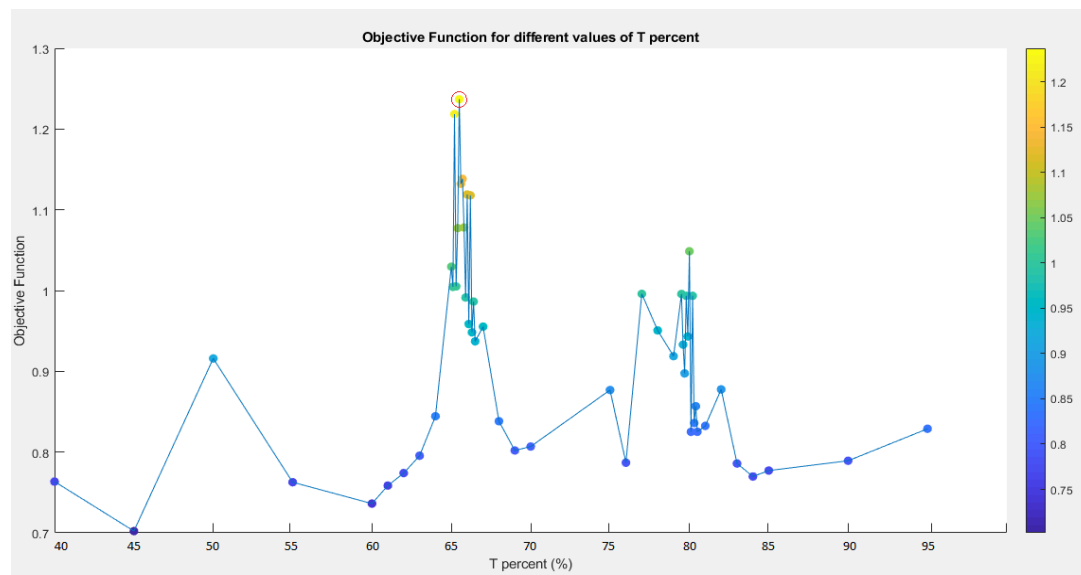
4.2.2.3 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου ποσοστού εύρους δοντιού ως προς το βήμα αύλακος (T percent)

Κατά την μελέτη ευαισθησίας της εν λόγω παραμέτρου το βήμα ανάλυσης μειώθηκε σημαντικά στην περιοχή μεγιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης. Συγκεκριμένα όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.13, αρχικά το βήμα ανάλυσης της παραμέτρου θεωρήθηκε 5%. Στην συνέχεια στα σημεία εύρεσης τοπικού μεγίστου των τιμών αυτών, το βήμα μειώθηκε στο 1%. Τέλος για την επαρκή προσέγγιση του ολικού μεγίστου, το βήμα ανάλυσης τέθηκε ίσο με 0.1%. Οι τιμές ποσοστού εύρους δοντιού ως προς το βήμα αύλακος ανάμεσα στις οποίες πραγματοποιήθηκε η μελέτη είναι οι εξής:

Πίνακας 4.13. Τιμές μελέτης ποσοστού εύρους δοντιού ως προς το βήμα αύλακος (T percent).

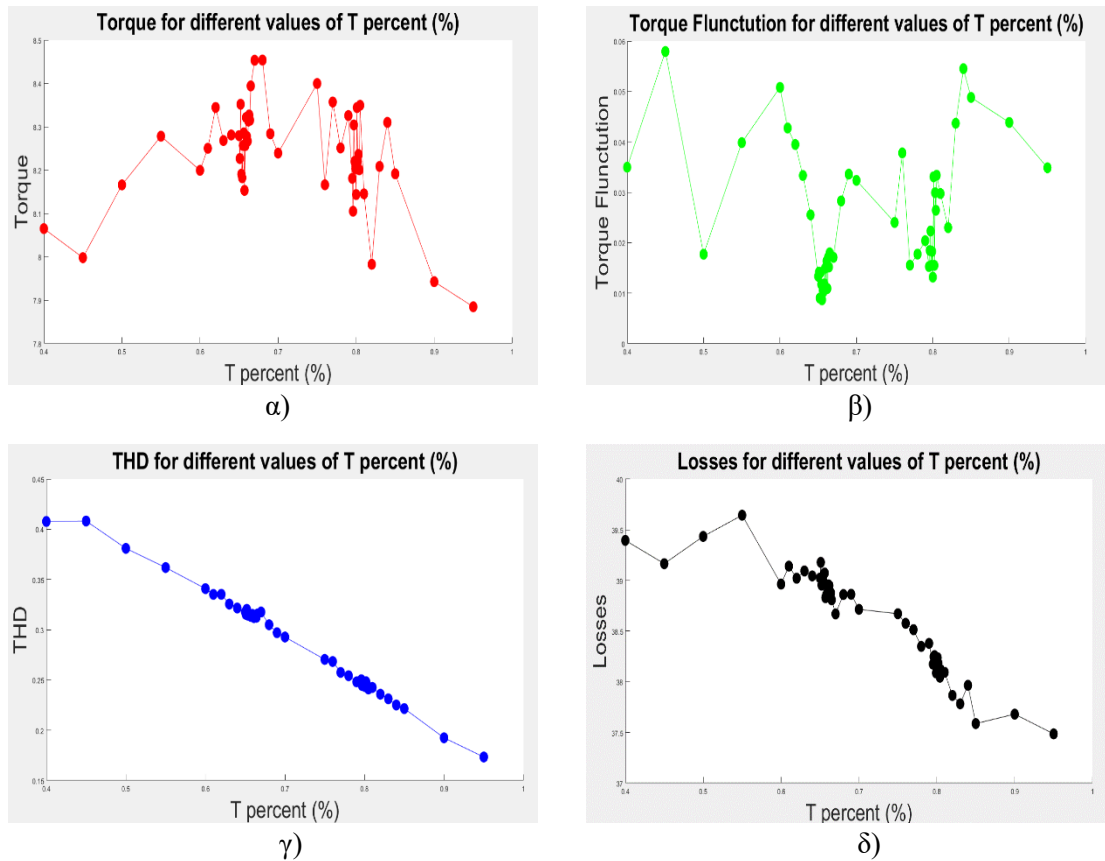
T percent (%)										
40.0	45.0	50.0	55.0							
60.0	61.0	62.0	63.0	64.0						
65.0	65.1	65.2	65.3	65.4	65.5	65.6	65.7	65.8	65.9	
66.0	66.1	66.2	66.3	66.4	66.5	66.6	66.7	66.8	66.9	
67.0	68.0	69.0	70.0							
75.0	76.0	77.0	78.0	79.0						
79.5	79.6	79.7	79.8	79.9	80.0	80.1	80.2	80.3	80.4	80.5
81.0	82.0	83.0	84.0	85.0						
90.0	95.0									

Στο κάτωθι σχήμα παρουσιάζεται η μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, για τις τιμές του ποσοστού εύρους δοντιού που αναφέρθηκαν παραπάνω:



Σχήμα 4.23. Γραφική αναπαράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης για μεταβολή του ποσοστού εύρους δοντιού ως προς το βήμα αύλακος.

Τα γραφήματα που περιγράφουν ξεχωριστά την ροπή, την διακύμανση της ροπής, την αρμονική παραμόρφωση και τις απώλειες ισχύος φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 4.24. Γραφική αναπαράσταση α) της ροπής, β) της διακύμανσης της ροπής, γ) της αρμονικής παραμόρφωσης και δ) των απωλειών ισχύος για μεταβολή του ποσοστού εύρους δοντιού ως προς το βήμα αύλακος.

Η διαδικασία ανάλυσης, με ακρίβεια τριών δεκαδικών ψηφίων, προσφέρει μια αρκετά πλήρη εικόνα του ολικού μεγίστου της αντικειμενικής συνάρτησης για μεταβολή της παραμέτρου ποσοστού εύρους δοντιού ως προς το βήμα αύλακος (T percent). Η τελική επιλεχθείσα τιμή όπως αυτή προέκυψε από την παραπάνω σχεδιαστική μελέτη είναι:

$$T \text{ percent} = 65.5\%$$

4. 15

Η μελέτη θα συνεχιστεί θεωρώντας πλέον σταθερή αυτή την τιμή για το ποσοστό εύρους δοντιού ως προς το βήμα αύλακος.

4.2.2.4 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου πλάτους δοντιού (Wt)

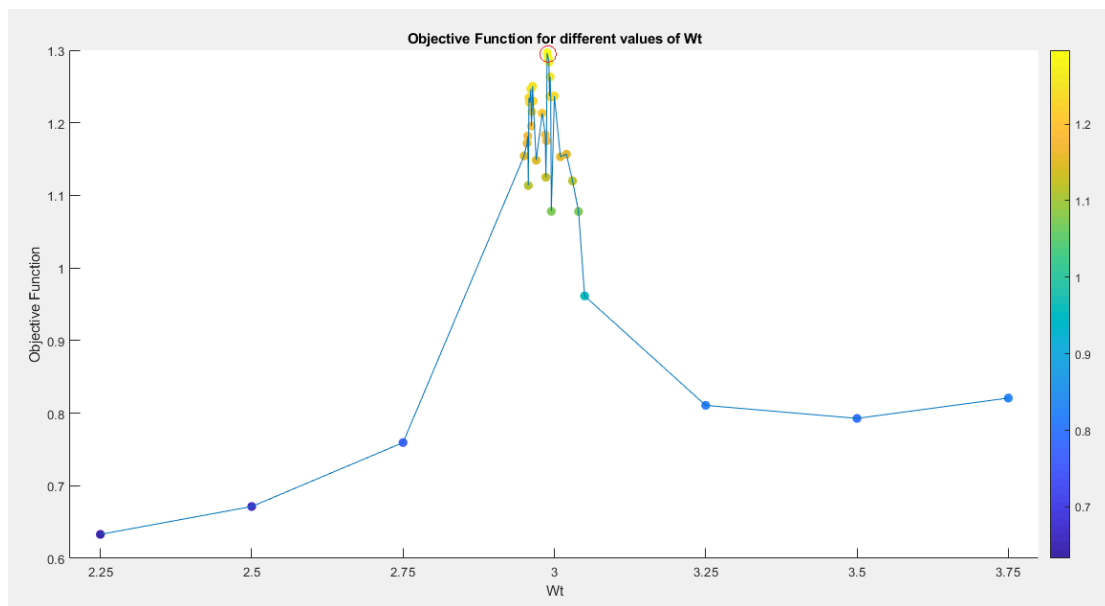
Όπως και προηγουμένως κατά την μελέτη ευαισθησίας παραμέτρου το βήμα ανάλυσης μειώθηκε σημαντικά στην περιοχή μεγιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης. Συγκεκριμένα το βήμα ανάλυσης θεωρήθηκε αρχικά 0.25mm. Στην συνέχεια στο σημείο εύρεσης τοπικού μεγίστου των τιμών αυτών, το βήμα μειώθηκε στο 0.1mm και 0.01mm, ενώ τέλος για την ανάδειξη του ολικού μεγίστου, το βήμα ανάλυσης τέθηκε ίσο με 0.001mm.

Συγκεκριμένα οι τιμές πλάτους δοντιού στις οποίες έγινε η μελέτη είναι οι εξής:

Πίνακας 4.14. Τιμές μελέτης πλάτους δοντιού (Wt).

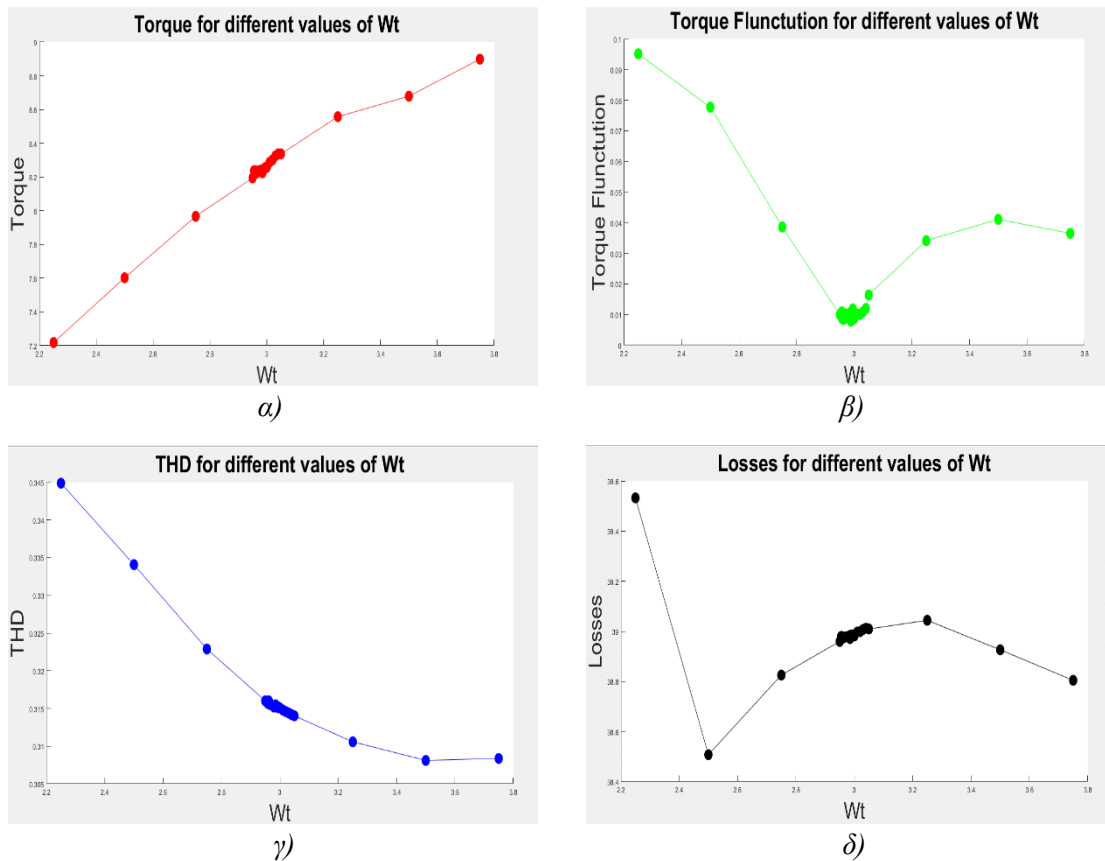
Wt (mm)														
2.25			2.5			2.75								
			2.95											
2.955	2.956	2.957	2.958	2.959	2.960	2.961	2.962	2.963	2.964	2.965				
			2.97		2.98									
2.985	2.986	2.987	2.988	2.989	2.990	2.991	2.992	2.993	2.994	2.995				
			3.00		3.01		3.02		3.03		3.04		3.05	
			3.25		3.5		3.75							

Παρακάτω παρουσιάζεται η μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, για τις προαναφερθείσες τιμές πλάτους δοντιού:



Σχήμα 4.25. Γραφική αναπαράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης για μεταβολή του πλάτους δοντιού.

Τα γραφήματα που περιγράφουν ξεχωριστά την ροπή, την διακύμανση της ροπής, την αρμονική παραμόρφωση και τις απώλειες ισχύος ακολουθούν παρακάτω, στο Σχήμα 4.26:



Σχήμα 4.26. Γραφική αναπαράσταση α) της ροπής, β) της διακύμανσης της ροπής, γ) της αρμονικής παραμόρφωσης και δ) των απωλειών ισχύος συνάρτησης για μεταβολή του πλάτους δοντιού.

Το ολικό μέγιστο της αντικειμενικής συνάρτησης με βάση την ανάλυση της παραμέτρου πλάτους δοντιού (Wt) προκύπτει για την τιμή :

$$Wt = 2.988 \text{ mm}$$

4. 16

Θεωρώντας πλέον σταθερή αυτή την τιμή για το πλάτος δοντιού θα συνεχιστεί η μελέτη.

4.2.2.5 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου ύψους βάσεως δοντιού (h_p)

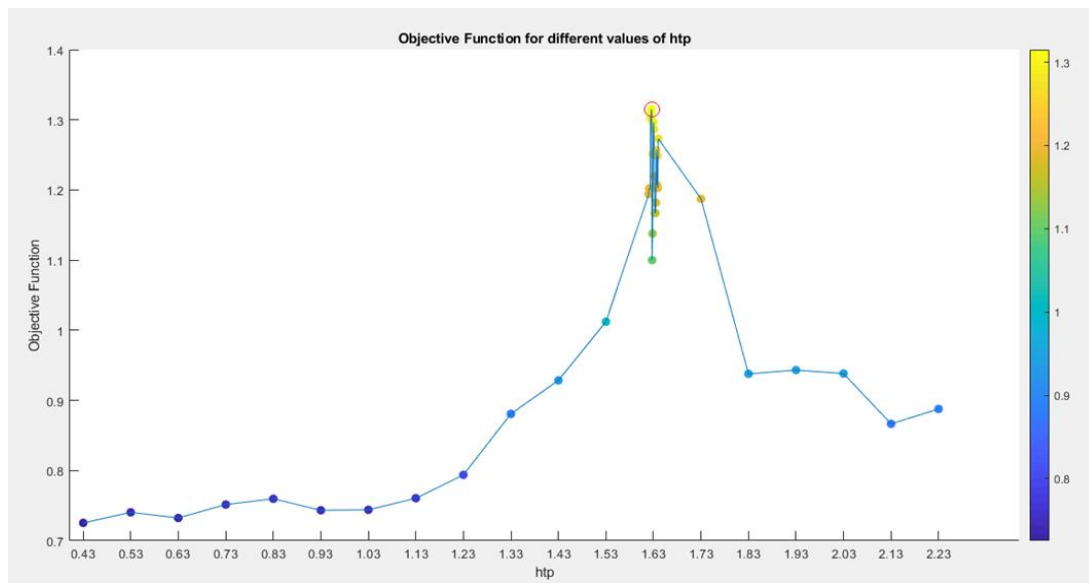
Το βήμα ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρου ύψους βάσεως δοντιού, θεωρήθηκε αρχικά ίσο με 0.1mm. Εν συνεχεία στην περιοχή εμφάνισης τοπικού μεγίστου η τιμή του βήματος ανάλυσης θεωρήθηκε ίση με 0.01mm. Εν κατακλείδι για λόγους ακρίβειας, η ανάλυση έγινε με βήμα 0.001mm.

Συγκεκριμένα οι τιμές ύψους βάσεως δοντιού ανάμεσα στις οποίες έγινε η ανάλυση ευαισθησίας είναι οι εξής:

Πίνακας 4.15. Τιμές μελέτης ύψους βάσεως δοντιού.

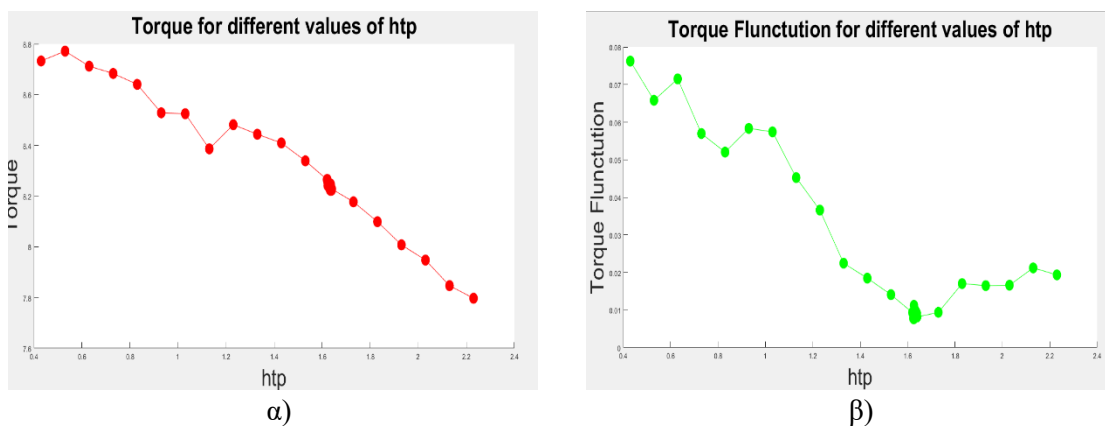
htp (mm)										
0.43	0.53	0.63	0.73	0.83	0.93	1.13	1.23	1.33	1.43	1.53
1.620	1.621	1.622	1.623	1.624	1.625	1.626	1.627	1.628	1.629	1.630
1.631	1.632	1.633	1.634	1.635	1.636	1.637	1.638	1.639	1.640	
	1.73	1.83	1.93	2.03	2.13	2.23				

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, για τις προαναφερθείσες τιμές ύψους βάσεως δοντιού:

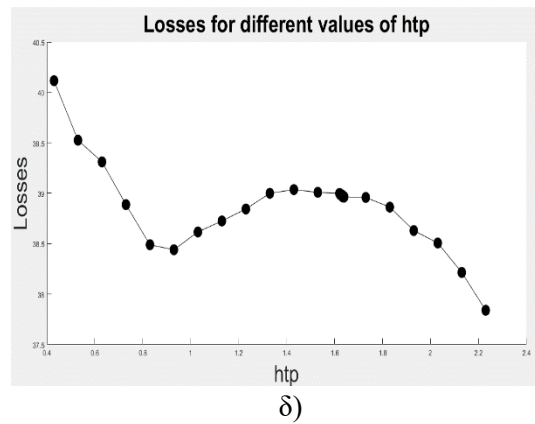
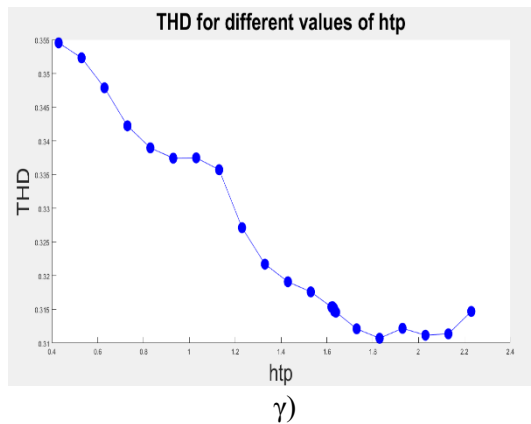


Σχήμα 4.27. Γραφική αναπαράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης για μεταβολή του ύψους βάσεως δοντιού.

Τα γραφήματα που περιγράφουν ξεχωριστά την ροπή, την διακύμανση της ροπής, την αρμονική παραμόρφωση και τις απώλειες ισχύος φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 4.27.1. Γραφική αναπαράσταση α) της ροπής και β) της διακύμανσης της ροπής για μεταβολή του ύψους βάσεως δοντιού.



Σχήμα 4.27.2. Γραφική αναπαράσταση γ) της αρμονικής παραμόρφωσης και δ) των απωλειών ισχύος για μεταβολή του ύψους βάσεως δοντιού.

Το ολικό μέγιστο της αντικειμενικής συνάρτησης με βάση την ανάλυση της παραμέτρου ύψους βάσεως δοντιού (htp) δίνεται για την τιμή :

$$htp = 1.626 \text{ mm}$$

4. 17

Θεωρώντας πλέον σταθερή αυτή την τιμή για το ύψους βάσεως δοντιού θα συνεχιστεί η μελέτη.

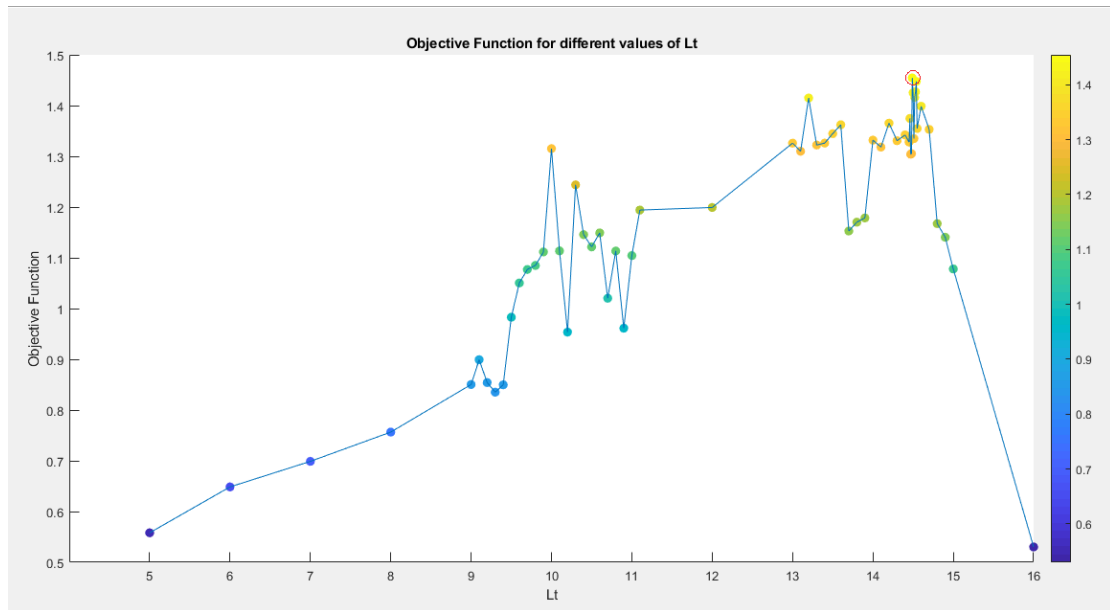
4.2.2.6 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου ύψους δοντιού (Lt)

Το βήμα ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρου ύψους δοντιού, θεωρήθηκε αρχικά ίσο με 1mm. Εν συνεχεία στην περιοχή εμφάνισης τοπικού μεγίστου η τιμή του βήματος ανάλυσης θεωρήθηκε ίση με 0.1mm. Η διαδικασία μελέτης συνεχίστηκε με βήμα ανάλυσης 0.01mm, και τέλος για την καλύτερη προσέγγιση του ολικού μεγίστου θεωρήθηκε βήμα ανάλυσης ίσο με 0.001mm. Συγκεκριμένα οι τιμές ύψους δοντιού ανάμεσα στις οποίες έγινε η ανάλυση ευαισθησίας είναι οι εξής:

Πίνακας 4.16. Τιμές μελέτης ύψους δοντιού.

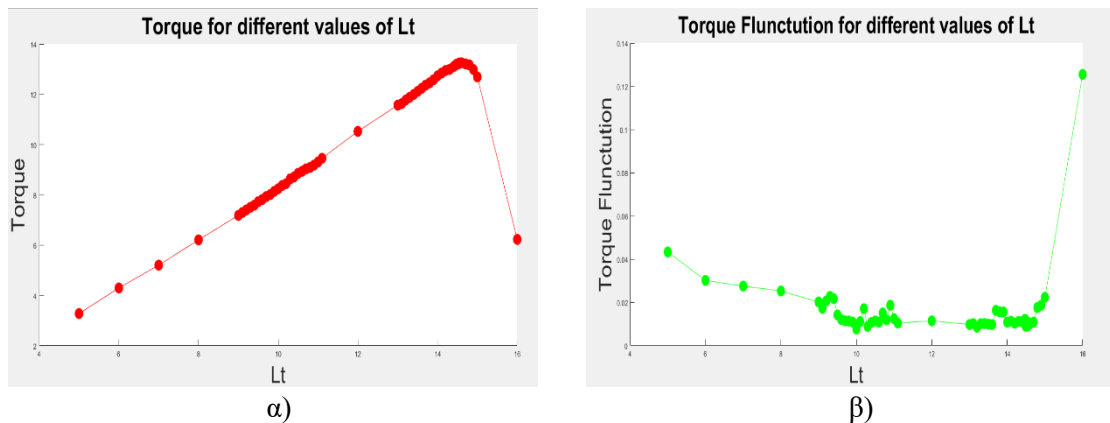
Lt (mm)															
5				6				7				8			
9.0	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6	9.7	9.8	9.9	10.0					
10.1	10.2	10.3	10.4	10.5	10.6	10.7	10.8	10.9	11.0	11.1					
12.0															
13.0	13.1	13.2	13.3	13.4	13.5	13.6	13.7	13.8	13.9	14.0					
14.1				14.2				14.3				14.4			
14.45	14.46	14.47	14.48	14.49	14.50	14.51	14.52	14.53	14.54	14.55					
14.6				14.7				14.8				14.9			
15.0					16.0										

Παρακάτω φαίνεται η μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, για τις προαναφερθείσες τιμές ύψους δοντιού:

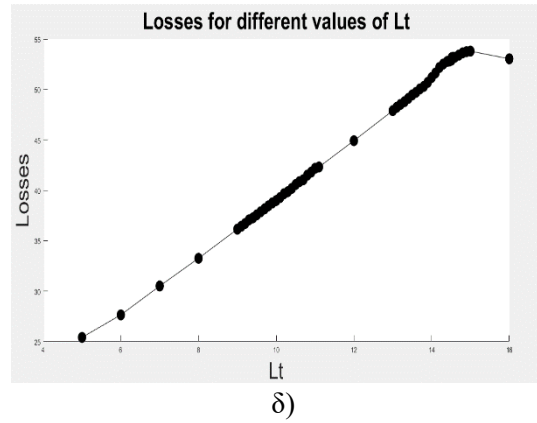
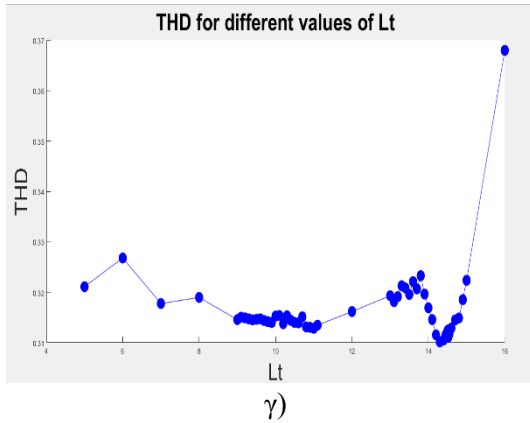


Σχήμα 4.28. Γραφική αναπαράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης για μεταβολή του ύψους δοντιού.

Τα γραφήματα που περιγράφουν ξεχωριστά την ροπή, την διακύμανση της ροπής, την αρμονική παραμόρφωση και τις απώλειες ισχύος παρουσιάζονται παρακάτω, στα Σχήματα 4.29.1 και 4.29.2:



Σχήμα 4.29.1. Γραφική αναπαράσταση α) της ροπής και β) της διακύμανσης της ροπής για μεταβολή του ύψους δοντιού.



Σχήμα 4.29.2. Γραφική αναπαράσταση γ) της αρμονικής παραμόρφωσης και δ) των απωλειών ισχύος για μεταβολή του ύψους δοντιού.

Το ολικό μέγιστο της αντικειμενικής συνάρτησης με βάση την ανάλυση της παραμέτρου ύψους δοντιού (L_t) δίνεται για την τιμή :

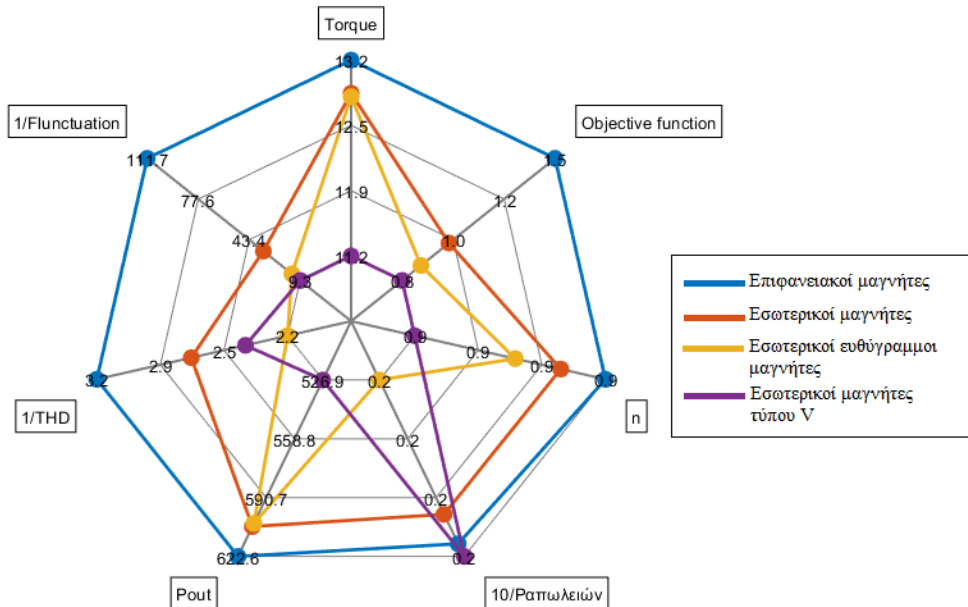
$$L_t = 14.49 \text{ mm}$$

4. 18

Θεωρώντας πλέον σταθερή αυτή την τιμή για το ύψος δοντιού θα συνεχιστεί η μελέτη.

4.2.2.7 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου τοπολογίας μαγνήτη

Θεωρήθηκαν τέσσερις (4) διαφορετικές τοπολογίες μαγνητών, στις οποίες τέθηκε σταθερό πάχος μαγνήτη, και σταθερή γωνία εύρους του. Όπως και στην μελέτη της διαμόρφωσης δοντιών, για την ορθή αναπαράσταση των αποτελεσμάτων των κινητήρων με διαφορετικές τοπολογίες μαγνητών, έγινε χρήση της τεχνικής Taguchi. Παρακάτω φαίνεται η χρήση της τεχνικής Taguchi για τις τέσσερις διαφορετικές τοπολογίες μαγνητών.



Εικόνα 4.30. Γραφική αναπαράσταση των χαρακτηριστικών κινητήρων με διαφορετικές τοπολογίες μαγνητών.

Όπως εύκολα φαίνεται, η τοπολογία επιφανειακών μαγνητών αποδίδει καλύτερα από τις υπόλοιπες σε όλα τα σημεία κυριάρχου ενδιαφέροντος (ροπή, ταλαντώσεις ροπής, ισχύς εξόδου, απώλειες ισχύος και αρμονική παραμόρφωση).

Συνεπώς η μελέτη θα συνεχιστεί θεωρώντας αυτή την τοπολογία μαγνητών.

4.2.2.8 Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρου πάχους διακένου (*lg*)

Το βήμα ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρου πάχους διακένου, θεωρήθηκε αρχικά ίσο με 0.05mm. Εν συνεχεία στις περιοχές εμφάνισης τοπικού μεγίστου η τιμή του βήματος ανάλυσης θεωρήθηκε ίση με 0.01mm. Εν κατακλείδι για την καλύτερη προσέγγιση του ολικού μεγίστου θεωρήθηκε βήμα ανάλυσης ίσο με 0.001mm.

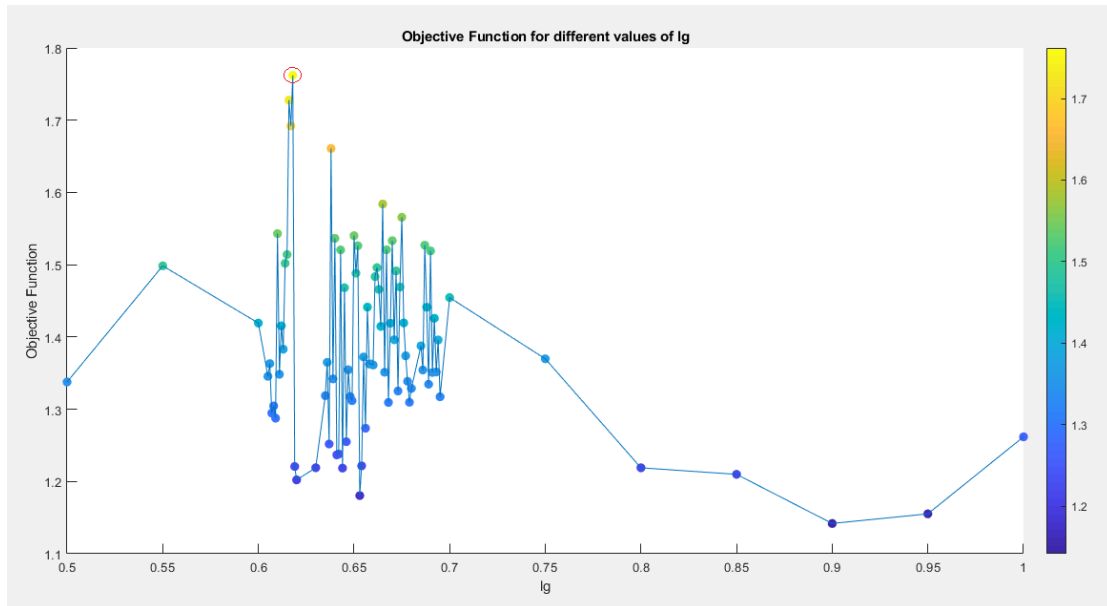
Το πάχος διακένου αποτελεί παράμετρο στην οποία τα χαρακτηριστικά μεγέθη ενδιαφέροντος του κινητήρα εμφανίζουν ιδιαίτερα μεγάλη ευαισθησία. Όπως φαίνεται και στα Σχήματα 4.32.1 και 4.32.2, μικρές αλλαγές στην τιμή του, επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τις τιμές ροπής, ταλαντώσεων ροπής, αρμονικής παραμόρφωσης και απωλειών ισχύος. Για τον λόγο αυτό, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.17, πραγματοποιήθηκε μελέτη ανάμεσα σε έναν αρκετά μεγάλο αριθμό τιμών πάχους διακένου.

Οι τιμές πάχους διακένου ανάμεσα στις οποίες έγινε η ανάλυση ευαισθησίας είναι οι εξής:

Πίνακας 4.17. Τιμές μελέτης πάχους διακένου.

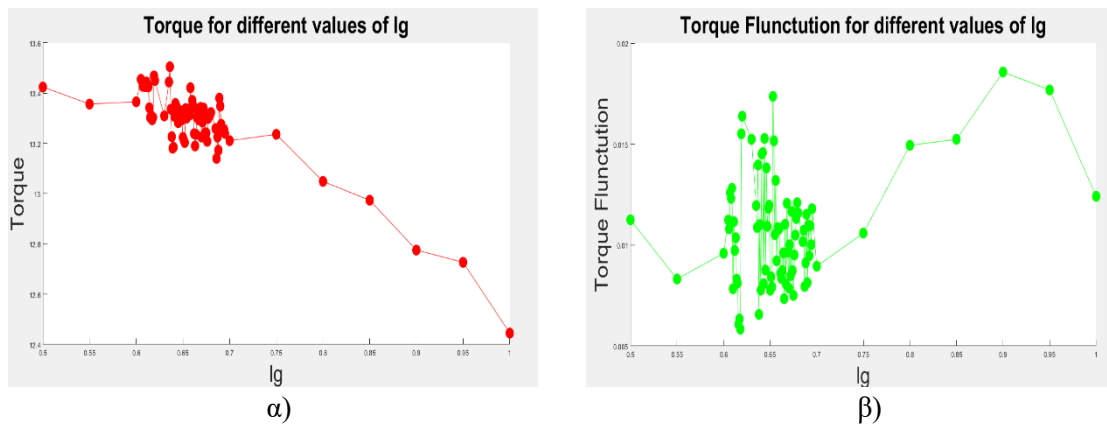
lg (mm)											
0.500			0.550		0.600						
0.605	0.606	0.607	0.608	0.609	0.610	0.611	0.612	0.613	0.614	0.615	
0.616		0.617		0.618		0.619		0.620			
0.630											
0.635	0.636	0.637	0.638	0.639	0.640	0.641	0.642	0.643	0.644	0.645	
0.646	0.647	0.648	0.649	0.650	0.651	0.652	0.653	0.654	0.655	0.656	
0.657	0.658	0.659	0.660	0.661	0.662	0.663	0.664	0.665	0.666	0.667	
0.668	0.669	0.670	0.671	0.672	0.673	0.674	0.675	0.676	0.677	0.678	
0.679		0.680									
0.685	0.686	0.687	0.688	0.689	0.690	0.691	0.692	0.693	0.694	0.695	
0.700		0.750		0.800		0.850		0.900		0.950	0.1000

Στο Σχήμα 4.31 παρουσιάζεται η μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, για τις προαναφερθείσες τιμές πάχους διακένου:

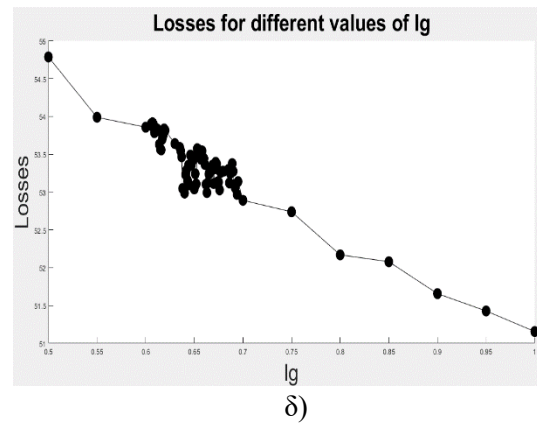
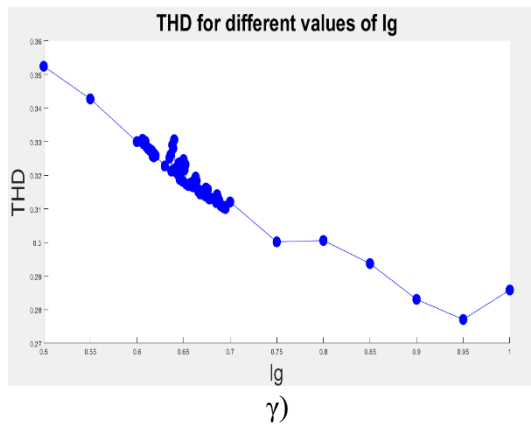


Σχήμα 4.31. Γραφική αναπαράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης για μεταβολή του πάχους διακένου.

Τα γραφήματα που περιγράφουν ξεχωριστά την ροπή, την διακύμανση της ροπής, την αρμονική παραμόρφωση και τις απώλειες ισχύος φαίνονται παρακάτω:



Σχήμα 4.32.1. Γραφική αναπαράσταση α) της ροπής και β) της διακύμανσης της ροπής για μεταβολή του πάχους διακένου.



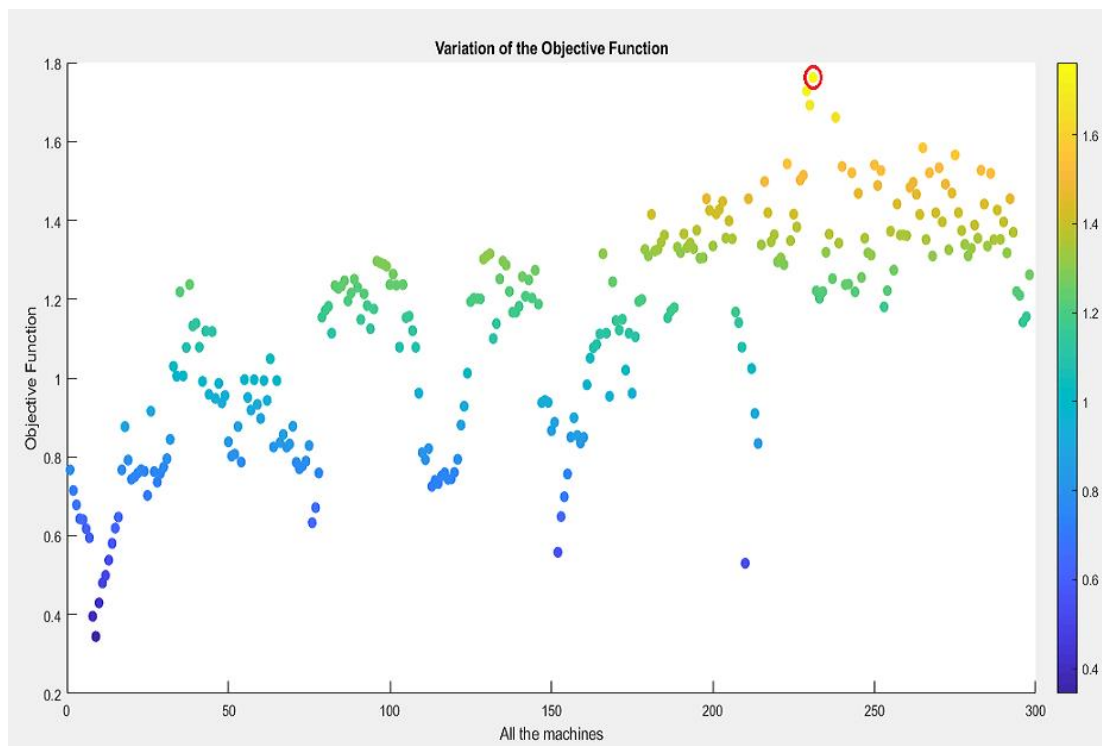
Σχήμα 4.32.2. Γραφική αναπαράσταση γ) της αρμονικής παραμόρφωσης και δ) των απωλειών ισχύος για μεταβολή του πάχους διακένου.

Το ολικό μέγιστο της αντικειμενικής συνάρτησης με βάση την ανάλυση της παραμέτρου πάχους διακένου (lg) εμφανίζεται στην τιμή :

$$lg = 0,618 \text{ mm}$$

4.2.2.9 Χαρακτηριστικά μεγέθη ενδιαφέροντος τελικού κινητήρα

Συνολικά μελετήθηκαν διακόσιοι ενενήντα οκτώ (298) τριφασικοί κινητήρες με συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των φάσεων με βάση την ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων όπως αυτή ορίστηκε στα παραπάνω υπό-κεφάλαια. Παρακάτω παρουσιάζεται γραφικά η διακύμανση της αντικειμενικής συνάρτησης, όπως αυτή προέκυψε από όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν:



Σχήμα 4.33. Γραφική αναπαράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης καθ' όλη την διάρκεια της διαδικασίας

Τα χαρακτηριστικά του προκύπτοντος, εκ της παραπάνω ανάλυσεως ευαισθησίας παραμέτρων, κινητήρα φαίνονται παρακάτω:

- ❖ $P = 14, Q = 18 \Rightarrow q=3/7$
- ❖ $f=52.5 \text{ Hz}$
- ❖ $\Sigma AI=450$
- ❖ $T_{mean} = 13.30 \text{ Nm}$
- ❖ $\text{Ταλαντώσεις Ροπής (\%)} = 0,58$
- ❖ $\text{Αρμονική Παραμόρφωση THD (\%)} = 32.55$
- ❖ $\text{Ισχύς εξόδου} = 627 \text{ W}$
- ❖ $\text{Απώλειες ισχύος} = 54$
- ❖ $\text{Απόδοση ισχύος (\%)} = 92.1$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Συγκριτική μελέτη κινητήρων μονίμων μαγνητών με βάση τα χαρακτηριστικά σιδηρομαγνητικών λαμαρινών

5.1 Εισαγωγή

Ο σιδηρομαγνητισμός είναι ο βασικός μηχανισμός με τον οποίο συγκεκριμένα υλικά, όπως ο σίδηρος, σχηματίζουν μόνιμους μαγνήτες, ή έλκονται από μαγνήτες. Στη φυσική, διακρίνονται πολλοί διαφορετικοί τύποι μαγνητισμού. Ο σιδηρομαγνητισμός είναι ο πιο ισχυρός τύπος. Είναι ο μόνος που συνήθως δημιουργεί δυνάμεις οι οποίες είναι αρκετά ισχυρές για να γίνουν αισθητές και είναι υπεύθυνες για τα συνηθισμένα φαινόμενα του μαγνητισμού που εμφανίζονται στην καθημερινή ζωή. Μόνο λίγες ουσίες είναι σιδηρομαγνητικές. Οι συνηθισμένες είναι σίδηρος, νικέλιο, κοβάλτιο και τα περισσότερα από τα κράματά τους, μερικές ενώσεις των σπανίων γαιών και κάποια φυσικώς απαντώμενα ορυκτά όπως ο μαγνητίτης.

Ο σιδηρομαγνητισμός είναι πολύ σημαντικός στη βιομηχανία και τη σύγχρονη τεχνολογία και είναι η βάση για πολλές ηλεκτρικές και ηλεκτρομαγνητικές συσκευές όπως οι ηλεκτρομαγνήτες, οι ηλεκτρικοί κινητήρες, οι γεννήτριες, οι μετασχηματιστές, η μαγνητική αποθήκευση κ.α. Μια σχετικά νέα τάξη εξαιρετικά ισχυρών σιδηρομαγνητικών υλικών είναι οι μαγνήτες των σπανίων γαιών. Περιέχουν στοιχεία των λανθανιδών που είναι γνωστά για την ικανότητα τους να φέρουν μεγάλες μαγνητικές ροπές σε καλά εντοπισμένα f-τροχιακά.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μία συγκριτική μελέτη, βασισμένη στις γεωμετρίες που προέκυψαν από την ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων του Κεφαλαίου 4, ανάμεσα σε διαφορετικά σιδηρομαγνητικά υλικά κατασκευής των κινητήρων.

Εν πρώτοις πραγματοποιείται μία θεωρητική ανάλυση αναφορικά με διαφορετικούς τύπους σιδηρομαγνητικών υλικών, στους οποίους συμπεριλαμβάνονται κράματα πυριτίου-σιδήρου, κοβαλτίου-σιδήρου αλλά και ο καθαρός σίδηρος.

Ακολουθεί η σχεδιαστική μελέτη των υλικών αυτών, η οποία διεκπεραιώνεται εφαρμόζοντάς τα ως κατασκευαστικά υλικά στις δύο γεωμετρίες ηλεκτρικών κινητήρων, οι οποίες αναδείχθηκαν στο Κεφάλαιο 4.

5.2 Θεωρητική ανάλυση σημαντικότητας σιδηρομαγνητικών λαμαρινών ως κατασκευαστικών υλικών ηλεκτρικού κινητήρα

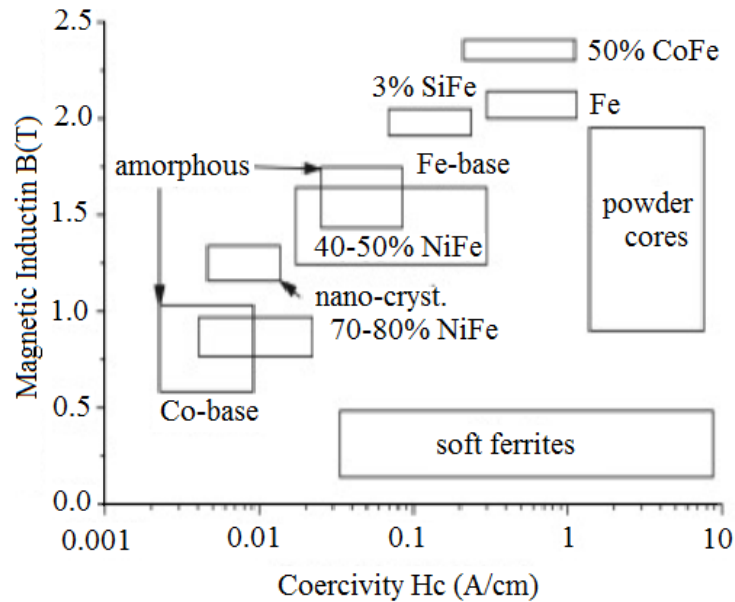
Από την αρχική κιάλας θεωρητική προσέγγιση του προβλήματος, κατά την οποία κατεγράφησαν οι ηλεκτρομαγνητικές σχέσεις που διέπουν αυτό, διαφαίνεται η σημαντικότητα των κατασκευαστικών υλικών του κινητήρα. Σε μία πληθώρα εκ των σχέσεων αυτών, όπως στην εξίσωση Poisson, γίνεται χρήση μεγεθών όπως ηλεκτρική και μαγνητική διαπερατότητα, τα οποία αποτελούν αποκλειστικά συνάρτηση των κατασκευαστικών υλικών του κινητήρα. Συγκεκριμένα από την προαναφερθείσα εξίσωση, προκύπτει η τιμή του διανυσματικού δυναμικού A , μέσω του οποίου υπολογίζονται μεγέθη όπως η μαγνητική ροή, και εμμέσως η παραγόμενη αντί-ΗΕΔ του κινητήρα. Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τις σχέσεις 2.44 και 2.47, καθώς και από την ανάλυση της Παραγράφου 2.4.3.2.3 του Κεφαλαίου 2, περί των απωλειών ισχύος σιδήρου ενός ηλεκτρικού κινητήρα, διαφαίνεται πως η χρήση διαφορετικών σιδηρομαγνητικών υλικών επιφέρει σημαντικές αλλαγές τόσο στις απώλειες δυννορευμάτων, όσο και στις απώλειες υστέρησης του κινητήρα. Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 3, η ειδική μαγνητική φόρτιση, λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται ανάμεσα σε ένα μέγιστο άνω άκρο, και ένα ελάχιστο κάτω άκρο. Το μέγιστο αυτό άνω άκρο της μαγνητικής φόρτισης εξαρτάται από το φαινόμενο κορεσμού του σιδηρομαγνητικού υλικού στα δόντια του στάτη. Το σημείο κορεσμού ενός σιδηρομαγνητικού υλικού, διαφαίνεται από την καμπύλη μαγνήτισης του, όπως στο Σχήμα 3.1 του Κεφαλαίου 3. Ταυτόχρονα από την σχέση 3.17, αναδεικνύεται η σημασία του μεγέθους της ειδικής μαγνητικής φόρτισης, και συνεπώς η σημασία επιλογής του καταλληλότερου για την εκάστοτε εφαρμογή υλικού, στην ισχύ εξόδου του ηλεκτρικού κινητήρα. Υψηλή τιμή μαγνητικής φόρτισης συνεπάγεται αντίστοιχα υψηλή τιμή επιδιδόμενης ροπής και αποδιδόμενης ισχύος, ωστόσο επιφέρει υψηλές απώλειες πυρήνα ιδιαίτερα στο σημείο κορεσμού του σιδηρομαγνητικού υλικού.

5.2.1 Θεωρητική περιγραφή χρησιμοποιηθέντων υλικών

Σε μια ηλεκτρική μηχανή, οι μαγνητικές απώλειες ή απώλειες πυρήνα οφείλονται στο μαλακό μαγνητικό υλικό που λειτουργεί υπό ένα μαγνητικό πεδίο το οποίο μεταβάλλεται με το χρόνο. Μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά είναι εκείνα που η κανονική καμπύλη μαγνήτισης εμφανίζει μεγάλη κλίση, ενώ ο βρόχος υστέρησης έχει μικρό εμβαδόν. Εξαιτίας αυτού, οι απώλειες υστέρησης είναι μειωμένες. Μερικά παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι ο μαλακός σίδηρος, ο πυριτιούχος χάλυβας, τα κράματα κοβαλτίου-σιδήρου, τα κράματα νικελίου-σιδήρου τύπου Perm alloy και άλλα. Οι απώλειες πυρήνα συνίστανται σε απώλειες δυννορευμάτων που προκύπτουν από τα κυκλοφορούντα ηλεκτρικά ρεύματα που προκαλούνται σε αγωγία υλικά (στον ηλεκτρικό χάλυβα που χρησιμοποιείται στον στάτορα και το χαλκό που χρησιμοποιείται στις περιελίξεις του κινητήρα) και απώλειες μαγνητικής υστέρησης που είναι ανάλογες με την κλειστή περιοχή του B-H βρόχου του συγκεκριμένου υλικού. Τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά του μαλακού μαγνητικού υλικού είναι:

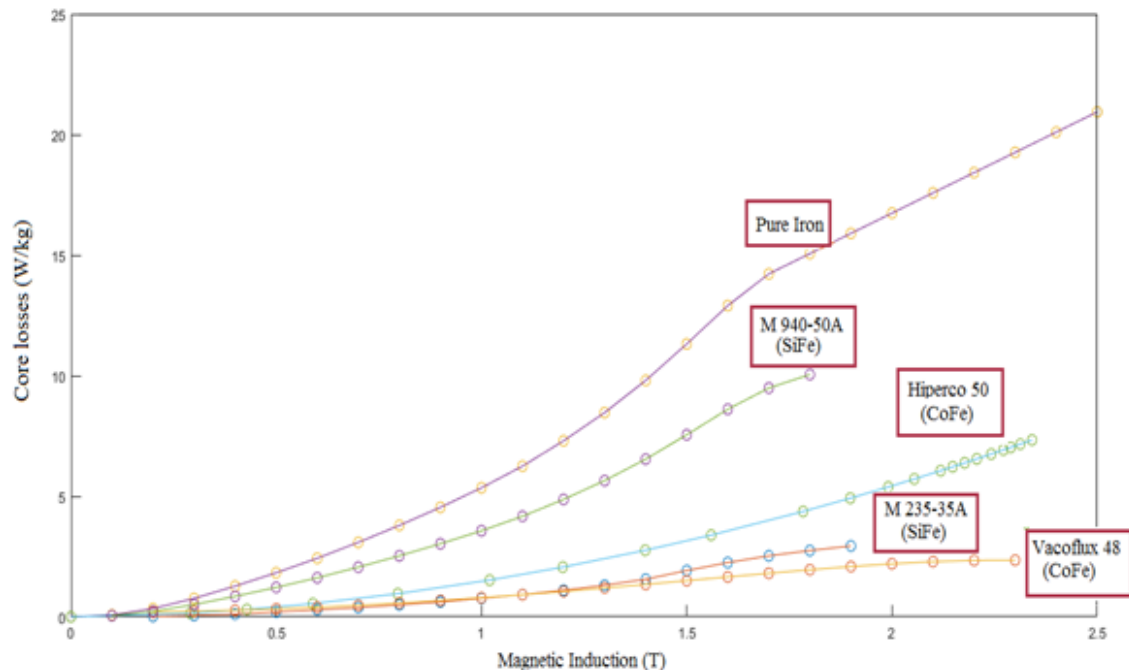
- Υψηλή επαγωγή κορεσμού για ελαχιστοποίηση του βάρους και του όγκου των τμημάτων σιδήρου.
- Υψηλή μαγνητική διαπερατότητα για το σχεδιασμό ενός μαγνητικού κυκλώματος χαμηλής απροθυμίας.
- Χαμηλή μαγνητική αντίσταση για να ελαχιστοποιήσει τις απώλειες υστέρησης.
- Υψηλή ηλεκτρική αντίσταση ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες από φούσκες ή δυννορεύματα (η ελαχιστοποίηση των δυννορευμάτων επιτυγχάνεται επίσης με τη χρήση λεπτών ελασμάτων που καλύπτονται από ένα λεπτό μονωτικό στρώμα για την παροχή μόνωσης, διαδικασία που ονομάζεται έλαση).

Αυτές οι επιθυμητές μαγνητικές ιδιότητες δεν απαντώνται σε ένα υλικό, καθώς υπάρχουν πολλοί παράγοντες που τις επηρεάζουν. Οι μαγνητικές ιδιότητες ενός υλικού μπορούν να προσαρμοστούν με την προσθήκη χημικών στοιχείων, τη μηχανική κατεργασία του υλικού και τη θερμική επεξεργασία. Τα χαρακτηριστικά μιας σειράς μαλακών μαγνητικών υλικών φαίνονται στο παρακάτω γράφημα μαγνητικής επαγωγής συναρτήσει του πεδίου ([13]):



Σχήμα 5.1. Γράφημα αναπαράστασης μαγνητικής επαγωγής διαφορετικών υλικών.

Παρακάτω διαφαίνονται καμπύλες απωλειών πυρήνα συναρτήσει της μαγνητικής επαγωγής, για κάποια εκ των ανωτέρω υλικών:



Σχήμα 5.2. Καμπύλη απωλειών πυρήνα διάφορων σιδηρομαγνητικών υλικών.

5.2.1.1 Έλαση σιδήρου

Κατά την κατεργασία μετάλλων, η έλαση είναι μια διαδικασία ανασχηματισμού στην οποία μεταλλικό υλικό μεταφέρεται μέσω ενός ή περισσοτέρων ζευγών κυλίνδρων για να μειωθεί το πάχος του και να γίνει ομοιόμορφο. Η ιδέα είναι παρόμοια με την κύλιση της ζύμης. Η κύλιση ταξινομείται ανάλογα με τη θερμοκρασία του μεταλλικού κυλίνδρου. Εάν η θερμοκρασία του μετάλλου είναι πάνω από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσής του, τότε η διαδικασία είναι γνωστή ως θερμή έλαση. Εάν η θερμοκρασία του μετάλλου είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσής του, η διαδικασία είναι γνωστή ως ψυχρή έλαση.

Η θερμή έλαση είναι μια διαδικασία χύτευσης που περιλαμβάνει την κύλιση του υλικού σε υψηλή θερμοκρασία (τυπικά σε θερμοκρασία πάνω από 1700 ° F), η οποία είναι ανώτερη από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσής του. Όταν το υλικό βρίσκεται πάνω από τη θερμοκρασία αυτή, μπορεί να διαμορφωθεί πολύ εύκολα. Αφότου επανέλθει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, θα συρρικνωθεί ελαφρώς, δίνοντας έτσι μικρότερο έλεγχο στο μέγεθος και το σχήμα του τελικού προϊόντος σε σύγκριση με την ψυχρή έλαση. Τα προϊόντα θερμής έλασης χρησιμοποιούνται σε καταστάσεις όπου δεν απαιτούνται ακριβή σχήματα και ανοχές.

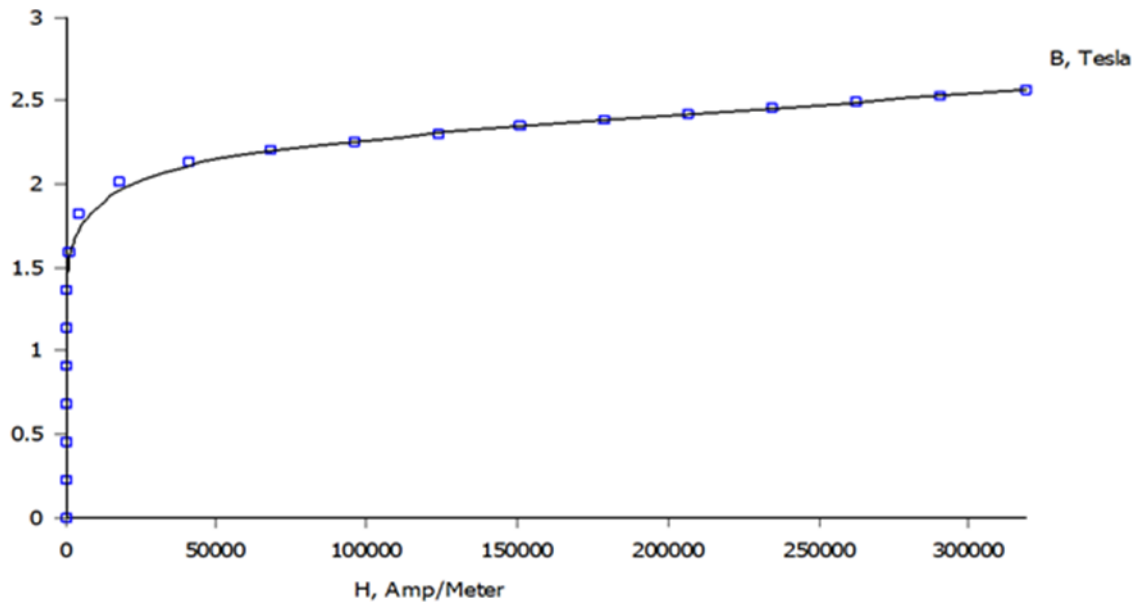
Η ψυχρή έλαση είναι ουσιαστικά θερμή έλαση, η οποία ακολουθείται από περαιτέρω επεξεργασία. Η επεξεργασία αυτή γίνεται σε μύλους ψυχρής μείωσης, όπου το υλικό ψύχεται (σε θερμοκρασία δωματίου) και ακολουθεί ανόπτηση. Αυτή η διαδικασία θα παράγει ένα υλικό με μεγαλύτερες ανοχές και ευρύτερο φάσμα διαστάσεων και επιφανειών. Αναφορικά με τα ελάσματα ψυχρής έλασης η ανόπτηση στην οποία αυτά υποβάλλονται τα καθιστά πιο μαλακά από τα ελάσματα θερμής έλασης. Τα προϊόντα ψυχρής έλασης χρησιμοποιούνται σε οποιοδήποτε έργο όπου οι ανοχές, η κατάσταση της επιφάνειας, η ομόκεντροτητα και η ευθύτητα είναι οι κύριοι παράγοντες.

5.2.1.2 Καθαρός σίδηρος

Ο καθαρός σίδηρος είναι ένα μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό με μαγνητισμό κορεσμού $M_s = 1.71 \cdot 10^6$ A/m, μόνιμη μαγνητική επαγωγή 0,8 T και χαμηλή μαγνητική αντίσταση 80A/m. Αυτές οι ιδιότητες εξηγούν γιατί ο σίδηρος χρησιμοποιείται ευρέως στην ηλεκτρομαγνητική. Ωστόσο, οι απώλειες πυρήνα υψηλής πυκνότητας έως και των 500W / kg σε υψηλές συχνότητες, δρουν για να μειώσουν την ηλεκτρομαγνητική του ικανότητα. Συνεπώς ο καθαρός σίδηρος πρέπει να είναι κραματοποιημένος, π.χ. με πυρίτιο, ώστε να είναι κατάλληλος για χρήση σε οποιαδήποτε εφαρμογή, και άρα ως κατασκευαστικό υλικό κινητήρων. Παρόλα αυτά ο καθαρός σίδηρος μπορεί να επάγει πολύ μεγάλες τιμές μαγνήτισης.

Η χαρακτηριστική συνάρτηση μαγνητικής επαγωγής συναρτήσει του εφαρμοζόμενου πεδίου του καθαρού σιδήρου φαίνεται παρακάτω, στο Σχήμα 5.3.

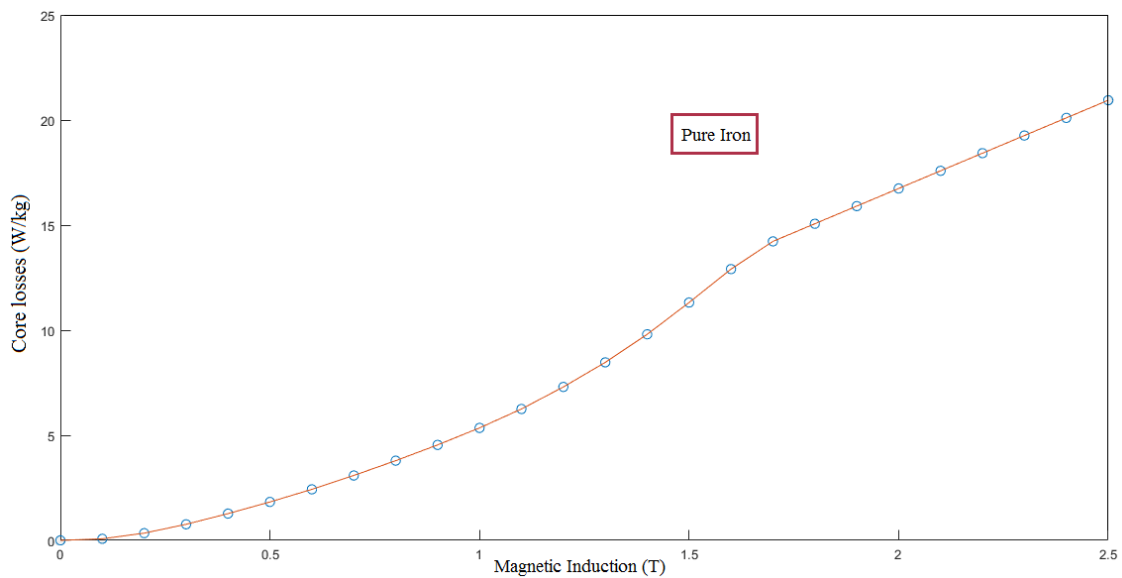
Από το εν λόγω γράφημα φαίνεται πως ο καθαρός σίδηρος, λαμβάνει τιμές μαγνητικής επαγωγής κοντά στα 2.5 T. Η προαναφερθείσα τιμή είναι υψηλότερη απ' όλες όσες θα μελετηθούν, ωστόσο εύκολα φαίνεται ότι η μέγιστη αυτή τιμή μαγνητικής επαγωγής στον σίδηρο, εμφανίζεται σε πολύ υψηλές τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου, και συνεπώς ηλεκτρικής φόρτισης. Η παρατήρηση αυτή, αναιρεί το πλεονέκτημα των υψηλότερων (σε σχέση με αυτές των υπολοίπων μαλακών μαγνητικών υλικών) τιμών μαγνητικής επαγωγής του καθαρού σιδήρου για εφαρμογές, όπως αυτή της παρούσας διπλωματικής, στις οποίες οι φορτίσεις είναι αισθητά χαμηλότερες ([15]).



Σχήμα 5.3. Καμπύλη μαγνήτισης καθαρού σιδήρου

Ταυτόχρονα η σημασία των απωλειών σιδήρου δεν μπορεί να παραληφθεί, καθώς όπως θα φανεί και στο κάτωθι διάγραμμα, οι απώλειες πυρήνα του καθαρού σιδήρου σαν συνάρτηση της τιμής μαγνητικής επαγωγής που τον διαρρέει, είναι σημαντικά αυξημένες.

Παρακάτω παρατίθεται το διάγραμμα απωλειών σιδήρου εκφρασμένων σε W/kg, συναρτήσει της μαγνητικής επαγωγής:



Σχήμα 5.4. Καμπύλη απωλειών πυρήνα καθαρού σιδήρου

Για τον λόγο αυτό απαιτείται η κραματοποίηση του με κάποιο άλλο υλικό, με σκοπό να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του σώματος ενός ηλεκτρικού κινητήρα.

5.2.1.3 Ηλεκτρικοί χάλυβες πυριτίου-σιδήρου

Το πιο συνηθισμένο μαλακό μαγνητικό υλικό που χρησιμοποιείται στις ηλεκτρικές μηχανές είναι ο ηλεκτρικός χάλυβας πυριτίου-σιδήρου με τη μορφή λεπτών ελασμάτων. Οι χάλυβες πυριτίου είναι κράματα σιδήρου και πυριτίου που έχουν σημαντικές ηλεκτρικές εφαρμογές (κινητήρες, μετασχηματιστές κ.λπ.)

Η προσθήκη πυριτίου σε μαλακό σίδηρο οδηγεί σε σημαντική μείωση της μαγνητικής αντίστασης, ελαφρά μείωση της μαγνήτισης κορεσμού και αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης. Επιπλέον, το κράμα πυριτίου αποδίδει μια μείωση στη σταθερά μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απώλειας υστέρησης. Ο κύριος περιορισμός στην υπερβολική προσθήκη πυριτίου προέρχεται από την προοδευτική μείωση της μαγνήτισης κορεσμού και την αύξηση της ευθραυστότητας του υλικού.

Υπάρχουν δύο διαφορετικές κατηγορίες ηλεκτρικών χάλυβων: α) μη προσανατολισμένα ιστροπικά προϊόντα με περιεκτικότητα πυριτίου στην περιοχή 1-3.5% και β) ανισότροπα προϊόντα με προσανατολισμό κόκκων που περιέχουν 2.9-3.15% πυρίτιο (+ αλουμίνιο). Τα επίπεδα πυριτίου πάνω από 3.5% έχουν ως αποτέλεσμα ο χάλυβας να γίνει πολύ εύθραυστος και δύσκολος στην κατεργασία.

Οι μη προσανατολισμένοι χάλυβες χαρακτηρίζονται από μια ιστροπική δομή κατά προσέγγιση. Αυτό τους καθιστά κατάλληλους για όλες τις εφαρμογές όπου απαιτούνται ισότροπες μαγνητικές ιδιότητες. Κάποιο αλουμίνιο και μαγγάνιο προστίθενται επίσης για την επίτευξη υψηλότερης ηλεκτρικής αντίστασης χωρίς επιβλαβείς επιδράσεις στις μηχανικές ιδιότητες. Τα υλικά κορυφαίας ποιότητας έχουν περίπου 4% πυρίτιο (+ αλουμίνιο) και παρουσιάζουν απώλειες 2.1-2.3 W/kg στα 1.5 T και 50 Hz σε ελάσματα πάχους 0.35-0.50 mm. Τα υλικά με βελτιωμένες απώλειες αναπτύσσονται με προσεκτικό έλεγχο της περιεκτικότητας σε ακαθαρσίες, του μεγέθους των κόκκων, της κρυσταλλογραφικής υφής, της κατάστασης της επιφάνειας και των υπολειμματικών τάσεων. Οι ακαθαρσίες όπως ο άνθρακας, το άζωτο, το θείο και το οξυγόνο συμβάλλουν στην αύξηση των απωλειών υστέρησης, επειδή σχηματίζουν ιζήματα που δρουν ως κέντρα πρόσδεσης σε κινούμενα τοιχώματα. Έχουν επίσης έμμεση επιβλαβή επίδραση, επειδή παρεμποδίζουν την ανάπτυξη κόκκων και επηρεάζουν αρνητικά το σχηματισμό ευνοϊκών υφών.

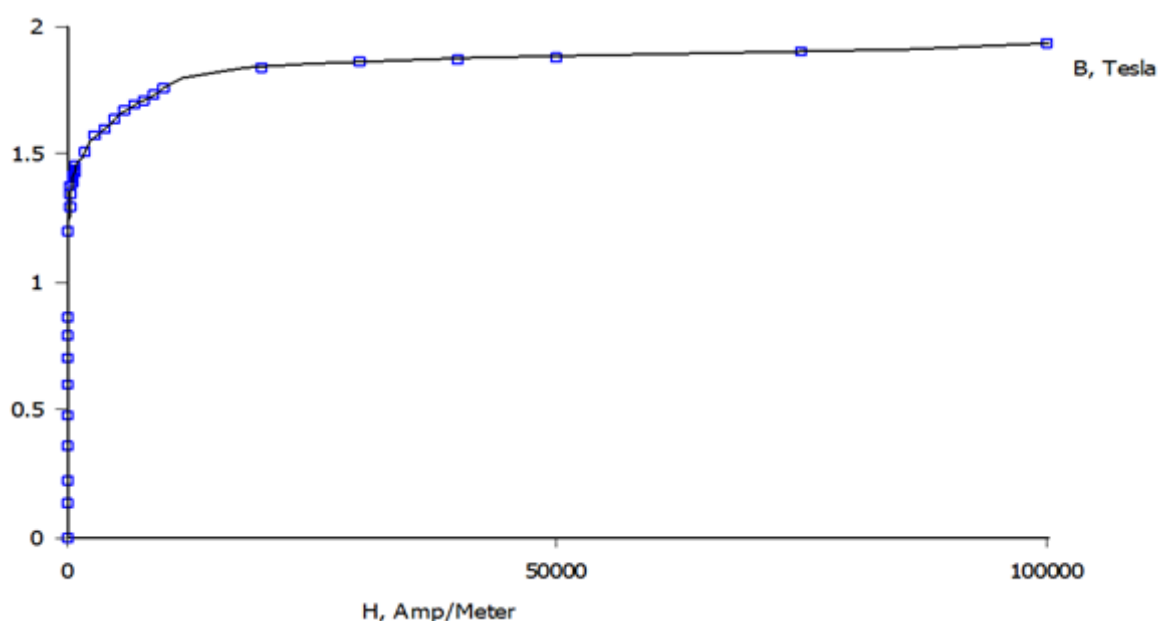
Σε αντίθεση με τους μη προσανατολισμένους χάλυβες, οι χάλυβες με προσανατολισμένους κόκκους χαρακτηρίζονται από ισχυρές ανισότροπες ιδιότητες. Αυτά τα υλικά περιέχουν μεταξύ 2.9 και 3.2% κατά βάρος πυρίτιο. Ως αποτέλεσμα εξαιρετικά εξελιγμένων μεταλλουργικών διεργασιών εκλεκτικής ανάπτυξης κόκκων, μία στρωματοποίηση με προσανατολισμό κόκκων χαρακτηρίζεται από μία συγκεκριμένη υφή, γνωστή ως υφή Goss, στην οποία όλοι οι κόκκοι κρυστάλλου έχουν ένα από τους άξονές τους κοντά στην κατεύθυνση κυλίσεως ελασματοποίησης. Το γεγονός αυτό, μαζί με το μεγάλο μέγεθος κόκκων αυτών των υλικών (στην κλίμακα χιλιοστών-εκατοστών) και την χαμηλή περιεκτικότητα σε ακαθαρσίες αποδίδει απώλειες πυρήνα κατά μία τάξη μεγέθους μικρότερες από εκείνες που είναι χαρακτηριστικές για μη προσανατολισμένους χάλυβες όταν η ελασματοποίηση μαγνητίζεται κατά μήκος της κατεύθυνσης. Οι προσανατολισμένοι χάλυβες έχουν τη χαμηλότερη απώλεια πυρήνα και χρησιμοποιούνται σε μετασχηματιστές, ενώ οι μη προσανατολισμένοι χάλυβες χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές μηχανές καθώς υπάρχουν διαφορετικές κατευθύνσεις ροής.

Οι οικιακές συσκευές κυριαρχούνται από κινητήρες γενικής χρήσης και επαγωγής χαμηλού κόστους, με απόδοση 60-70%. Η αναζήτηση χαμηλού κόστους οδηγεί σε κινητήρες που χρησιμοποιούν χαμηλότερης ποιότητας μη προσανατολισμένους ηλεκτρικούς χάλυβες και

παχύτερες ελασματοποιήσεις (τυπικά 0,65 mm), με το τελευταίο να έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του αριθμού των εργασιών σφράγισης που είναι απαραίτητες για την παραγωγή της στοιβάδας ελασματοποίησης του στάτορα ([12]).

5.2.1.3.1 Ηλεκτρικός χάλυβας πυριτίου-σιδήρου τύπου M235-35A

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η προσθήκη πυριτίου στον καθαρό σίδηρο, η οποία δημιουργεί έτσι ηλεκτρικούς χάλυβες πυριτίου σιδήρου, επιφέρει μικρές μειώσεις της μαγνήτισης κορεσμού, σημαντική μείωση της μαγνητικής αντίστασης και αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης του. Παρακάτω, στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η καμπύλη μαγνήτισης του υλικού M235-35A, στην οποία διαφαίνεται η μικρή αυτή μείωση μαγνήτισης σε σχέση με την αυτήν της καμπύλης του σιδήρου.

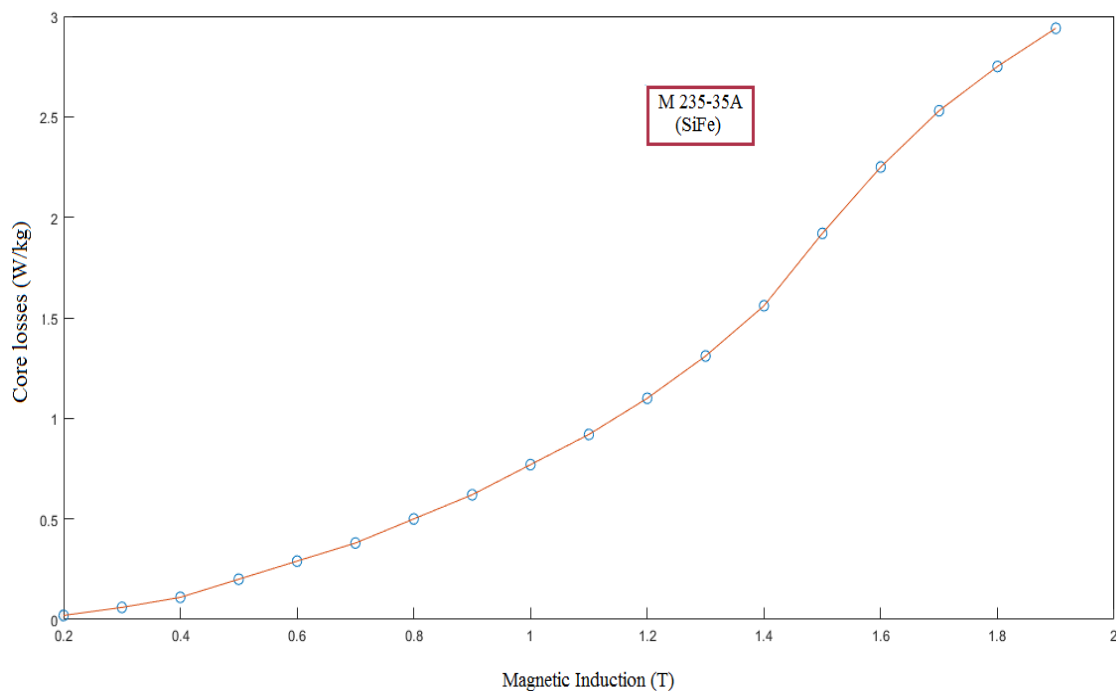


Σχήμα 5.5. Καμπύλη μαγνήτισης M 235-35A.

Ωστόσο η κραματοποίηση του σιδήρου με πυρίτιο, επιδρά σημαντικά στη μείωση των απωλειών πυρήνα που εμφανίζει το υλικό. Αυτό συμβαίνει καθώς το κράμα πυριτίου αποδίδει μια μείωση στη σταθερά μαγνητοκρυσταλλικής ανισοτροπίας. Φυσικά περιορισμός στην υπερβολική προσθήκη πυριτίου αποτελεί η προοδευτική μείωση της μαγνήτισης κορεσμού και την αύξηση της ευθραυστότητας του υλικού.

Η ελασματοποίηση του υλικού έχει γίνει σε πάχος 0.35mm.

Παρακάτω, στο Σχήμα 5.6, φαίνεται η καμπύλη απωλειών πυρήνα του χάλυβα πυριτίου-σιδήρου M235-35A, συναρτήσει της μαγνητικής επαγωγής.



Σχήμα 5.6. Καμπύλη απωλειών πυρήνα M 235-35A

Διαφάνεται πώς η προσθήκη πυριτίου επέφερε σημαντικότερη μείωση στις απώλειες πυρήνα του υλικού, σε ποσοστό άνω του 50%. Η παραπάνω θεώρηση οδηγεί στο συμπέρασμα πως η προσθήκη πυριτίου στον καθαρό σίδηρο κρίνεται απαραίτητη σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλό κόστος λειτουργίας, όπως οι ηλεκτρικοί κινητήρες.

5.2.1.3.2 Ηλεκτρικός χάλυβας πυριτίου-σιδήρου τύπου M940-50A

Εκ των διαφόρων κραμάτων ηλεκτρικού χάλυβα πυριτίου-σιδήρου, επιλέχθηκε ακόμα ένας τύπος. Ο λόγος για το υλικό M940-50A, η επιλογή του οποίου έγινε καθώς μεταξύ όλων των υπολοίπων εμφανίζει την υψηλότερη τιμή επιτρεπόμενης μαγνητικής επαγωγής. Ωστόσο, όπως θα φανεί και από τον παρακάτω πίνακα, η υψηλή αυτή τιμή μαγνητικής επαγωγής, ενέχει σημαντική αύξηση των απωλειών πυρήνα που εμφανίζει το εν λόγω υλικό.

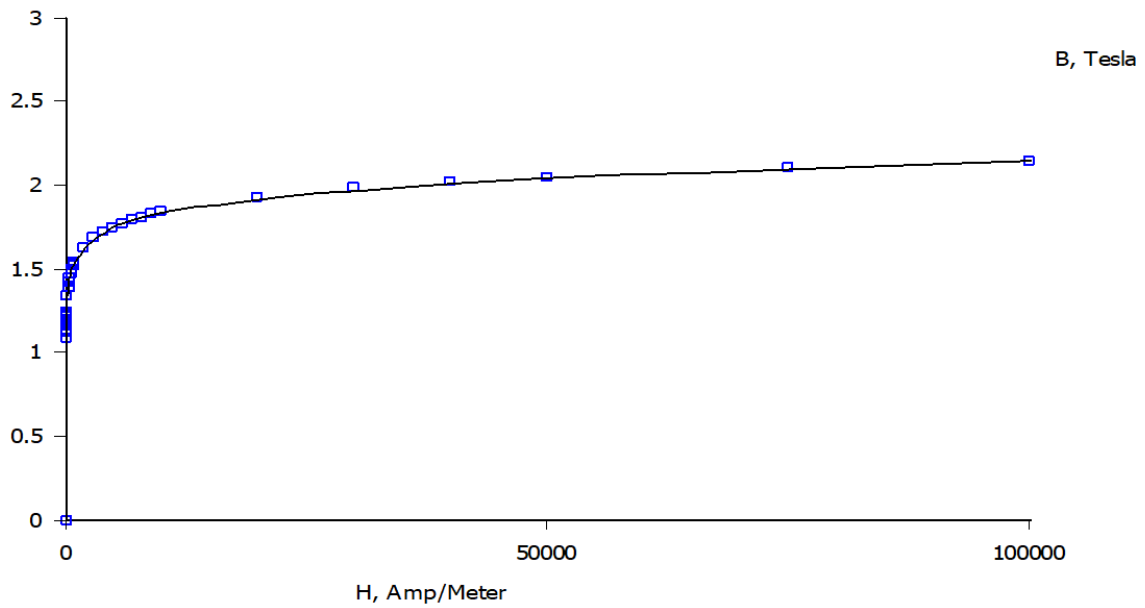
Αξίζει να αναφερθεί πως το υλικό M940-50A εμφανίζεται σε ελασματοποίηση των 0.5 mm, το οποίο δικαιολογεί τις αυξημένες απώλειες πυρήνα λόγω διννορευμάτων, καθώς αυτές εξαρτώνται από το πάχος ελάσματος, όπως εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 2.

Παρακάτω παρατίθενται όλα τα διαφορετικά κράματα πυριτίου-σιδήρου, με τα αντίστοιχα πάχη ελάσματοποίησής τους, τις μέγιστες απώλειές τους στα 50Hz, και ενδεικτικές τιμές μαγνητικής επαγωγής για την ίδια συχνότητα λειτουργίας. Τα υλικά αυτά αποτελούνται από διαφορετικά ποσοστά πυριτίου και σιδήρου, υποβάλλονται σε διαφορετική επεξεργασία και ελασματοποιούνται σε διαφορετικά πάχη ελάσματος. Όλα τα παραπάνω έχουν σαν αποτέλεσμα την δημιουργία των κάτωθι διαφορετικών υλικών.

Πίνακας 5.1. Χαρακτηριστικά διαφορετικών κραμάτων πυριτίου-σιδήρου

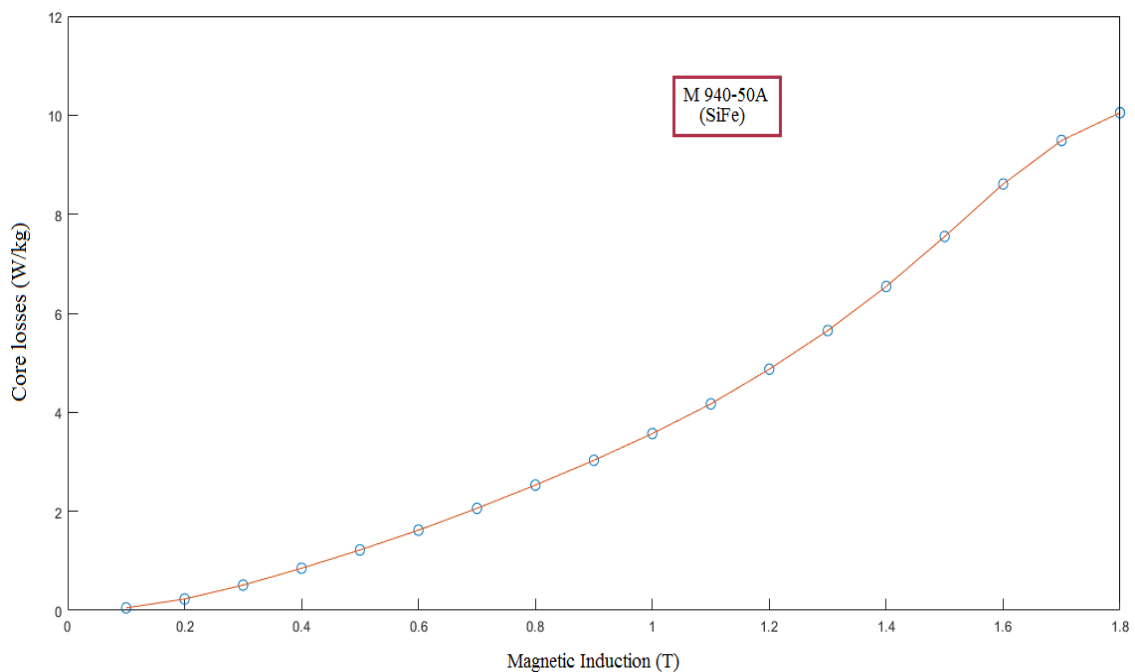
Grade EN 10106	Thickness mm	Maximum specific total loss at 50 Hz		Minimum magnetic polarization at 50 Hz		
		$\hat{J} = 1,5 \text{ T}$ W/kg	$1,0 \text{ T}^{**}$ W/kg	$\hat{H} = 2500$ T	5000 T	10000 T
M235-35A	0,35	2,35	0,95	1,49	1,60	1,70
M250-35A	0,35	2,50	1,00	1,49	1,60	1,70
M270-35A	0,35	2,70	1,10	1,49	1,60	1,70
M300-35A	0,35	3,00	1,20	1,49	1,60	1,70
M330-35A	0,35	3,30	1,30	1,49	1,60	1,70
M700-35A*	0,35	7,00	3,00	1,60	1,69	1,77
M250-50A	0,50	2,50	1,05	1,49	1,60	1,70
M270-50A	0,50	2,70	1,10	1,49	1,60	1,70
M290-50A	0,50	2,90	1,15	1,49	1,60	1,70
M310-50A	0,50	3,10	1,25	1,49	1,60	1,70
M330-50A	0,50	3,30	1,35	1,49	1,60	1,70
M350-50A	0,50	3,50	1,50	1,50	1,60	1,70
M400-50A	0,50	4,00	1,70	1,53	1,63	1,73
M470-50A	0,50	4,70	2,00	1,54	1,64	1,74
M530-50A	0,50	5,30	2,30	1,56	1,65	1,75
M600-50A	0,50	6,00	2,60	1,57	1,66	1,76
M700-50A	0,50	7,00	3,00	1,60	1,69	1,77
M800-50A	0,50	8,00	3,60	1,60	1,70	1,78
M940-50A	0,50	9,40	4,20	1,62	1,72	1,81
M310-65A	0,65	3,10	1,25	1,49	1,60	1,70
M330-65A	0,65	3,30	1,35	1,49	1,60	1,70
M350-65A	0,65	3,50	1,50	1,49	1,60	1,70
M400-65A	0,65	4,00	1,70	1,52	1,62	1,72
M470-65A	0,65	4,70	2,00	1,53	1,63	1,73
M530-65A	0,65	5,30	2,30	1,54	1,64	1,74
M600-65A	0,65	6,00	2,60	1,56	1,66	1,76
M700-65A	0,65	7,00	3,00	1,57	1,67	1,76
M800-65A	0,65	8,00	3,60	1,60	1,70	1,78
M1000-65A	0,65	10,00	4,40	1,61	1,71	1,80
M600-100A	1,00	6,00	2,60	1,53	1,63	1,72
M700-100A	1,00	7,00	3,00	1,54	1,64	1,73
M800-100A	1,00	8,00	3,60	1,56	1,66	1,75
M1000-100A	1,00	10,00	4,40	1,58	1,68	1,76

Ακολουθεί η καμπύλη μαγνήτισης του κράματος πυριτίου-σιδήρου M940-50A, όπως αυτή προέκυψε από τον Πίνακα 5.1.



Σχήμα 5.7. Καμπύλη μαγνήτισης M 940 – 50A .

Παρακάτω, στην καμπύλη απωλειών πυρήνα του χάλυβα πυριτίου-σιδήρου M940-50A συναρτήσεως της μαγνητικής επαγωγής, φαίνεται η σχετική αύξηση των απωλειών πυρήνα του εν λόγω υλικού:



Σχήμα 5.8. Καμπύλη απωλειών πυρήνα M 940-50A.

5.2.1.4 Κράματα κοβαλτίου-σιδήρου

Τα κράματα κοβαλτίου-σιδήρου (όπως το Permendur 49, Vacoflux 48, 49Co-49Fe-2V, Hiperco 50) έχουν την υψηλότερη τιμή μαγνητικού κορεσμού όλων των μαλακών μαγνητικών υλικών, όπως αυτό διαφαίνεται από το Σχήμα 5.1. Εν τούτοις έχουν το μειονέκτημα ενός πολύ υψηλότερου κόστους από τους χάλυβες πυριτίου-σιδήρου, αλλά χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου είναι επωφελής η μείωση του μεγέθους και του βάρους. Τα κράματα σιδήρου και κοβαλτίου χρησιμοποιούνται σε γεννήτριες αεροσκαφών, μερικούς κινητήρες 400 Hz και ενεργά μαγνητικά έδρανα. Σε μερικά ασάλινα κράματα, που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων, χρησιμοποιείται επίσης το κοβάλτιο για να αυξηθεί η αντοχή στη θερμότητα και στη φθορά. Ειδικά κράματα του αλουμινίου, του νικελίου, του κοβαλτίου και του σιδήρου, γνωστά ως Alnico, και άλλα του σαμαρίου με το κοβάλτιο (μαγνήτης σαμαρίου-κοβαλτίου) χρησιμοποιούνται στους μόνιμους μαγνήτες ([13],[14]).

5.2.1.4.1 Κράμα κοβαλτίου-σιδήρου τύπου Hiperco 50

Όπως προαναφέρθηκε, τα κράματα του συστήματος Fe-Co, αποτελούν μια σημαντική κατηγορία μαλακών μαγνητικών υλικών που χαρακτηρίζονται από υψηλό μαγνητισμό κορεσμού, σχετικά χαμηλή μαγνητική αντίσταση (H_c) και υψηλή αντοχή στη θερμοκρασία. Ειδικότερα, το κράμα Fe-Co-V (κράμα Hiperco 50) παρουσιάζει ιδιαίτερα υψηλή μαγνητική διαπερατότητα με το μέγιστο μαγνητικό κορεσμό, την ελάχιστη ηλεκτρική διαπερατότητα σε συνεχές ρεύμα, και σχετικά χαμηλή απώλεια πυρήνα εναλλασσόμενου ρεύματος. Το κράμα Hiperco 50 παράγεται μόνο σε μορφή λωρίδας και περιέχει μικρή προσθήκη νιοβίου (Nb) για βελτίωση των κόκκων κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας του μύλου και της τελικής θερμικής επεξεργασίας της ταινίας. Το κράμα χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή ελάσματος ρότορα και στάτορα σε κινητήρες και γεννήτριες για εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αεροσκάφη και πιο πρόσφατα σε μαγνητικά έδρανα και ηλεκτρικά οχήματα. Τα ελασματοποιημένα φύλλα σφραγίζονται στο επιθυμητό σχήμα από ταινίες ψυχρής έλασης και είναι τελικά ανοπτημένα σε προστατευτικό περιβάλλον - περιβάλλον υδρογόνου ή κενού - σε κατάλληλη θερμοκρασία για να παρέχει έναν βέλτιστο συνδυασμό μηχανικών και μαγνητικών ιδιοτήτων, ανάλογα με την εφαρμογή.

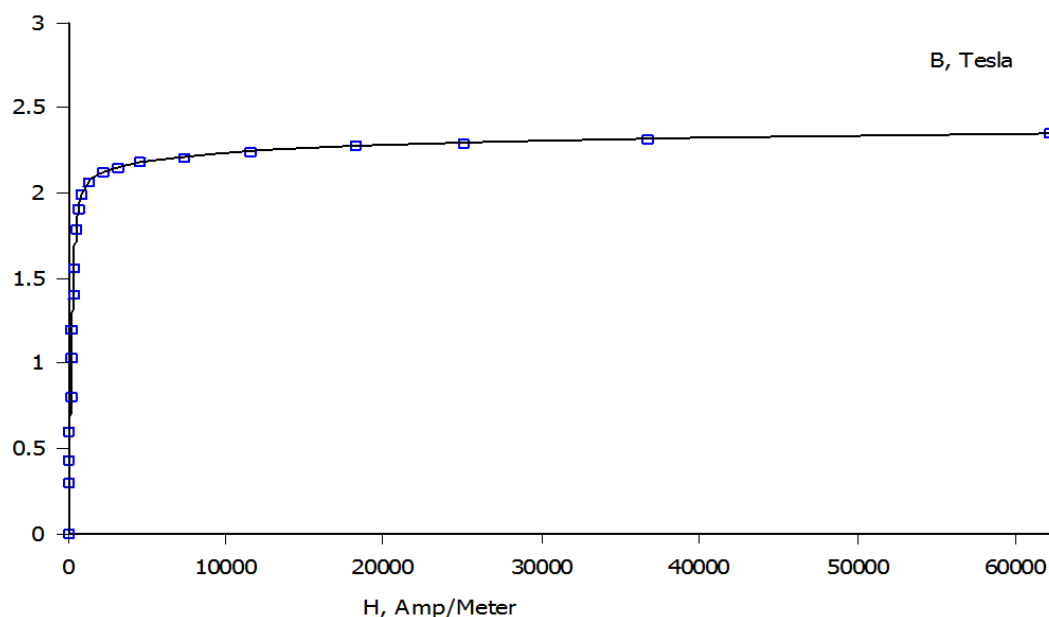
Η ελασματοποίηση του μπορεί να πραγματοποιηθεί σε διαφορετικά πάχη εκ των οποίων τα εξής:

1. 0.15 mm
2. 0.25 mm
3. 0.35 mm

Στην παρούσα μελέτη θεωρήθηκε ελασματοποίηση κράματος κοβαλτίου σιδήρου Hiperco 50, με πάχος ελάσματος 0.15mm.

Όπως προαναφέρθηκε το Hiperco 50, χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές μαγνητικής επαγωγής. Αυτό, για την παρούσα ανάλυση, σημαίνει πως έχει την δυνατότητα να επάγει μεγαλύτερες τιμές ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από τον στάτη στον δρομέα και συνεπώς για τα ίδια ρεύματα να επιφέρει υψηλότερη πυκνότητα ροπής στον κινητήρα. Ταυτόχρονα λόγω των σχετικών χαμηλών απωλειών πυρήνα, θα επιφέρει σχετικά χαμηλές, συγκριτικά με τον καθαρό σίδηρο, απώλειες και συνεπώς αρκετά καλές τιμές απόδοσης κινητήρα.

Παρακάτω φαίνεται η καμπύλη BH, που περιγράφει την συμπεριφορά της μαγνητικής επαγωγής του κοβαλτιούχου σιδήρου Hiperco 50 για αντίστοιχες τιμές επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου:

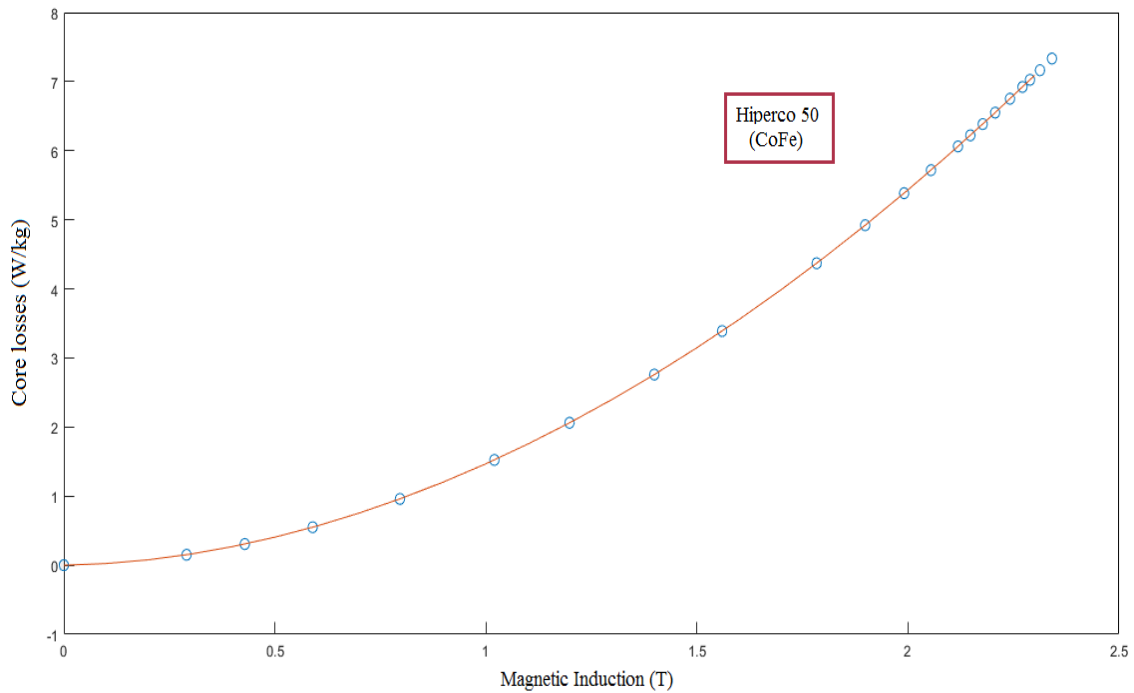


Σχήμα 5.9. Καμπύλη μαγνήτισης Hiperco 50

Από το παραπάνω γράφημα φαίνεται πως το Hiperco 50, λαμβάνει τιμές μαγνητικής επαγωγής κοντά στα 2.2 T , και συνεπώς όπως προαναφέρθηκε δύναται να επιβάλλει υψηλότερες τιμές ροπής στον ίδιο κινητήρα.

Επιπρόσθετα σημαντικό χαρακτηριστικό ενός υλικού είναι οι απώλειες πυρήνα που αυτό εμφανίζει για τις αντίστοιχες τιμές μαγνητικής επαγωγής σε Watt ανα κιλό (W/kg). Όπως ακριβώς ισχύει για τα προηγούμενα υλικά, έτσι και για το Hiperco 50 δίνονται ορισμένα ζεύγη τιμών μαγνητικής επαγωγής και απωλειών πυρήνα σε W/kg, και μέσω αυτών γίνεται συνεχής καταγραφή της συμπεριφοράς του και χάραξη μίας καμπύλης που την περιγράφει.

Στο Σχήμα 5.10, παρουσιάζεται η καμπύλη αυτή η οποία προέκυψε μετά από επεξεργασία για το Hiperco 50. Όπως φαίνεται το εν λόγω κράμα κοβαλτίου, παρουσιάζει αρκετά μικρές απώλειες πυρήνα σε σχέση με τις υψηλές τιμές μαγνητικής επαγωγής που μπορεί να εμφανίσει. Για τους παραπάνω λόγους, το Hiperco 50 χρησιμοποιείται κατά κόρον σε εφαρμογές όπως στην αεροδιαστημική βιομηχανία.



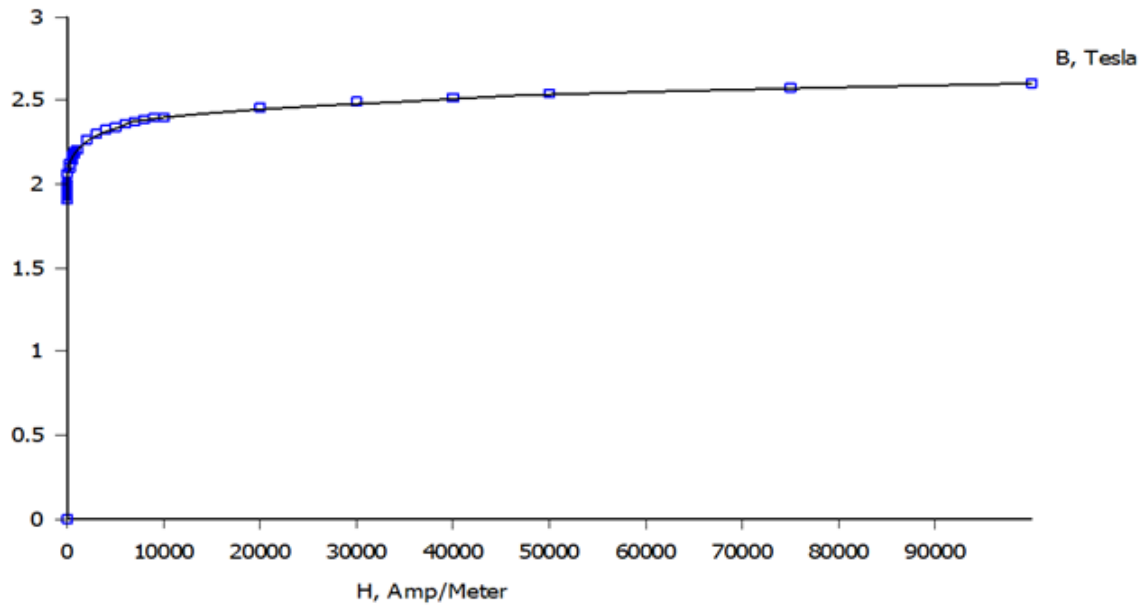
Σχήμα 5.10. Καμπύλη απωλειών πυρήνα Hiperco 50

5.2.1.4.2 Κράμα κοβαλτίου-σιδήρου τύπου Vacoflux 48

Το Vacoflux 48 επιδεικνύει τη χαμηλότερη τιμή μαγνητικής αντίστασης και την υψηλότερη μαγνητική διαπερατότητα λόγω της υψηλής καθαρότητας του κράματος. Ιδιαίτερα με την κανονική μορφή τροφοδοσίας σε λεπτά πάχη ταινιών, το Vacoflux 48 θεωρείται ότι είναι η πλήρως βελτιστοποιημένη λύση για στοιβές πλαστικοποίησης χαμηλής απώλειας που κατασκευάζονται από κοβάλτιο-σίδηρο. Το υλικό αυτό θεωρείται ιδανικό για χρήση σε κινητήρες και γεννήτριες με υψηλή πυκνότητα ισχύος και χαμηλότερες απώλειες και μετασχηματιστές με χαμηλές απώλειες σε πολύ υψηλές πυκνότητες ροής.

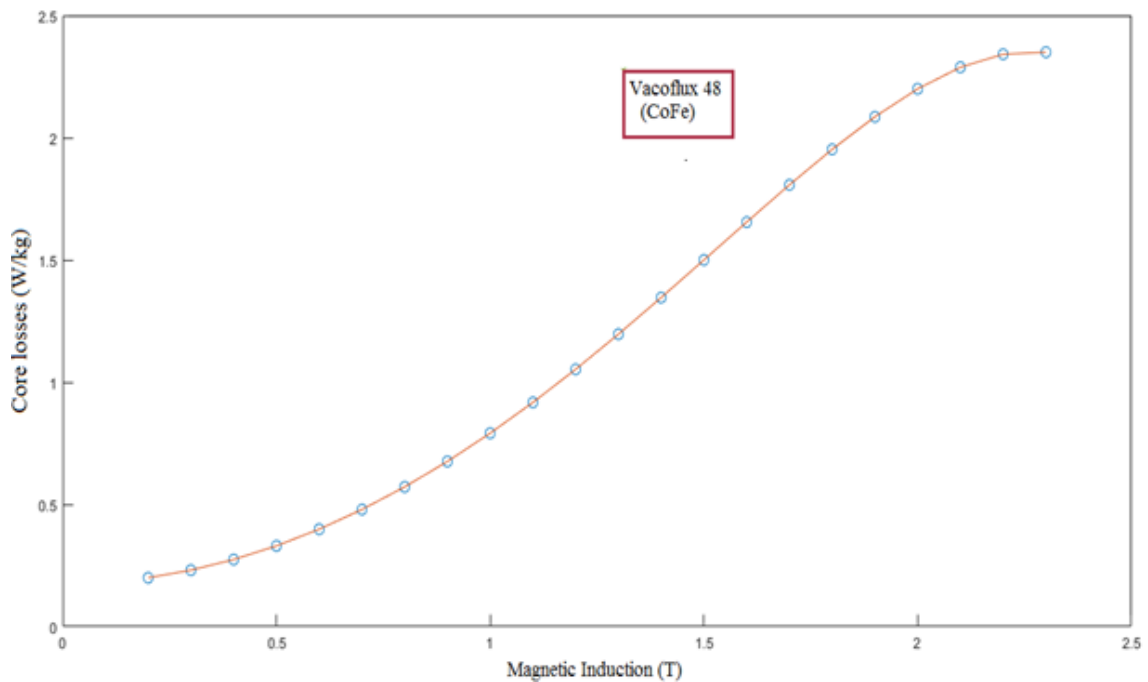
Η ελασματοποίησή του μπορεί να πραγματοποιηθεί με πάχος λαμαρίνας 0.35 mm. Χάρη στον υψηλό μαγνητικό κορεσμό του, μέχρι 2.35 T, το εν λόγω κράμα κοβαλτίου-σιδήρου (CoFe) Vacoflux 48 είναι γενικά κατάλληλο για όλες τις εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή πυκνότητα ροπής και ελάχιστο βάρος.

Στο Σχήμα 5.11 παρουσιάζεται η καμπύλη μαγνήτισης του υλικού, στην οποία περιγράφεται η συμπεριφορά της μαγνητικής επαγωγής συναρτήσει της έντασης μαγνητικού πεδίου που εφαρμόζεται



Σχήμα 5.11. Καμπύλη μαγνήτισης Vacoflux 48

Χαρακτηριστικό στοιχείο του συγκεκριμένου κράματος κοβαλτίου-σιδήρου είναι η ιδιαίτερα χαμηλές απώλειες πυρήνα που αυτό εμφανίζει. Στο κάτωθι σχήμα φαίνεται η καμπύλη απωλειών πυρήνα εκφρασμένων σε W/kg, όπως αυτή προέκυψε μετά από επεξεργασία:



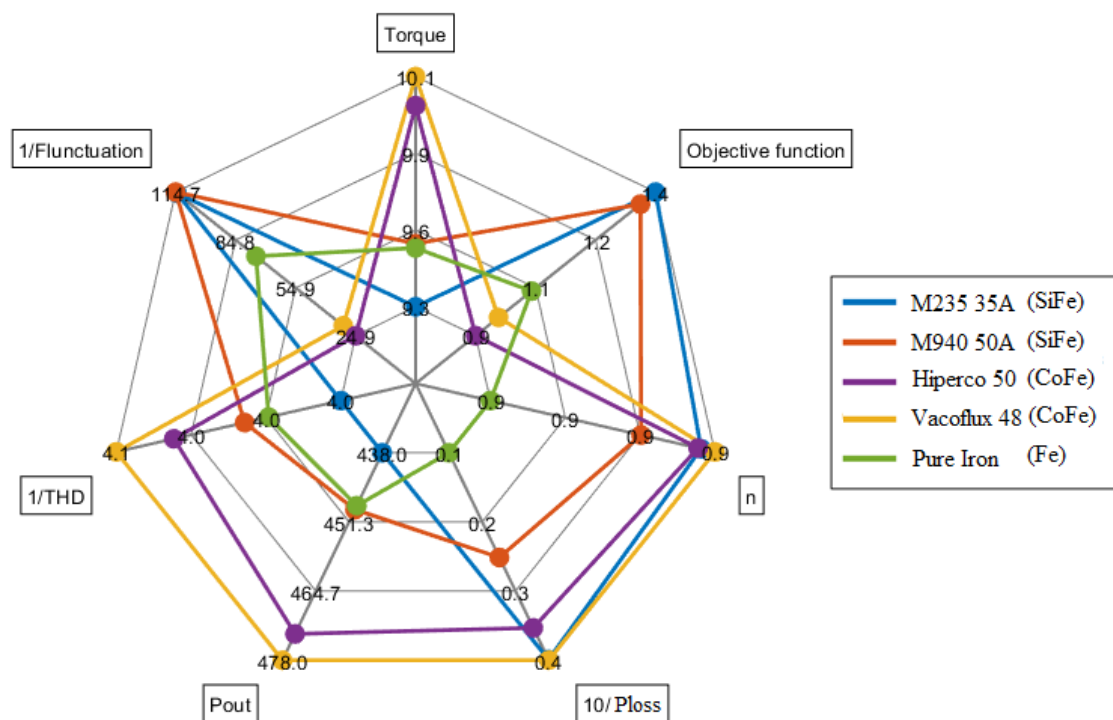
Σχήμα 5.12. Καμπύλη απωλειών πυρήνα Vacoflux 48

5.3 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με βάση τα χαρακτηριστικά σιδηρομαγνητικών λαμαρινών

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, θεωρήθηκαν τα προαναφερθέντα σιδηρομαγνητικά υλικά ως υλικά κατασκευής των δύο κινητήρων στους οποίους κατέληξε η μελέτη του Κεφαλαίου 4, τόσο για κατανεμημένα τυλίγματα κλασματικού βήματος, όσο και για συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των φάσεων. Η αναπαράσταση των αποτελεσμάτων των κινητήρων διαφορετικών σιδηρομαγνητικών λαμαρινών, έγινε με χρήση της τεχνικής Taguchi.

5.3.1 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με κατανεμημένα τυλίγματα διπλής στρώσεως κλασματικού βήματος, με βάση τα χαρακτηριστικά σιδηρομαγνητικών λαμαρινών

Παρακάτω παρουσιάζονται σε τεχνική Taguchi, τα αποτελέσματα της μελέτης των κατασκευαστικών υλικών, εφαρμοσμένα στην επιλεγθείσα γεωμετρία ηλεκτρικού κινητήρα με κατανεμημένα τυλίγματα διπλής στρώσεως κλασματικού βήματος:

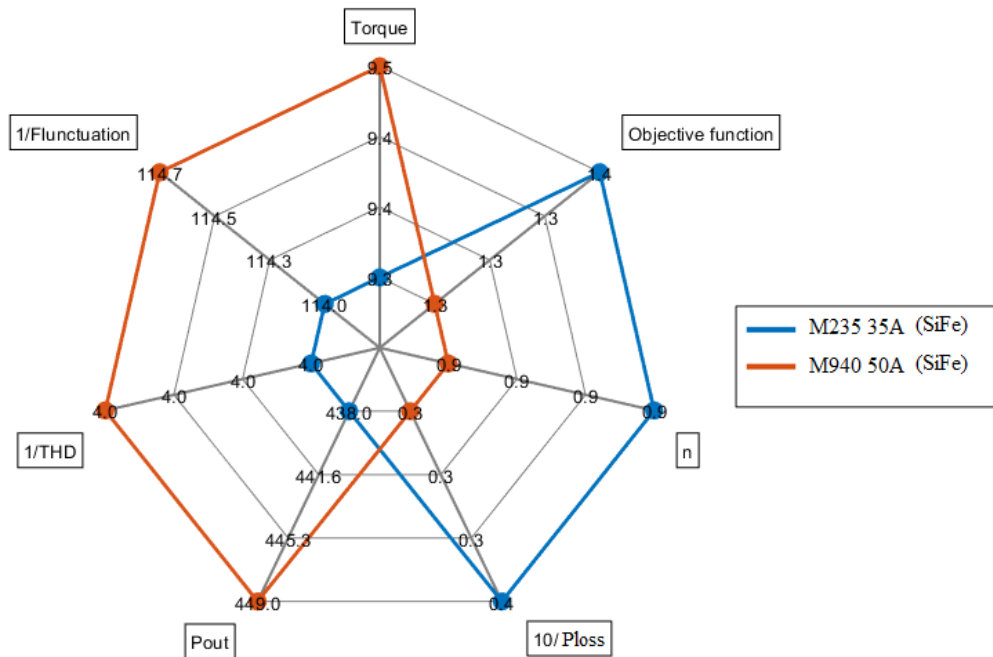


Σχήμα 5.13. Γραφική αναπαράσταση των χαρακτηριστικών κινητήρων κατανεμημένων τυλιγμάτων με διαφορετικές σιδηρομαγνητικές λαμαρίνες.

Τα άνωθι αποτελέσματα δίνουν μία αρκετά καθαρή εικόνα της σημαντικότητας των σιδηρομαγνητικών κατασκευαστικών υλικών ενός ηλεκτρικού κινητήρα. Ωστόσο κρίνεται σκόπιμο να συγκριθούν ξεχωριστά το καθένα εξ αυτών με το αρχικό, στην παρούσα ανάλυση, υλικό κατασκευής (M235-35A) ώστε να μπορούν να συναχθούν συμπεράσματα.

5.3.1.1 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με καταναμημένα τυλίγματα κλασματικού βήματος σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και M940-50A.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα Taguchi, στο οποίο γίνεται σύγκριση ανάμεσα στο αρχικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε σε όλη την μελέτη του 4^{ου} Κεφαλαίου (M235-35A), το οποίο όπως προαναφέρθηκε αποτελεί κράμα πυριτίου-σιδήρου (SiFe), και σε ακόμα ένα κράμα πυριτίου-σιδήρου το M940-50A. Οι διαφορές μεταξύ των δύο, όπως έχει ήδη προαναφερθεί, έγκεινται στο πάχος ελασματοποίησης των δύο υλικών, στα ποσοστά πυριτίου και σιδήρου από τα οποία αποτελούνται και φυσικά στην επεξεργασία στην οποία αυτά υποβάλλονται.



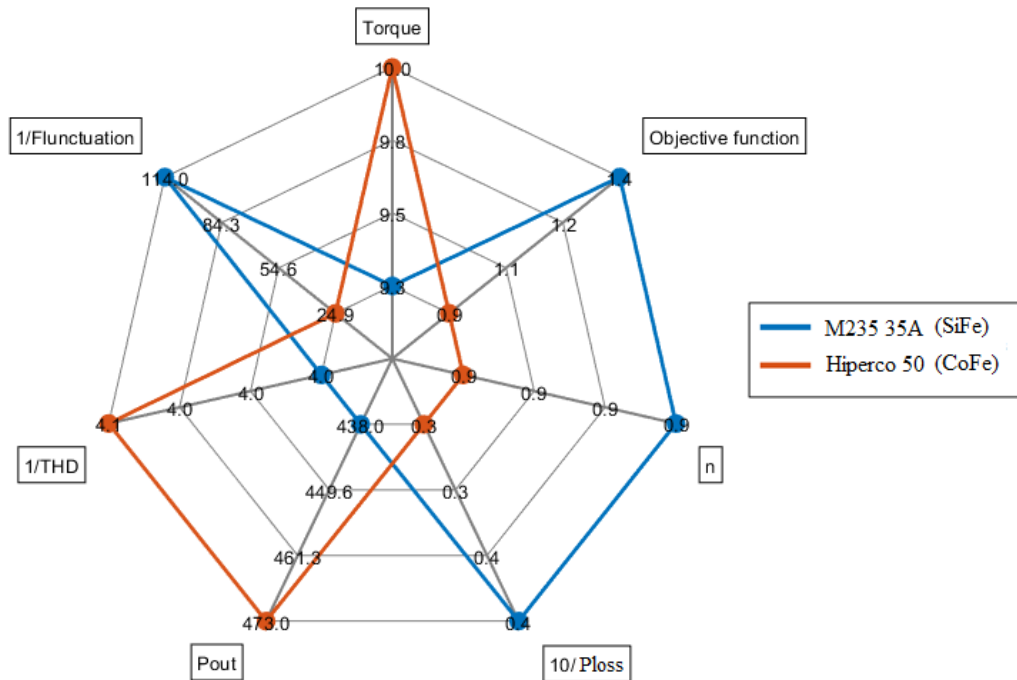
Σχήμα 5.14. Συγκριτική παρουσίαση μεταξύ των σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και M940-50A.

Όπως φαίνεται από το παραπάνω γράφημα η επιλογή της σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας M940-50A, οδήγησε σε υψηλότερη τιμή ροπής. Αυτό αποτελεί αναμενόμενο αποτέλεσμα καθώς όπως προαναφέρθηκε το επιλεγέν υλικό M940-50A εμφανίζει υψηλότερες τιμές μαγνητικής επαγωγής για τις ίδιες τιμές πεδίου και συνεπώς ηλεκτρικής φόρτισης. Όπως είναι λοιπόν προφανές, δεδομένης της σταθερής τιμής πυκνότητας ρεύματος στα τυλίγματα και συνεπώς ηλεκτρικής φόρτισης, η χρήση του ως άνω υλικού επιφέρει υψηλότερη πυκνότητα ροπής κινητήρα. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε αύξηση της τιμής της ροπής κατά 0.2 Nm. Ταυτόχρονα παρατηρείται μία μικρή μείωση των ταλαντώσεων ροπής κατά 0.01%, και της αρμονικής παραμόρφωσης κατά 1%. Φαίνεται επίσης πως οι συνολικές απώλειες κινητήρα αυξήθηκαν σημαντικά. Η εν λόγω αύξηση έγκειται αποκλειστικά στην αύξηση των απωλειών πυρήνα του υλικού, καθώς όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.8, η καμπύλη απωλειών εκφρασμένη σε W/kg συναρτήσει της τιμής μαγνητικής επαγωγής λαμβάνει σημαντικά υψηλότερες τιμές. Συγκεκριμένως η αύξηση απωλειών πυρήνα εκτιμήθηκε ίση με 8W. Αθροιστικά οι μεταβολές αυτές οδήγησαν στην μείωση απόδοσης κατά 3%.

Η προαναφερθείσα αύξηση των συνολικών απωλειών κινητήρα, είχε σαν αποτέλεσμα μικρή μείωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης κατά 4%.

5.3.1.2 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με καταναμημένα τυλίγματα κλασματικού βήματος σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και Hiperco 50.

Ακολούθως παρουσιάζονται στο διάγραμμα Taguchi, τα συγκριτικά αποτελέσματα ανάμεσα στο αρχικό κράμα πυριτιούχου σιδήρου M235-35A, και στο κράμα κοβαλτίου-σιδήρου Hiperco 50. Με βάση την ανάλυση που έχει προηγηθεί, τα κράματα κοβαλτίου-σιδήρου έχουν την υψηλότερη τιμή μαγνητικού κορεσμού όλων των μαλακών μαγνητικών υλικών, και συνεπώς υψηλότερη από αυτήν των κραμάτων πυριτίου-σιδήρου. Ταυτόχρονα, όπως έχει εξηγηθεί το Hiperco 50, εμφανίζει υψηλότερες τιμές απωλειών σε W/kg συναρτήσει της επιβαλλόμενης μαγνητικής επαγωγής, ενώ η ελασματοποίηση του γίνεται σε διαφορετικό πάχος ελάσματος.



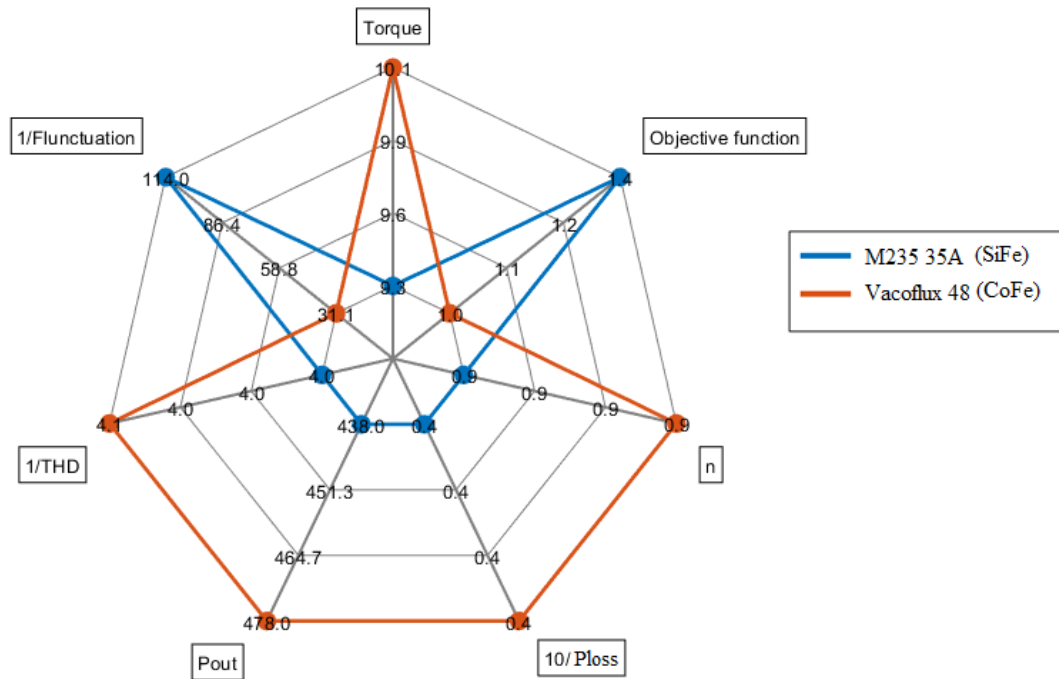
Σχήμα 5.15. Συγκριτική παρουσίαση μεταξύ των σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και Hiperco 50.

Η χρήση της εν λόγω σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας, όπως ήταν αναμενόμενο, οδήγησε στην αύξηση πυκνότητας ροπής του κινητήρα. Το Hiperco 50, εμφανίζει σημαντικά υψηλές τιμές μαγνητικής επαγωγής, κοντά στα 2.2 T. Η παραπάνω θεώρηση εξηγεί την σημαντική αυτή αύξηση της ροπής κατά 0.7 Nm. Ωστόσο η μεταβολή αυτή, οδήγησε σε σχετική αύξηση της τιμής ταλαντώσεων ροπής στο 4%. Η τιμή αυτή φυσικά θεωρείται αποδεκτή, καθώς δεν υπερβαίνει την περιοριστική θεώρηση του 5%, ωστόσο δεν μπορεί να αγνοηθεί. Ταυτόχρονα παρατηρήθηκε μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης κατά 0.5%.

Σημαντικό κρίνεται να αναφερθεί πως στις συνολικές απώλειες του κινητήρα, παρατηρήθηκε πολύ μικρή αύξηση της τάξης των 3W. Η μικρή αυτή αύξηση έγκειται αποκλειστικά στην αύξηση των απωλειών σιδήρου του υλικού, το οποίο όμως προέκυψε εξαιτίας των υψηλότερων τιμών μαγνητικής επαγωγής που εφαρμόζονται στον πυρήνα. Εν κατακλείδι οι μεταβολές αυτές διατήρησαν σχετικά σταθερή τιμή απόδοσης. Η εν λόγω αύξηση των συνολικών απωλειών κινητήρα, σε συνδυασμό με την αύξηση της τιμής των ταλαντώσεων ροπής, οδήγησε σε σημαντική μείωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.

5.3.1.3 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με καταναμημένα τυλίγματα κλασματικού βήματος σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και Vacoflux 48.

Εν συνεχεία παρουσιάζεται το διάγραμμα Taguchi, στο οποίο γίνεται σύγκριση ανάμεσα στο αρχικό κράμα πυριτιούχου σιδήρου M235-35A, και ένα ακόμα κράμα κοβαλτίου-σιδήρου, το Vacoflux 48. Όπως προαναφέρθηκε, τα κράματα κοβαλτίου-σιδήρου έχουν υψηλότερη τιμή μαγνητικού κορεσμού από αυτήν των κραμάτων πυριτίου-σιδήρου, γεγονός που συνεπάγεται αύξηση της πυκνότητας ροπής του κινητήρα. Με βάση τα Σχήματα 5.2 και 5.12, κρίνεται πως ο κοβαλτιούχος σίδηρος Vacoflux 48 εμφανίζει χαμηλότερες τιμές απωλειών σε W/kg συναρτήσει της επιβαλλόμενης μαγνητικής επαγωγής.



Σχήμα 5.16. Συγκριτική παρουσίαση μεταξύ των σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και Vacoflux 48.

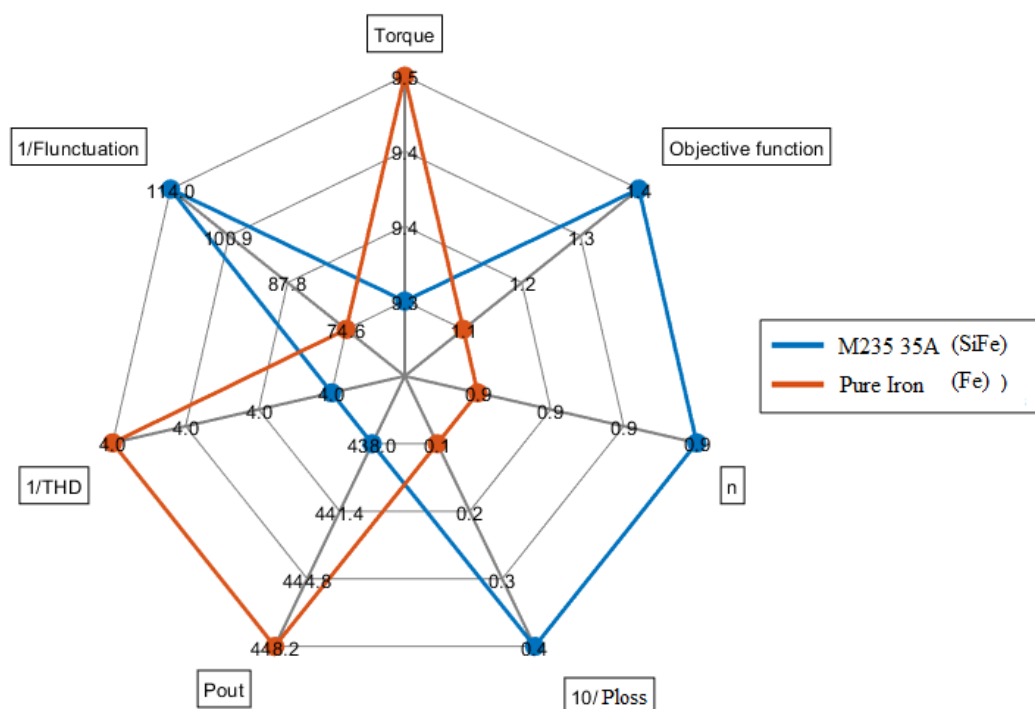
Με βάση την παραπάνω ανάλυση τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο ανωτέρω σχήμα, κρίνονται αναμενόμενα. Παρατηρείται μία σημαντική αύξηση της πυκνότητας ροπής του κινητήρα, κατά 0.8 Nm. Ταυτόχρονα παρατηρήθηκε σχετική αύξηση των ταλαντώσεων ροπής κατά 2%, αλλά και μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης κατά 0.7%.

Πολύ σημαντική είναι η μείωση των συνολικών απωλειών. Η μείωση αυτή έγκειται αποκλειστικά στην μείωση των απωλειών πυρήνα, παρόλη την αύξηση των τιμών μαγνητικής επαγωγής που εφαρμόζονται στον πυρήνα του κοβαλτιούχου σιδήρου. Αθροιστικά οι μεταβολές αυτές οδήγησαν στην αύξηση της απόδοσης κατά 1%.

Η ανωτέρω συμπεριφορά οδήγησε σε σχετική μείωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία όμως οφείλεται αποκλειστικά στην ελάχιστη αύξηση των ταλαντώσεων ροπής. Όλα τα παραπάνω καθιστούν το συγκεκριμένο υλικό, για την μέχρι τώρα ανάλυση, το πλέον κατάλληλο για την κατασκευή ηλεκτρικών κινητήρων, καθώς συνδυάζει σημαντικά υψηλή τιμή πυκνότητας ροπής και χαμηλές τιμές απωλειών ισχύος. Παράλληλα εμφανίζει αρκετά χαμηλές τιμές ταλαντώσεων ροπής, εντός των επιτρεπτών ορίων, και χαμηλή τιμή αρμονικής παραμόρφωσης.

5.3.1.4 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με καταναμημένα τυλίγματα κλασματικού βήματος σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και Καθαρού Σιδήρου.

Στο επόμενο διάγραμμα Taguchi, παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα ανάμεσα στο αρχικό υλικό, κράμα πυριτιούχου σιδήρου M235-35A, και τον καθαρό σίδηρο. Σε αντίθεση με τον πυριτιούχο σίδηρο, ο καθαρός σίδηρος ενέχει σημαντικά υψηλές τιμές απωλειών πυρήνα. Ωστόσο εμφανίζει σημαντικά υψηλές τιμές μαγνητικής επαγωγής, οι οποίες βέβαια αντιστοιχούν και σε υψηλές τιμές ηλεκτρικής φόρτισης. Ιδιαίτερα στις φορτίσεις αυτές οι απώλειες πυρήνα του σιδήρου είναι σημαντικά αυξημένες, με αποτέλεσμα να τον καθιστούν ακατάλληλο προς χρήση σε ηλεκτρικούς κινητήρες



Σχήμα 5.17. Συγκριτική παρουσίαση μεταξύ των σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και Καθαρού Σιδήρου.

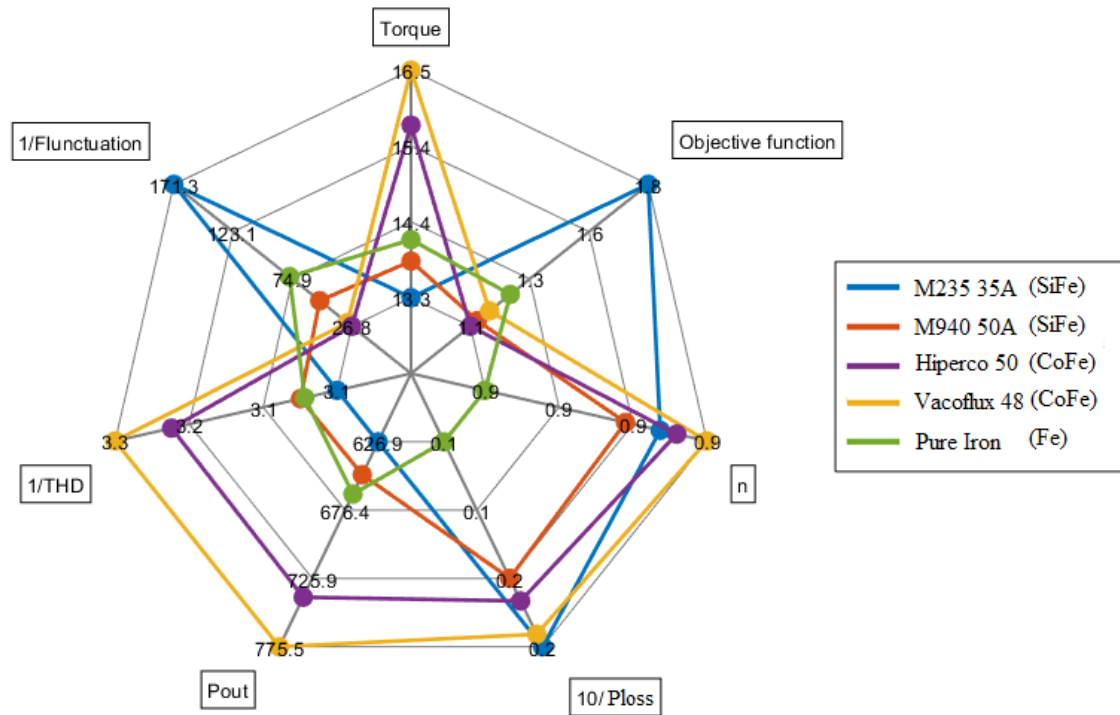
Όπως ήδη εξηγήθηκε, η χρήση καθαρού σιδήρου οδήγησε σε σχετική, αλλά όχι ιδιαίτερα σημαντική, αύξηση της ροπής, δεδομένης της χαμηλής ηλεκτρικής φόρτισης, η οποία εφαρμόζεται στον κινητήρα. Ταυτόχρονα ο καθαρός σίδηρος αύξησε κατ' ελάχιστον την τιμή των ταλαντώσεων ροπής, ενώ διατήρησε σχετικά σταθερή την τιμή της αρμονικής παραμόρφωσης.

Η αύξηση των συνολικών απωλειών είναι ιδιαίτερα υψηλή. Συγκεκριμένα η αύξηση των απωλειών σιδήρου, η οποία είναι αποκλειστικά υπεύθυνη για την αύξηση των συνολικών απωλειών, είναι της τάξης των 30W. Οι ως άνω μεταβολές οδηγούν σε μείωση της απόδοσης του κινητήρα κατά 8%, τιμή ιδιαίτερα σημαντική.

Τα ανωτέρω αποτελέσματα αποδεικνύουν τον ισχυρισμό, περί ακαταλληλότητας του καθαρού σιδήρου προς χρήση ως κατασκευαστικό υλικό ηλεκτρικών κινητήρων.

5.3.2 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των φάσεων, με βάση τα χαρακτηριστικά σιδηρομαγνητικών λαμαρινών

Παρακάτω παρουσιάζονται σε τεχνική Taguchi, τα αποτελέσματα της μελέτης των κατασκευαστικών υλικών, εφαρμοσμένα στην επιλεγθείσα γεωμετρία ηλεκτρικού κινητήρα με συγκεντρωμένα τυλίγματα:

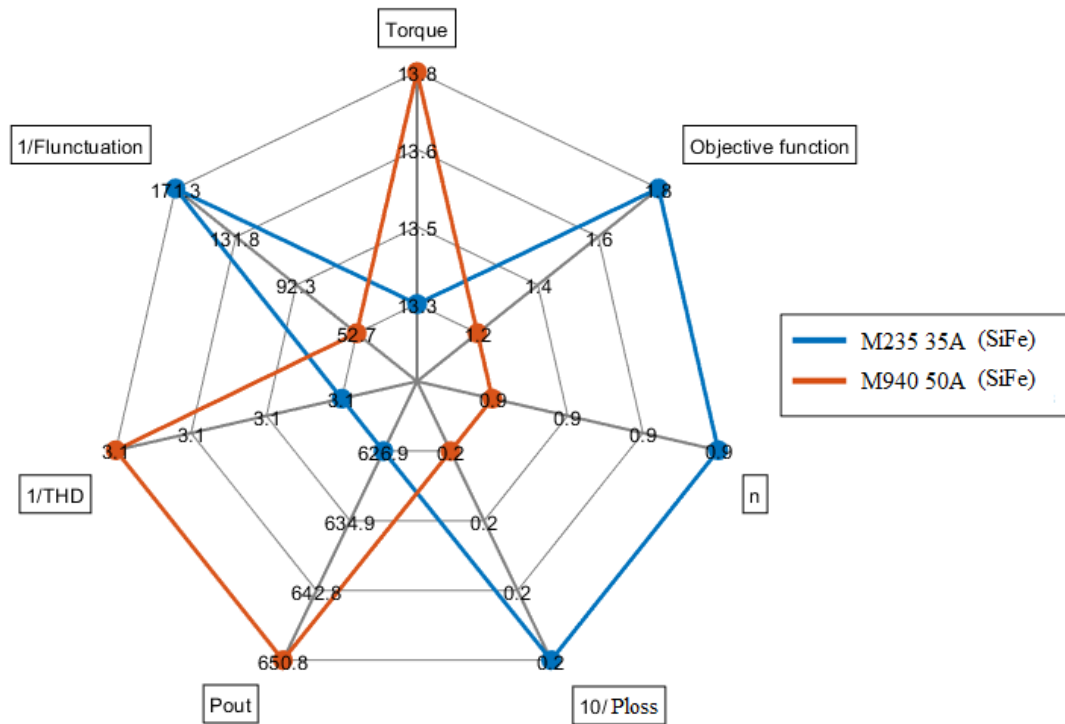


Σχήμα 5.18. Γραφική αναπαράσταση των χαρακτηριστικών κινητήρων συγκεντρωμένων τυλιγμάτων με διαφορετικές σιδηρομαγνητικές λαμαρίνες.

Τα ανωτέρω αποτελέσματα, όπως και στην παράγραφο 5.3.1, δίνουν μία αρκετά καθαρή εικόνα του ρόλου που διαδραματίζουν τα σιδηρομαγνητικά κατασκευαστικά υλικά για έναν ηλεκτρικό κινητήρα. Κρίνεται όμως σκόπιμο να συγκριθούν ξεχωριστά το καθένα εξ αυτών ώστε να μπορούν να συναχθούν συμπεράσματα.

5.3.2.1 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των φάσεων σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και M940-50A .

Στο διάγραμμα Taguchi του Σχήματος 5.19, απεικονίζονται τα αποτελέσματα σύγκρισης ανάμεσα στο αρχικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε σε όλη την μελέτη του 4^{ου} Κεφαλαίου, το M235-35A, και σε ακόμα ένα κράμα πυριτίου-σιδήρου, το M940-50A.



Σχήμα 5.19. Συγκριτική παρουσίαση μεταξύ των σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και M940-50A.

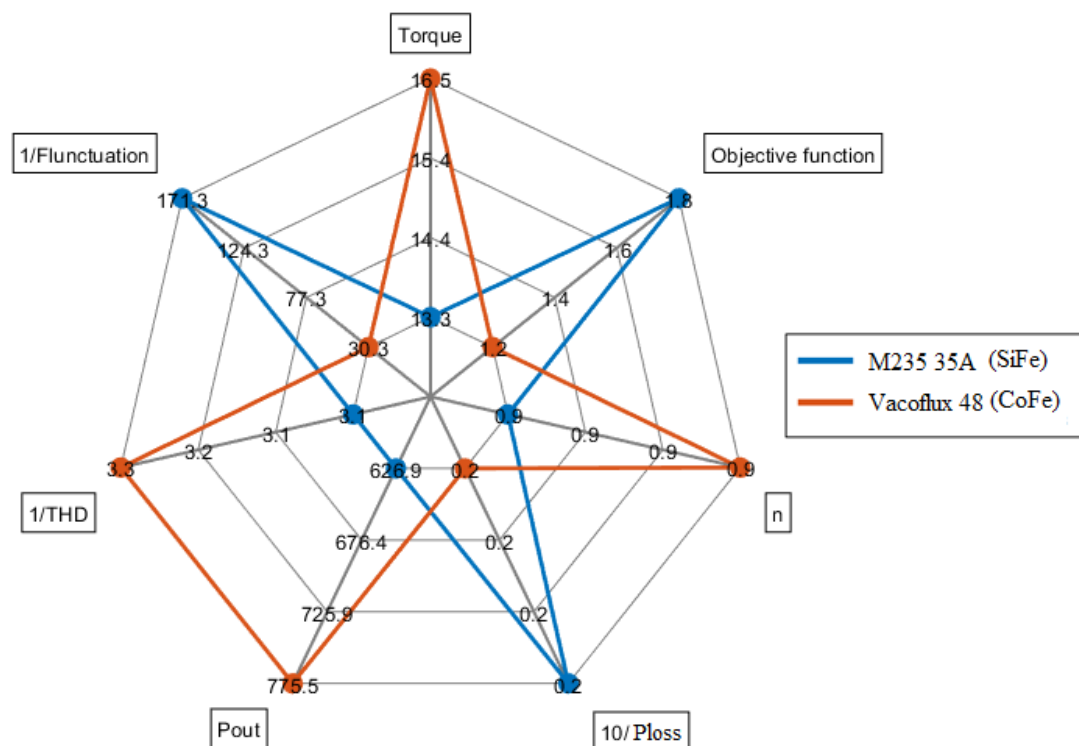
Όπως φαίνεται από το παραπάνω γράφημα, η επιλογή της σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας M940-50A οδήγησε σε υψηλότερη τιμή ροπής, όπως ακριβώς συνέβη και στον κινητήρα με κατανομημένα τυλίγματα. Το υλικό M940-50A εμφανίζει υψηλότερες τιμές μαγνητικής επαγωγής για τις ίδιες τιμές πεδίου και συνεπώς ηλεκτρικής φόρτισης. Δεδομένης λοιπόν της σταθερής τιμής πυκνότητας ρεύματος τυλιγμάτων, και συνεπώς ηλεκτρικής φόρτισης, η χρήση του ως άνω υλικού επιφέρει υψηλότερη πυκνότητα ροπής κινητήρα. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε αύξηση της τιμής της ροπής κατά 0.5 Nm. Ταυτόχρονα παρατηρείται μία μικρή αύξηση των ταλαντώσεων ροπής κατά 1%, και μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης κατά 0.5%.

Οι συνολικές απώλειες κινητήρα αυξήθηκαν σημαντικά. Η αύξηση αυτή οφείλεται αποκλειστικά στην μεταβολή των απωλειών πυρήνα. Συγκεκριμένα η αύξηση απωλειών πυρήνα εκτιμήθηκε ίση με 9W. Αθροιστικά οι μεταβολές αυτές οδήγησαν στην μείωση απόδοσης κατά 1%.

Η συνολική προαναφερθείσα συμπεριφορά είχε σαν αποτέλεσμα μείωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, λόγω της σημαντικών αυξήσεων ταλαντώσεων ροπής και απωλειών ισχύος.

5.3.2.3 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των φάσεων σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και Vacoflux 48.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα Taguchi, στο οποίο γίνεται σύγκριση ανάμεσα στο αρχικό κράμα πυριτιούχου σιδήρου M235-35A, και ένα ακόμα κράμα κοβαλτίου-σιδήρου, το Vacoflux 48.



Σχήμα 5.21. Συγκριτική παρουσίαση μεταξύ των σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και Vacoflux 48.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο παραπάνω σχήμα κρίνονται αναμενόμενα. Παρατηρείται μία σημαντική αύξηση της πυκνότητας ροπής του κινητήρα, με την τιμή της να αυξάνεται κατά 3.2 Nm. Ταυτόχρονα παρατηρήθηκε σχετική αύξηση των ταλαντώσεων ροπής κατά 2%, αλλά και μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης κατά 2%.

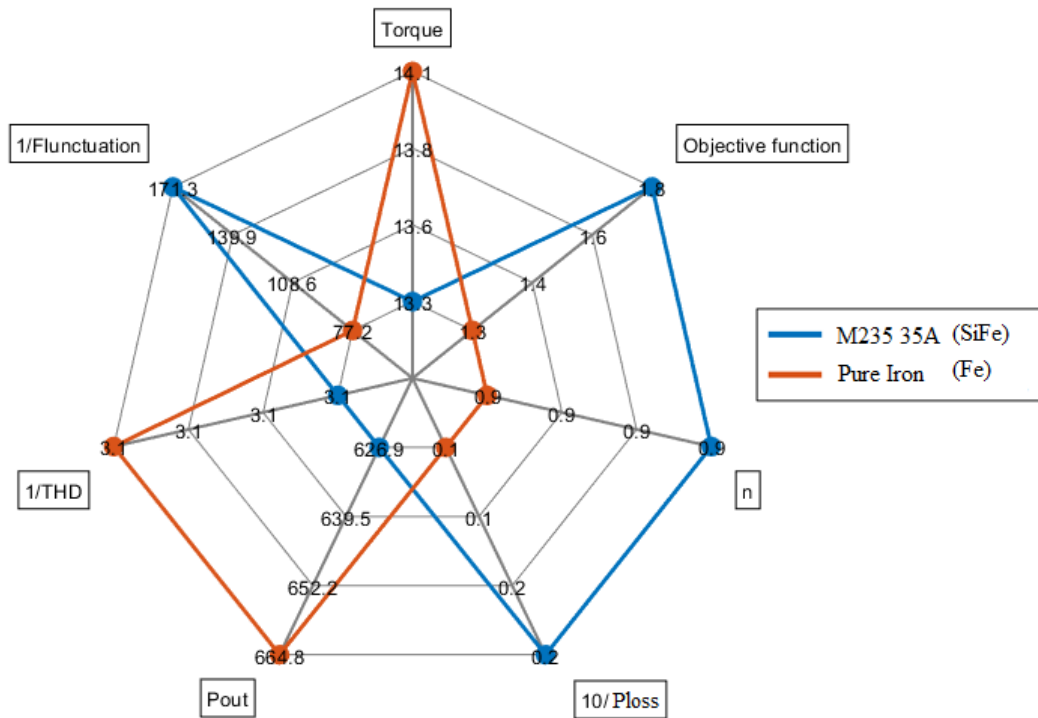
Ιδιαίτερης προσοχής χρήζει η διατήρηση σχετικά σταθερής τιμής απωλειών πυρήνα και συνεπώς σταθερών συνολικών απωλειών, παρόλη την αύξηση των τιμών μαγνητικής επαγωγής που εφαρμόζονται στον κοβαλτιούχο σίδηρο. Αθροιστικά οι μεταβολές αυτές οδήγησαν στην αύξηση της απόδοσης κατά 0.5%.

Η ανωτέρω συμπεριφορά οδήγησε σε σχετική μείωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.21, έγκειται αποκλειστικά στην αύξηση των ταλαντώσεων ροπής. Εντούτοις, όπως και στα κατανεμημένα τυλίγματα, η αύξηση αυτή ανήκει εντός των επιτρεπτών ορίων (του 5%) με αποτέλεσμα να θεωρηθεί αμεληταία.

Συνεπώς, έως την μέχρι τώρα ανάλυση, το συγκεκριμένο υλικό καθίσταται ως το πλέον κατάλληλο κατασκευαστικό υλικό ηλεκτρικών κινητήρων, καθώς συνδυάζει σημαντικά υψηλή τιμή ροπής και χαμηλές τιμές απωλειών ισχύος, ενώ εμφανίζει αρκετά χαμηλές τιμές ταλαντώσεων ροπής, εντός των επιτρεπτών ορίων και χαμηλή τιμή αρμονικής παραμόρφωσης.

5.3.2.4 Συγκριτική μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων μονίμων μαγνητών με συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των φάσεων σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και Καθαρού Σιδήρου.

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα Taguchi, συγκριτικά ανάμεσα στο αρχικό υλικό, πυριτιούχου σιδήρου M235-35A , και τον καθαρό σίδηρο.



Σχήμα 5.22. Συγκριτική παρουσίαση μεταξύ των σιδηρομαγνητικών λαμαρινών M235-35A και Καθαρού Σιδήρου.

Η χρήση καθαρού σιδήρου οδήγησε σε σχετική αύξηση της ροπής, δεδομένης της χαμηλής ηλεκτρικής φόρτισης η οποία εφαρμόζεται στον κινητήρα. Ταυτόχρονα ο καθαρός σίδηρος αύξησε την τιμή των ταλαντώσεων ροπής, ενώ διατήρησε σχετικά σταθερή την τιμή της αρμονικής παραμόρφωσης.

Η αύξηση των συνολικών απωλειών είναι ιδιαίτερα υψηλή. Συγκεκριμένα η αύξηση των απωλειών σιδήρου, η οποία είναι αποκλειστικά υπεύθυνη για την εν λόγω αύξηση των συνολικών απωλειών, είναι της τάξης των 40W. Οι ως άνω μεταβολές οδηγούν σε μείωση της απόδοσης του κινητήρα κατά 6%, τιμή ιδιαίτερα σημαντική.

Συνολικά οι μεταβολές αυτές οδήγησαν σε σημαντική μείωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.

Τα παραπάνω αποτελέσματα αποδεικνύουν με βάση τις προσομοιώσεις πως η χρήση καθαρού σιδήρου ως κατασκευαστικού υλικού ηλεκτρικών κινητήρων θεωρείται ακατάλληλη.

5.3.3 Τελική επιλογή σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας

Από την παραπάνω μελέτη συνάγονται επαρκή συμπεράσματα για την σημαντικότητα επιλογής κατάλληλων σιδηρομαγνητικών λαμαρινών ως κατασκευαστικών υλικών ενός ηλεκτρικού κινητήρα. Βάσει της θεωρίας αλλά και της σχεδιαστικής μελέτης προέκυψαν αναλυτικά πλήρως τεκμηριωμένα συμπεράσματα αναφορικά με τα μελετηθέντα υλικά.

Ο καθαρός σίδηρος αποτελεί το μαλακό σιδηρομαγνητικό υλικό με τις υψηλότερες τιμές μαγνητικής επαγωγής, οι οποίες όμως εμφανίζονται σε ιδιαίτερα υψηλές τιμές μαγνητικής και συνεπώς ηλεκτρικής φόρτισης. Το χαρακτηριστικό αυτό, πέραν της αναγκαιότητας για υψηλά φορτία εισόδου στον κινητήρα, ώστε να εκμεταλλευτεί κανείς την υψηλή αυτή μαγνητική επαγωγή, οδηγεί και σε σημαντικά υψηλές απώλειες πυρήνα. Πέραν αυτού, εν γένει ο σίδηρος αποτελεί ένα υλικό με ιδιαίτερα υψηλές απώλειες πυρήνα εκφρασμένες σε W/kg, γεγονός που αυξάνει συνολικά τις απώλειες του κινητήρα. Η αύξηση αυτή επιφέρει αύξηση του κόστους λειτουργίας του ηλεκτρικού κινητήρα, και συνεπώς καθιστά τον σίδηρο ακατάλληλο.

Σε αντιδιαστολή με τον καθαρό σίδηρο, παρατηρείται πως τα κράματα πυριτίου-σιδήρου (SiFe) επιφέρουν σημαντική μείωση στις απώλειες πυρήνα και συνεπώς στις συνολικές απώλειες ενός ηλεκτρικού κινητήρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσής του σε μεγάλο βαθμό, γεγονός που επιφέρει μικρότερο κόστος λειτουργίας. Ταυτόχρονα η προσθήκη πυριτίου επιφέρει σχετική μείωση της πυκνότητας ροπής. Εντούτοις η μείωση αυτή δεν είναι αρκετή για να το καταστήσει ακατάλληλο προς χρήση ως κατασκευαστικό υλικό ηλεκτρικών κινητήρων.

Πλέον κατάλληλα, σε εφαρμογές όπου η πυκνότητα ροπής σε συνδυασμό με το χαμηλό όγκο μηχανής κρίνονται απαραίτητα χαρακτηριστικά, αναδεικνύονται τα κράματα κοβαλτίου-σιδήρου (CoFe). Ανάμεσα σε διαφορετικά κράματα κοβαλτίου-σιδήρου παρατηρούνται διαφορές τόσο στις τιμές μαγνητικής επαγωγής, όσο και στις απώλειες πυρήνα που αυτά εμφανίζουν. Ωστόσο εύκολα φαίνεται ότι αμφοτέρωτα τα δύο μελετηθέντα κράματα κοβαλτίου-σιδήρου κρίθηκαν καταλληλότερα των υπολοίπων, με το VacoFlux 48 να αναδεικνύεται ως το υλικό που πληροί όλες τις προϋποθέσεις για τους ηλεκτρικούς κινητήρες που μελετήθηκαν, τόσο για κατανεμημένα, όσο και για συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των φάσεων. Φυσικά δεν πρέπει να αγνοηθεί η παράμετρος του πολύ υψηλότερου κόστους των κραμάτων κοβαλτίου-σιδήρου συγκριτικά με τους χάλυβες πυριτίου-σιδήρου, η οποία κατέχει πρωτεύοντα ρόλο στην επιλογή υλικών κατασκευής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

Σύνοψη, αποτελέσματα συμπεράσματα και προοπτικές

6.1 Σύνοψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε η βελτιστοποίηση γεωμετρίας και διαμόρφωσης με βάση τα χαρακτηριστικά σιδηρομαγνητικών λαμαρινών, ενός ηλεκτρικού κινητήρα μονίμων μαγνητών σταθερού όγκου. Αυτό έγινε με σκοπό να αναδειχθεί η σημασία της εσωτερικής γεωμετρίας ενός ηλεκτρικού κινητήρα, για δεδομένο συνολικό μέγεθος. Από την διερεύνηση των συνιστωσών του κινητήρα που σχεδιάστηκε, προέκυψαν πολύτιμες γνώσεις για τις γεωμετρίες και τις διαμορφώσεις που εξετάστηκαν, αλλά και για τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί αποτελεσματικά η διαδικασία βελτιστοποίησης.

Η μέθοδος βελτιστοποίησης γεωμετρίας που εφαρμόστηκε βασίζεται σε ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων. Μεταξύ των εναλλακτικών παραμέτρων που μελετήθηκαν είναι η διαμόρφωση των τυλιγμάτων στις αύλακες του στάτη, μία πληθώρα γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κινητήρα, και οι σιδηρομαγνητικές λαμαρίνες που χρησιμοποιούνται στον πυρήνα.

Μελετήθηκαν δύο διαφορετικά τυλίγματα διπλής στρώσεως στάτη: α) κατανεμημένα τυλίγματα κλασματικού βήματος και β) συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των άκρων των πηνίων. Η διαδικασία ανάλυσης ευαισθησίας παραμέτρων εφαρμόστηκε ξεχωριστά στις δύο τοπολογίες τυλιγμάτων, δίνοντας αντίστοιχα αποτελέσματα.

Στην έρευνα αυτή, εκτός των πολλών μεταβλητών που αφορούν άμεσα στη γεωμετρία του κινητήρα, διερευνήθηκαν και αναλύθηκαν διαφορετικές τοπολογίες μαγνητών που συναντώνται ευρέως στην σχεδίαση ηλεκτρικών κινητήρων, αλλά και διαφορετικές γεωμετρίες δοντιών.

Το τελευταίο κεφάλαιο της ανάλυσης αφιερώθηκε στα ευρήματα-συμπεράσματα της μελέτης αναφορικά με το υλικό κατασκευής του πυρήνα του κινητήρα. Μελετήθηκαν διαφορετικά είδη σιδηρομαγνητικών λαμαρινών, ανάμεσα τους διαφορετικά κράματα πυριτιούχου σιδήρου, κοβαλτιούχου σιδήρου, αλλά και καθαρός σίδηρος.

6.2 Κοριότερα Αποτελέσματα

Μελετήθηκαν δύο διαφορετικές τοπολογίες τυλιγμάτων στάτη, για τις οποίες προέκυψαν διαφορετικά ποσοτικά και ποιοτικά αποτελέσματα σε ότι αφορά την γεωμετρία των αντίστοιχων ηλεκτρικών κινητήρων. Στις διαφορετικές αυτές διαμορφώσεις κινητήρων εφαρμόστηκαν διαφορετικά σιδηρομαγνητικά υλικά από τα οποία προέκυψαν επιπλέον συμπεράσματα. Οι τελικές διαμορφώσεις έχουν ως εξής:

Ηλεκτρικός κινητήρας κατανεμημένων τυλιγμάτων διπλής στρώσεως κλασματικού βήματος

Πίνακας 6.1. Πίνακας αποτελεσμάτων κινητήρα κατανεμημένου τυλίγματος διπλής στρώσεως κλασματικού βήματος.

Ποιοτικά χαρακτηριστικά	
Ζεύγος πόλων-αυλάκων	P=6 , Q=36 , q=2
Διαμόρφωση δοντιού	Δόντι ορθογωνίου βάσεως
Τοπολογία μαγνητών	Επιφανειακοί μαγνήτες
Σιδηρομαγνητική λαμαρίνα	Κράμα κοβαλτιούχου σιδήρου Vacoflux 48
Ποσοτικά χαρακτηριστικά	
Στροφές ανα λεπτό	450
Συχνότητα λειτουργίας (Hz)	22.5
T _{mean} (Nm)	10.15
Ταλαντώσεις Ροπής (%)	3.2
Αρμονική Παραμόρφωση THD (%)	24.52
Ισχύς εξόδου (W)	478
Απώλειες ισχύος (W)	27.5
Απόδοση ισχύος (%)	95

Ηλεκτρικός κινητήρας συγκεντρωμένων τυλιγμάτων διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των άκρων των πηνίων

Πίνακας 6.2. Πίνακας αποτελεσμάτων κινητήρα συγκεντρωμένου τυλίγματος διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των άκρων των πηνίων.

Ποιοτικά χαρακτηριστικά	
Ζεύγος πόλων-αυλάκων	P=14 , Q=18 , q=3/7
Διαμόρφωση δοντιού	Δόντι στρογγυλής αύλακος
Τοπολογία μαγνητών	Επιφανειακοί μαγνήτες
Σιδηρομαγνητική λαμαρίνα	Κράμα κοβαλτιούχου σιδήρου Vacoflux 48
Ποσοτικά χαρακτηριστικά	
Στροφές ανα λεπτό	450
Συχνότητα λειτουργίας (Hz)	52.5
T _{mean} (Nm)	16.46
Ταλαντώσεις Ροπής (%)	3.3
Αρμονική Παραμόρφωση THD (%)	30.4
Ισχύς εξόδου (W)	775
Απώλειες ισχύος (W)	55.23
Απόδοση ισχύος (%)	93.35

6.3 Συμπεράσματα

6.3.1 Μεθοδολογία σχεδιασμού

Από την παραπάνω διαδικασία και τη μελέτη πλήθους πεντακοσίων σαράντα (540) κινητήρων, διαφαίνεται πώς η χρήση παραμετροποιημένου κώδικα κρίνεται απαραίτητη για την σύντομη και αποδοτική ανάλυσή των. Όπως είναι γνωστό η χρήση αυτοματοποιημένων αλγορίθμων που μελετούν τα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά των κινητήρων με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και επιστρέφουν λεπτομερή πληροφορία για την λειτουργία τους, εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα.

6.3.2 Επιρροή των διαφορετικών τυλιγμάτων στάτη στις αύλακες

Η επιλογή μελέτης των δύο διαφορετικών τύπων τυλιγμάτων, έγινε με σκοπό την ανάδειξη των εκάστοτε πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων αυτών, και όχι την σύγκριση μεταξύ τους σε μία συγκεκριμένη γεωμετρία. Ταυτόχρονα προέκυψαν πολύ σημαντικές γνώσεις για αμφοτέρους τις διαμορφώσεις.

Συγκεκριμένα:

Η χρήση κατανεμημένων τυλιγμάτων επέφερε σημαντικά υψηλή τιμή θεμελιώδους αντί-ΗΕΔ. Επιπλέον, μετά από την διαδικασία κατάλληλης σχεδίασης μπόρεσαν να περιοριστούν στο ελάχιστο τόσο η κυμάτωση ροπής όσο και οι απώλειες του κινητήρα ενώ ταυτόχρονα πολύ σημαντικό είναι το γεγονός ότι το αρμονικό περιεχόμενο είναι επαρκώς περιορισμένο.

Η χρήση συγκεντρωμένων τυλιγμάτων χωρίς επικάλυψη των φάσεων προσφέρει υψηλότερο συντελεστή πληρότητας χαλκού άρα και υψηλότερη πυκνότητα ισχύος. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής της ροπής σε πολύ υψηλά επίπεδα, ενώ ταυτόχρονα περιόρισε στο ελάχιστο την τιμή των ταλαντώσεων της. Παρόλα αυτά, η αναπτυσσόμενη αντι-ΗΕΔ περιλαμβάνει ανώτερες αρμονικές συνιστώσες, εν αντιθέσει με τα κατανεμημένα τυλίγματα όπου κυριαρχεί η θεμελιώδης αρμονική, χάρη στην περισσότερο ημιτονοειδή κατανομή του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο. Επιπλέον, οι συνολικές απώλειες είναι υψηλότερες για ίδια ταχύτητα περιστροφής, εξαιτίας της υψηλότερης συχνότητας λειτουργίας και των πρόσθετων απωλειών δινορρευμάτων στο δρομέα και στους μόνιμους μαγνήτες λόγω των ανώτερων αρμονικών του μαγνητικού πεδίου.

6.3.3 Επιρροή του αριθμού των πόλων στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της μηχανής

Κατά τη διάρκεια της μελέτης αναδείχθηκε πώς τόσο για κατανεμημένα τυλίγματα κλασματικού βήματος, όσο και για συγκεντρωμένα τυλίγματα διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των άκρων των πηνίων, για λειτουργία του ηλεκτρικού κινητήρα στις 450 ΣΑΛ, η αύξηση του αριθμού των πόλων οδήγησε σε αύξηση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.

6.3.4 Επιρροή των διαφόρων ποσοτικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της μηχανής

Η μελέτη ανέδειξε πώς σε αμφοτέρα τα τυλίγματα, τα ποσοτικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού κινητήρα, όπως το μήκος και το πλάτος δοντιού, το ύψος βάσεως του κ.α, επέφεραν σημαντικές αλλαγές στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και ήταν η βασική πηγή βελτιστοποίησης των χαρακτηριστικών εξόδου του κινητήρα.

6.3.5 Επιρροή των διαφόρων διαμορφώσεων δοντιού στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της μηχανής

Η επιλογή διαφορετικών διαμορφώσεων δοντιού στον στάτη του ηλεκτρικού κινητήρα, αναδείχθηκε μείζονος σημασίας για την λειτουργία του. Ανάμεσα στις οχτώ (8) διαφορετικές διαμορφώσεις δοντιών που μελετήθηκαν, αναδείχθηκαν οι δύο οι οποίες απέδωσαν μεγαλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης για κατανεμημένο και συγκεντρωμένο τύλιγμα αντίστοιχα. Επίσης αναδείχθηκαν διαμορφώσεις που αποδίδουν σε διαφορετικά σημεία από αυτά του κυρίαρχου ενδιαφέροντος για την παρούσα διπλωματική. Για παράδειγμα στη μελέτη ηλεκτρικού κινητήρα κατανεμημένου τυλίγματος διπλής στρώσεως κλασματικού βήματος, αναδείχθηκε πως η μη επιλεγείσα διαμόρφωση δοντιού κυκλικής βάσεως αποδίδει σημαντικά υψηλές τιμές ροπής και απόδοσης και μείωση της αρμονικής παραμόρφωσης, ενώ η διαμόρφωση τριγωνικής βάσεως επιφέρει μείωση των ταλαντώσεων ροπής. Αντίστοιχα στο συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των άκρων των πηνίων η διαμόρφωση τριγωνικής βάσεως επιφέρει υψηλές τιμές ροπής και μειωμένες τιμές απωλειών ισχύος.

6.3.6 Επιρροή των διαφόρων τοπολογιών μαγνήτη στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της μηχανής

Από τη μελέτη που διεξήχθη, αναδείχθηκε πως τόσο στα συγκεντρωμένα, όσο και στα κατανεμημένα τυλίγματα διπλής στρώσεως η χρήση επιφανειακών μαγνητών απέδιδε μεγαλύτερες τιμές αντικειμενικής συνάρτησης. Ωστόσο, για τις τέσσερις (4) αυτές διαφορετικές τοπολογίες μαγνητών, θεωρήθηκαν σταθερά τα χαρακτηριστικά μεγέθους τους, και συνεπώς δεν μελετήθησαν σε βάθος οι διαφορετικές διαμορφώσεις ώστε να μπορεί να εξαχθεί ένα απόλυτο και σαφές αποτέλεσμα.

6.3.7 Επιρροή των διαφορετικών σιδηρομαγνητικών λαμαρινών στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της μηχανής

Η εφαρμογή διαφορετικών τύπων σιδηρομαγνητικών λαμαρινών ως κατασκευαστικών υλικών των επιλεγέντων ηλεκτρικών κινητήρων, επέφερε σε αμφοτέρους τους δύο κινητήρες διαφορετικών τυλιγμάτων στάτη τις ίδιες μεταβολές χαρακτηριστικών εξόδου. Η χρήση πυριτιούχου σιδήρου (M235-35A και M940-50A), είχε σαν αποτέλεσμα υψηλή πυκνότητα ροπής κινητήρα, με ταυτόχρονη σημαντικά χαμηλή τιμή ταλαντώσεων ροπής. Ωστόσο εμφάνισαν σχετικά μεγάλες απώλειες πυρήνα και συνεπώς μία αρκετά καλή, αλλά όχι βέλτιστη τιμή απόδοσης. Η χρήση των κοβαλτιούχων σιδηρών (Hiperco 50 και Vacoflux 48), επέφερε σημαντική αύξηση της τιμής της ροπής του κινητήρα, αλλά και σημαντική μείωση των απωλειών πυρήνα και εμμέσως των συνολικών απωλειών του, με αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση της απόδοσης. Ταυτόχρονα παρατηρήθηκε μία σχετική αύξηση των ταλαντώσεων ροπής, η οποία όμως κινείται στα πλαίσια των επιτρεπτών ορίων. Τέλος η χρήση του καθαρού σιδήρου, απέδωσε σημαντικά στην τιμή της ροπής και των ταλαντώσεών της, ωστόσο αύξησε δραματικά τις απώλειες πυρήνα, το οποίο συνεπάγεται σημαντική μείωση της απόδοσης του κινητήρα.

6.4 Σημεία επιστημονικής συνεισφοράς

Η εργασία περιλαμβάνει τα παρακάτω σημεία επιστημονικής συμβολής:

- Ανάπτυξη παραμετροποιημένου αλγορίθμου για σχεδίαση επεξεργασία και καταγραφή των χαρακτηριστικών μίας μεγάλης πληθώρας διαφορετικών κινητήρων.
- Θεώρηση αντικειμενικής συνάρτησης που λαμβάνει υπ' όψιν την πλειοψηφία των θεωρητικά μετρήσιμων μεγεθών σε έναν ηλεκτροκινητήρα. Έτσι η βελτιστοποίηση των κινητήρων περιλαμβάνει όλες τις σημαντικές παραμέτρους.
- Μελέτη δύο διαφορετικών τυλιγμάτων στάτη, κατανεμημένου τυλίγματος διπλής στρώσεως κλασματικού βήματος, και συγκεντρωμένου τυλίγματος διπλής στρώσεως χωρίς επικάλυψη των άκρων των πηνίων.
- Μελέτη εναλλακτικών διαμορφώσεων δοντιών στάτη ηλεκτρικού κινητήρα (π.χ. τραπεζίου, ορθογωνίου και τριγωνικής βάσεως τραπεζοειδούς σώματος και στρογγυλής αύλακος)
- Μελέτη διαφορετικών τοπολογιών μαγνήτη
- Ανάδειξη εναλλακτικού τρόπου υπολογισμού απωλειών πυρήνα

6.5 Σημεία για περαιτέρω διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αναδείχθηκαν τα παρακάτω σημεία για περαιτέρω διερεύνηση:

- Συμπερίληψη μοντέλων μελέτης θερμικής και μηχανολογικής ανάλυσης.
- Περαιτέρω μελέτη ηλεκτρικών κινητήρων διαφορετικών τοπολογιών μαγνήτη, και ιδιαίτερος των επίπεδων και των μαγνητών τύπου V, ως προς την καταλληλότερη γεωμετρία.
- Κατασκευή και πειραματική επιβεβαίωση των δύο προτεινόμενων διαμορφώσεων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] *A Historical Overview of Permanent Magnet Motors - Ohio Electric Motors.*
<http://www.ohioelectricmotors.com/2015/07/a-historical-overview-of-permanent-magnet-motors/>
- [2] *Σερβοκινητήρια συστήματα, Επαγωγικοί κινητήρες και σύγχρονοι κινητήρες μόνιμου μαγνήτη, Χρήστος Α. Μαδεμλής.*
- [3] *Comparison of Five Topologies for an Interior Permanent-Magnet Machine for a Hybrid Electric Vehicle, Aimeng Wang , Yihua Jia , and W. L. Soong.*
- [4] *Influence of stator slot openings on losses and torque in axial flux permanent magnet machines, Peter Sergeant*, Hendrik Vansompel, Luc Dupr'e.*
- [5] *Advanced Iron-Loss Estimation for Nonlinear Material Behavior Daniel Eggers, Simon Steentjes, and Kay Hameyer, RWTH Aachen University, Aachen 52062, Germany.*
- [6] *Electrical machine analysis using finite elements, Nicola Bianchi.*
- [7] *Design of Rotating Electrical Machines Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen and Vale'ria Hrabovcova' 2008 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-69516-6.*
- [8] *Σχεδίαση και βελτιστοποίηση λειτουργίας κινητήρων μονίμων μαγνητών: ανάπτυξη αλγορίθμων εκμάθησης και θεώρηση του κύκλου φόρτισης, Διδακτορική Διατριβή Χρήστου Θ. Κρασόπουλου.*
- [9] *Σχεδίαση Ηλεκτρικού Κινητήρα για Χρήση σε Όχημα Εξοικονόμησης Ενέργειας, Διπλωματική εργασία. Γεώργιος Φ. Βαμβακάς, Ηλίας – Δημήτριος Χ. Αντωνακάκης.*
- [10] *Iron Loss, Science Direct.*
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/iron-loss>
- [11] *Analytical prediction of cogging torque in surface mounted permanent magnet motors, Available online at www.sciencedirect.com.*
- [12] *Silicon Steel, Science Direct.*
<https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/silicon-steel>
- [13] *Cobalt Iron Alloys, Science Direct.*
<https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/cobalt-iron-alloys>
- [14] *Practical Investigations on Cobalt-Iron Laminations for Electrical Machines, Article in IEEE Transactions on Industry Applications · July 2015.*
- [15] *Magnetic properties of pure iron soft magnetic composites coated by manganese phosphates, Sounghun Lee1, Moosung Choi1, Jongryoul Kim1.*