



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

**Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κινητήρα μόνιμων
μαγνητών για πρόωση πλοίου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Μ. Ποτηριάδης

Επιβλέπων : Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2013



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

**Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κινητήρα μόνιμων
μαγνητών για πρόωση πλοίου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Μ. Ποτηριάδης

Επιβλέπων : Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 5^η Σεπτεμβρίου 2013.

.....

Αντώνιος Κλαδάς

.....

Σταύρος Παπαθανασίου

.....

Στέφανος Μανιάς

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2013

.....
Γεώργιος Μιχαήλ Ποτηριάδης

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

Copyright © Γεώργιος Μ. Ποτηριάδης, 2013.

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.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και υποστήριξαν στη διάρκεια εκπόνησής της.

Ευχαριστώ θερμά, τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Αντώνιο Κλαδά, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντας μου την παρούσα εργασία και για καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την διάρκεια της εκπόνησής της.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον, Υποψήφιο Διδάκτορα, κ. Μίνω Μπενιακάρ, για την καθοδήγηση και την πολύτιμη υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της.

Ευχαριστώ επίσης θερμότατα τους φίλους μου, για την συμπαράσταση και υποστήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω και να αφιερώσω στην οικογένεια μου την παρούσα εργασία, ως ένδειξη ευγνωμοσύνης, για την αμέριστη στήριξη και συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία, πραγματεύεται μια ολοκληρωμένη προσέγγιση σχεδιασμού και βελτιστοποίησης, κινητήρων μόνιμων μαγνητών, για χρήση σε εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης και εν προκειμένω, ιστιοφόρου σκάφους.

Αρχικά, έλαβε χώρα μια εκτενής βιβλιογραφική αναζήτηση επί των υφιστάμενων θερμικών κινητήρων, των συστημάτων μετάδοσης, των συστημάτων πρόωσης και των τοπολογιών των. Επίσης πραγματοποιήθηκε μια αναζήτηση επί των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των ιστιοφόρων γαστρών και των τυχόντων διαφορετικών αναγκών που εκπορεύονται αυτών. Συμπληρωματικά, αναζητήθηκε στη σχετική βιβλιογραφία, η υδροδυναμική συμπεριφορά των συστημάτων πρόωσης και οι απαιτήσεις των τόσο μέσω της σχετικής θεωρίας, όσο και μέσω εξειδικευμένου προγράμματος υδροδυναμικής (Free!ship).

Επόμενο βήμα, ήταν η μελέτη των ήδη υπάρχοντων ηλεκτρικών συστημάτων πρόωσης, των κινητήρων, των συστημάτων οδήγησης, μπαταριών και γενικά της συνολικής ηλεκτρικής εγκατάστασης. Επίσης δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή στις υπάρχουσες τοπολογίες καθώς και νέες τάσεις. Απόρροια των παραπάνω, ήταν οι βασικές προδιαγραφές του κινητήρα προς σχεδίαση.

Εν συνεχεία, βάσει των παραπάνω προδιαγραφών, αναζητήθηκαν στη σχετική βιβλιογραφία οι πιθανές εναλλακτικές λύσεις σχεδίασης κινητήρα (τύπος κινητήρα, τύλιγματος κοκ). Η επιλεγθείσα τοπολογία ήταν σύγχρονος κινητήρας επιφανειακών μόνιμων μαγνητών, με συγκεντρωμένο τύλιγμα διπλής στρώσης κλασματικού βήματος. Κατόπιν έλαβε χώρα η προκαταρκτική σχεδίαση θεωρώντας τυπικές τιμές ηλεκτρικών και μαγνητικών φορτίσεων. Επιπρόσθετα, δημιουργήθηκε η απαραίτητη για την συνέχεια παραμετρική σχεδίαση του κινητήρα, όπου δύναται να μεταβληθεί το σύνολο των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κινητήρα. Ταυτόχρονα υπολογίζονται και όλα τα απαραίτητα μεγέθη για την αξιολόγηση του κινητήρα (όπως ροπή, κυμάτωση ροπής, αναπτυσσόμενη αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη (HEΔ), αρμονική παραμόρφωση αντί-HEΔ, απώλειες).

Ακολουθως, κατόπιν βιβλιογραφικής αναζήτησης των διάφορων μεθόδων βελτιστοποίησης, επιλέχθηκε ο εξελικτικός αλγόριθμος ισχύος Pareto (SPEA-Strength Pareto Evolutionary Algorithm). Πρόκειται για πολυκριτηριακή μέθοδο βελτιστοποίησης, που ανήκει στην κατηγορία των εξελικτικών αλγορίθμων και προτιμήθηκε για την ικανότητα σύγκλισης, και για το εύρος λύσεων που προσφέρει. Ο αλγόριθμος υλοποιήθηκε σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB.

Βάσει των επιθυμητών χαρακτηριστικών επίδοσης και απόδοσης του κινητήρα, δημιουργήθηκαν οι κατάλληλες αντικειμενικές συναρτήσεις και μέσω της διεπαφής MATLAB-FEMM έλαβε χώρα η βελτιστοποίηση του κινητήρα, από όπου λάβαμε το μέτωπο Pareto των λύσεων. Από αυτές μέσω επιπρόσθετων κριτηρίων λήφθηκε η καλύτερα συμβιβαστική λύση και η τελική γεωμετρία.

Η επιλεγείσα γεωμετρία αναλύθηκε ηλεκτρικά και θερμικά και καθορίστηκαν τα εκτιμώμενα, βασικά ηλεκτρικά και μηχανικά μεγέθη καθώς και ο τύπος ψύξης του κινητήρα.

Λέξεις Κλειδιά

Ηλεκτροπρόωση, πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, ολική βελτιστοποίηση, κινητήρες μόνιμων μαγνητών, απόδοση, συγκεντρωμένο τύλιγμα, κλασματικό βήμα, εξελικτικός αλγόριθμος, γενετικός αλγόριθμος, εξελικτικός αλγόριθμος ισχύος Pareto, SPEA, SPEA2, SPEA2+, εξηλεκτρισμένο πλοίο, θερμική ανάλυση κινητήρα, επιφανειακοί μόνιμοι μαγνήτες, PMSM

Abstract

The present diploma thesis undertakes a complete approach for designing and optimizing, permanent magnet motors, for electric propulsion applications, and in particular for sailboats.

Initially, an extensive bibliographical research, on existing heat engines, transmission systems, propulsion systems and topologies was conducted. A research was also performed for special characteristics of sailboat hulls and as a consequence, special demands. Additionally, the hydrodynamic behavior of hulls and propulsion systems was sought, via both theoretical analysis based on annotated bibliography and specialized software for hydrodynamic calculations (Free!ship).

As a next step, the existing electric propulsion systems, motors, motor drive systems, batteries and in general the electrical installation were thoroughly studied. Moreover, current topologies and future trends were given additional attention. As a result, the basic motor specifications were determined.

Based on the specifications, the alternative motor configurations (in terms of winding configuration, motor type etc.) were investigated. The selected configuration was the permanent magnet synchronous motor, with fractional slot concentrated double layer winding. Afterwards, a preliminary design of the machine was conducted, taking into consideration typical electric and magnetic loadings. Additionally, a parameterized motor design script was implemented, through which we can alter the motor geometry in its entity. Simultaneously, the values needed for the motor performance and efficiency evaluation (such as torque, torque ripple, back-EMF, THD of back-EMF, losses) are calculated.

Following, after an extensive bibliographical research on the optimization methods, SPEA (Strength Pareto Evolutionary Algorithm) was selected. SPEA is a multi-objective evolutionary algorithm, and was chosen due to the convergence capability and the diversity of the solutions acquired. The algorithm was implemented in MATLAB.

Based on the desired motor performance and efficiency characteristic, suitable objective functions were created, and via MATLAB-FEMM interface, the optimization took

place and the Pareto front was acquired. After the addition of extra criteria, the best compromise solution and consequently motor geometry was selected.

The final geometry was analyzed electrically and thermally and the basic electrical and mechanical parameters, along with the motor's cooling system were defined.

Key Words

Electric propulsion, multi-objective optimization, global optimization, permanent magnet motors, efficiency, concentrated winding, fractional slot, evolutionary algorithm, genetic algorithm, strength pareto evolutionary algorithm, SPEA, SPEA2, SPEA2+, all electric ship, thermal motor analysis, surface permanent magnet, PMSM, pareto front.

Περιεχόμενα

<i>Ευχαριστίες</i>	5
<i>Περίληψη</i>	6
<i>Abstract</i>	8
<i>Περιεχόμενα</i>	10
<i>Λίστα Σχημάτων</i>	13
<i>Λίστα πινάκων</i>	14
Κεφάλαιο 1ο. Ηλεκτροπρόωση	16
1.1 Εισαγωγή	16
1.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα	16
1.3 Μέρη ιστιοφόρου σκάφους	19
1.4 Συνηθέστερες τοπολογίες	23
1.5 Επιλογή προδιαγραφών	24
Κεφάλαιο 2ο. Σχεδίαση και διαμόρφωση ηλεκτρικών μηχανών	30
2.1 Κατασκευαστικά υλικά ηλεκτρικών μηχανών	30
2.1.1 Σιδηρομαγνητικά υλικά	30
2.1.2 Μόνιμοι Μαγνήτες	33
2.2 Θεμελιώδεις σχέσεις προκαταρκτικής σχεδίασης	36
2.2.1 Βασικά μεγέθη	36
2.2.2 Διαστασιολόγηση διακένου	40
2.3 Απώλειες ηλεκτρικών μηχανών	46
2.3.1 Απώλειες χαλκού	46
2.3.2 Απώλειες πυρήνα	46
2.3.3 Απώλειες δινορρευμάτων στους μαγνήτες	50
2.3.4 Απώλειες περιστροφής	51
2.3.5 Διαφεύγουσες απώλειες	51
2.4 Τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών	53
2.4.1 Συγκεντρωμένο τύλιγμα	54
2.5 Διαμορφώσεις δρομέα μηχανών μονίμων μαγνητών	58
2.5.1 Μηχανές επιφανειακών μονίμων μαγνητών με εσωτερικό δρομέα	59

2.5.2	Μηχανές εσωτερικά επιφανειακών μαγνητών	59
2.5.3	Μηχανές εσωτερικών μαγνητών	59

Κεφάλαιο 3ο. Διαστασιολόγηση και προκαταρκτική σχεδίαση κινητήρα μόνιμων μαγνητών ισχύς 9000 Watt **61**

3.1	Προδιαγραφές κινητήρα	61
3.2	Προκαταρκτική σχεδίαση	61
3.2.1	Διαστασιολόγηση διακένου	62
3.2.2	Προσδιορισμός γεωμετρίας και μεγεθών στάτη	64
3.2.3	Ειδική ηλεκτρική και μαγνητική φόρτιση	66
3.2.4	Προσδιορισμός αριθμού αυλάκων	66
3.2.5	Τύλιγμα κινητήρα, αλληλουχία φάσεων	69
3.2.6	Διατομή αύλακας	71
3.2.7	Προσδιορισμός δρομέα και μαγνητών	72
3.2.8	Καμπύλη απομαγνήτισης	73

Κεφάλαιο 4ο. Παραμετροποιημένη σχεδίαση και ανάλυση ηλεκτρικού κινητήρα
75

4.1	Πεδιακή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία	75
4.1.1	Μαγνητοστατικά προβλήματα	76
4.1.2	Οριακές συνθήκες	79
4.1.3	Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων	80
4.1.4	Το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων FEMM	81
4.2	Σχεδίαση γεωμετρίας	82
4.3	Υπολογισμός επίδοσης και απόδοσης μηχανής	86
4.3.1	Υπολογισμός γωνίας εκκίνησης	87
4.3.2	Υπολογισμός μέσης ροπής και κυμάτωσης	88
4.3.3	Υπολογισμός επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης	89
4.3.4	Υπολογισμός απωλειών	92
4.3.5	Υπολογισμός απόδοσης	98
4.3.6	Υπολογισμός αυτεπαγωγών ευθέως και εγκάρσιου άξονα	98
4.3.7	Υπολογισμός λοιπών μεγεθών	99
4.4	Θερμική ανάλυση	100

Κεφάλαιο 5ο. Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση μέσω υβριδικού εξελικτικού αλγόριθμου ισχύος Pareto, (Strength Pareto Evolutionary Algorithm, SPEA) **105**

5.1	Θεμελιώδεις έννοιες βελτιστοποίησης	105
------------	--	------------

5.1.1	Η έννοια του συστήματος	105
5.1.2	Γενικός ορισμός της βελτιστοποίησης	106
5.1.3	Ορισμός ακρότατων	107
5.1.4	Βελτιστοποίηση πραγματικών συναρτήσεων	108
5.1.5	Χώροι αναζήτησης και αποτίμησης	109
5.2	Ορισμός πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης	111
5.2.1	Ορισμός προβλήματος	111
5.2.2	Κυριαρχία	112
5.2.3	Βέλτιστες λύσεις Pareto	114
5.3	Το πρόβλημα επιλογής της καλύτερης συμβιβαστικής λύσης	115
5.4	Εξελικτικοί αλγόριθμοι επίλυσης πολυκριτηριακών προβλημάτων	116
5.5	Ο εξελικτικός αλγόριθμος Pareto ισχύος (Strength Pareto Evolutionary Algorithm, SPEA)	118
5.6	Επίδοση αλγόριθμου	124
Κεφάλαιο 6ο. Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κινητήρα μόνιμων μαγνητών		126
6.1	Καθορισμός πολυκριτηριακού προβλήματος βελτιστοποίησης	126
6.1.1	Μεταβλητές σχεδίασης και καθορισμός ορίων	127
6.1.2	Αρχική προσέγγιση τοπολογίας κινητήρα	128
6.1.3	Καθορισμός στοχικών συναρτήσεων	131
6.2	Αποτελέσματα βελτιστοποίησης	134
6.2.1	Επιλογή της καλύτερα συμβιβαστικής λύσης	136
6.3	Σύγκριση αρχικής και τελικής γεωμετρίας	144
6.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων ως προς την εφαρμογή	146
Κεφάλαιο 7ο. Συμπεράσματα		147
7.1	Συμπεράσματα	147
7.2	Σημεία προαγωγής της επιστήμης	149
7.3	Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση	150
Αναφορές		153

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1-1 Μοντελοποιημένο ιστιοφόρο σκάφος	19
Σχήμα 1-2 Φωτογραφίες από saildrive. Αριστερά το saildrive συζευγμένο με τον κινητήρα και δεξιά η τομή του saildrive της Lombardini Marine	21
Σχήμα 1-3 Προπέλα μεταβλητού βήματος 4 πτερυγίων σε δύο διαφορετικές θέσεις, της Varigror....	23
Σχήμα 2-1 Αριστερά βρόχος υστέρησης με απεικόνιση την παραμένουσας μαγνήτισης, της δύναμης επαναφοράς και του σημείου κορεσμού. Δεξιά με κόκκινο ο μείζων βρόχος υστέρησης και με πράσινο ελάσσονες βρόχοι.....	32
Σχήμα 2-2 Καμπύλη απομαγνήτισης μόνιμου μαγνήτη N42 NdFeb, e-Magnets UK©	35
Σχήμα 2-3 Βασικές διαστάσεις ηλεκτρικής μηχανής	36
Σχήμα 2-4 α) 4-πολική, β) 20-πολική μηχανή μόνιμων μαγνητών.....	44
Σχήμα 2-5 : Ενεργό βάρος και απώλειες πυρήνα συναρτήσει του αριθμού των πόλων για διάφορες Σ.Μ.Μ.Μ.	45
Σχήμα 2-6 Βρόχος υστέρησης.....	47
Σχήμα 2-7 Διαμορφώσεις τυλιγμάτων στάτη: (α) 24 αύλακες, επικαλυπτόμενο, διανεμημένο, (β) 6 αύλακες, επικαλυπτόμενο, (γ) 6 αύλακες, μη επικαλυπτόμενο, όλα τα δόντια τυλιγμένα, (δ) 6 αύλακες, μη επικαλυπτόμενο, τυλίγματα στα μισά δόντια	53
Σχήμα 2-8 (α) Πλήρες, (β) κλασματικό βήμα.....	56
Σχήμα 2-9 Τυλίγματα (α) μονής στρώσης, (β) διπλής στρώσης	56
Σχήμα 2-10 Αριστερά μηχανή ακτινικής ροής, δεξιά αξονικής ροής.	58
Σχήμα 2-11 Αριστερά μηχανή επιφανειακών εξωτερικών μόνιμων μαγνητών $P=4, Q=6$ (SMPM) και δεξιά μηχανή εσωτερικών μόνιμων μαγνητών $P=4, Q=12$ (IPM)	60
Σχήμα 3-1 Παραδείγματα συμμετρικής και ασύμμετρης έλξης	68
Σχήμα 3-2 Βροχοτύλιγμα	70
Σχήμα 3-3 Καμπύλες απομαγνήτισης διάφορων μαγνητών	73
Σχήμα 4-1 Τοπολογία κινητήρα	82
Σχήμα 4-2 Βασικές διαστάσεις και ορισμός αυτών	83
Σχήμα 4-3 Διαστασιολόγηση αύλακας και δοντιών	84
Σχήμα 4-4 Καμπύλες υπολογιστικής ακρίβειας και χρόνου συναρτήσει του αριθμού στοιχείων	86
Σχήμα 4-5 Διάγραμμα ροής ρουτίνας MATLAB	87
Σχήμα 4-6 Διαδικασία υπολογισμού γωνίας εκκίνησης	88
Σχήμα 4-7 Κυμάτωση ροπής	89
Σχήμα 4-8 Αναπαράσταση μέσου μήκους μεταξύ αυλάκων.....	93
Σχήμα 4-9 Καμπύλες ειδικών απωλειών λαμαρίνων.....	95
Σχήμα 5-1 Παράδειγμα τοπικών και ολικών ακρότατων.....	107
Σχήμα 5-2 Αριστερά το πεδίο αναζήτησης και δεξιά η επιφάνεια απόκρισης.....	111
Σχήμα 5-3 Γραφική απεικόνιση των σχέσεων κυριαρχίας στο δισδιάστατο χώρο.....	113

Σχήμα 5-4 Παράδειγμα clustering κατά SPEA2 για $k=1$. Αριστερά φαίνεται το αρχικό μέτωπο και στα δεξιά το μέτωπο μετά την εφαρμογή του clustering καθώς και η σειρά με την οποία αφαιρούνται τα άτομα από αυτό	122
Σχήμα 5-5 Διάγραμμα ροής αλγόριθμου βελτιστοποίησης	124
Σχήμα 5-6 Μέτωπο Pareto της δοκιμαστικής συνάρτησης Viennet για $N=110$ και 30 γενιές	125
Σχήμα 6-1 Βασικές παράμετροι βελτιστοποίησης	127
Σχήμα 6-2 Γεωμετρία αρχικής σχεδίασης	129
Σχήμα 6-3 Ανάλυση αρχικής γεωμετρίας	129
Σχήμα 6-4 Διάγραμμα ροπής αρχικής γεωμετρίας	130
Σχήμα 6-5 Κυματομορφή επαγόμενης ΗΕΔ αρχικής σχεδίασης	130
Σχήμα 6-6 Φασματική ανάλυση ΗΕΔ αρχικής γεωμετρίας	131
Σχήμα 6-7 Μέτωπο Pareto και προβολή των σημείων	134
Σχήμα 6-8 Μέτωπο Pareto υπό διαφορετικές οπτικές γωνίες	135
Σχήμα 6-9 Ιστογράμματα και δισδιάστατες παραστάσεις των αντικειμενικών συναρτήσεων	135
Σχήμα 6-10 Τελική διαμόρφωση κινητήρα	137
Σχήμα 6-11 Στιγμιότυπο ανάλυσης τελικής γεωμετρίας κινητήρα	138
Σχήμα 6-12 Καμπύλη ροπής συναρτήσει γωνίας εκκίνησης τελικής γεωμετρίας	138
Σχήμα 6-13 Διάγραμμα μηχανικής ροπής τελικής γεωμετρίας	139
Σχήμα 6-14 Ροπή ευθυγράμμισης τελικής γεωμετρίας	139
Σχήμα 6-15 Επαγόμενη ΗΕΔ κινητήρα τελικής γεωμετρίας	140
Σχήμα 6-16 Φασματική ανάλυση ΗΕΔ τελικής γεωμετρίας	140
Σχήμα 6-17 Θερμική ανάλυση τελικής γεωμετρίας κινητήρα	143
Σχήμα 6-18 Τρισδιάστατη αναπαράσταση τελικής γεωμετρίας από διαφορετικές όψεις	144

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1-1 Πίνακας βασικών προδιαγραφών κινητήρα	29
Πίνακας 2-1 Περιοχές τιμών λόγου L/tr και χαρακτηρισμός σχεδίασης	42
Πίνακας 2-2: Χαρακτηριστικά διανεμημένων και συγκεντρωμένων τυλιγμάτων	54
Πίνακας 2-3 Συγκριτικός πίνακας τυλιγμάτων μονής και διπλής στρώσης	57
Πίνακας 3-1 Πίνακας συντελεστών τυλίγματος για διάφορους συνδυασμούς πόλων και αυλάκων	66
Πίνακας 3-2 Χαρακτηριστικά μαγνήτη NdFeB 40	73
Πίνακας 4-1 Πίνακας βασικών παραμέτρων σχεδίασης	83
Πίνακας 4-2 Πίνακας τυπικών συντελεστών θερμικής αγωγιμότητας	103
Πίνακας 6-1 Πίνακας σταθερών παραμέτρων σχεδίασης	128
Πίνακας 6-2 Πίνακας ορίων μεταβλητών σχεδίασης	128
Πίνακας 6-3 Σύγκριση αρχικής και τελικής γεωμετρίας	144
Πίνακας 6-4 Σύγκριση τελικής γεωμετρίας με άλλη μη-κυρίαρχη από το μέτωπο Pareto	145

Κεφάλαιο 1ο. Ηλεκτροπρόωση

1.1 Εισαγωγή

Ηλεκτρική πρόωση (ηλεκτροπρόωση), ορίζεται ως η πρόωση, στην οποία η κίνηση του/των κινητήριου/ων άξονα/αξόνων του πλοίου/σκάφους, παράγεται από ηλεκτρικό/ούς κινητήρα/ες και όχι από θερμικούς, όπως ήταν η συνήθης πρακτική τα προηγούμενα χρόνια. [1]

Συνολικά τα συστήματα ανάλογα με την πηγή της ηλεκτρικής ενέργειας κατηγοριοποιούνται ως εξής: [2]

- Υβριδικά, καλούνται τα συστήματα όπου ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος (με θερμικό κινητήρα) παράγει την ηλεκτρική ενέργεια κατά μείζονα λόγο, ασχέτως αν μπορεί να υπάρχουν και άλλες πηγές ενέργειας όπως αιολική, φωτοβολταϊκά κλπ καθώς και συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (μπαταρίες κυρίως)
- Πλήρως ηλεκτρικά (αυτόνομα συστήματα) όπου η κύρια πηγή ενέργειας προέρχεται από αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ δύναται να υπάρχουν και άλλες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες κλπ)

Η ηλεκτρική πρόωση παρότι υφίσταται εδώ και αρκετά χρόνια, πρόσφατα άρχισε να επεκτείνεται με γοργούς ρυθμούς, σε εφαρμογές μικρότερης ισχύος, όπως στα ιστιοφόρα. Σε αυτό συνετέλεσε ιδιαίτερα, η πρόοδος των ηλεκτρονικών ισχύος, καθώς και των κινητήρων μονίμων μαγνητών που αύξησαν την πυκνότητα ισχύος και ροπής, καθώς και την απόδοση, επαναφέροντας έτσι στο προσκήνιο την ηλεκτροπρόωση.

1.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Όπως κάθε σε κάθε εφαρμογή, έτσι και στην ηλεκτρική πρόωση λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών και απαιτήσεων, εμφανίζονται κάποια εγγενή πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τα πλεονεκτήματα σχετίζονται κυρίως με την ικανότητα των

ηλεκτροκινητήρων να παράγουν υψηλή και γραμμική καμπύλη ροπή σε χαμηλές στροφές, και την υψηλή απόδοση καθώς και πυκνότητα ισχύος και ροπής [1] [3] [4].

Πλεονεκτήματα

- Ακριβής έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής και της θέσης της προπέλας.
- Υψηλή δυνατότητα ελιγμών λόγω αυξημένης ροπής.
- Αμεσότερη απόκριση κατά τη διάρκεια χειρισμών.
- Χαμηλά επίπεδα θορύβου και κραδασμών (NVH).
- Οικονομία καυσίμου (στα υβριδικά συστήματα), εφόσον είναι εφικτή η φόρτιση της θερμικής μηχανής κοντά στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας.
- Ανεξαρτησία (στα αυτόνομα συστήματα)
- Χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Σε αντίθεση με τους θερμικούς κινητήρες η συντήρηση των ηλεκτροκινητήρων είναι σπάνια.
- Εξοικονόμηση χώρου, που προσφέρει ευελιξία στον σχεδιασμό του σκάφους.
- Ευκολία αυτοματισμού.
- Αυξημένη αξιοπιστία (seaworthiness), συνολικά το σύστημα πρόωσης απλοποιείται άρα είναι πιο αξιόπιστο, ενώ και οι ηλεκτροκινητήρες έχουν μικρότερη πιθανότητα βλάβης από τους θερμικούς.
- Περιορισμός των εκπεμπόμενων ρύπων, εφόσον η κατανάλωση καυσίμου είναι μικρότερη, ενώ οι εκπομπές NOx είναι αισθητά χαμηλότερες.
- Περιορισμός του κινδύνου ρύπανσης του περιβάλλοντος από ατυχήματα όπως αυτά των δεξαμενοπλοίων, χάρη στην ταχύτερη απόκριση του συστήματος.
- Δυνατότητα περαιτέρω αύξησης της απόδοσης λόγω της αυξημένης ικανότητας ροπής, συνεπώς καθίσταται δυνατή η χρήση ελίκων μεγαλύτερης διαμέτρου και υψηλότερου βήματος που είναι πιο αποδοτικές.
- Δυνατότητα POD συστημάτων που βελτιώνουν περαιτέρω την απόδοση του κήτους.
- Απεξάρτηση από συμβατικές πηγές ενέργειας.
- Πλέον το κόστος έχει μειωθεί σημαντικά ενώ ως επένδυση εμφανίζει μεγαλύτερη αξία από τα θερμικά συστήματα.
- Φιλικότερο προς το περιβάλλον και ανεξαρτησία από νόρμες περιορισμού ρύπων.

Μειονεκτήματα

Τα μειονεκτήματα έγκεινται κυρίως στο υψηλό κόστος. Είτε της συνολικής ηλεκτρικής εγκατάστασης και ιδιαίτερα στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε αυτόνομα συστήματα, είτε στις ανάγκες ριζικών μεταβολών στο σύστημα πρόωσης [5].

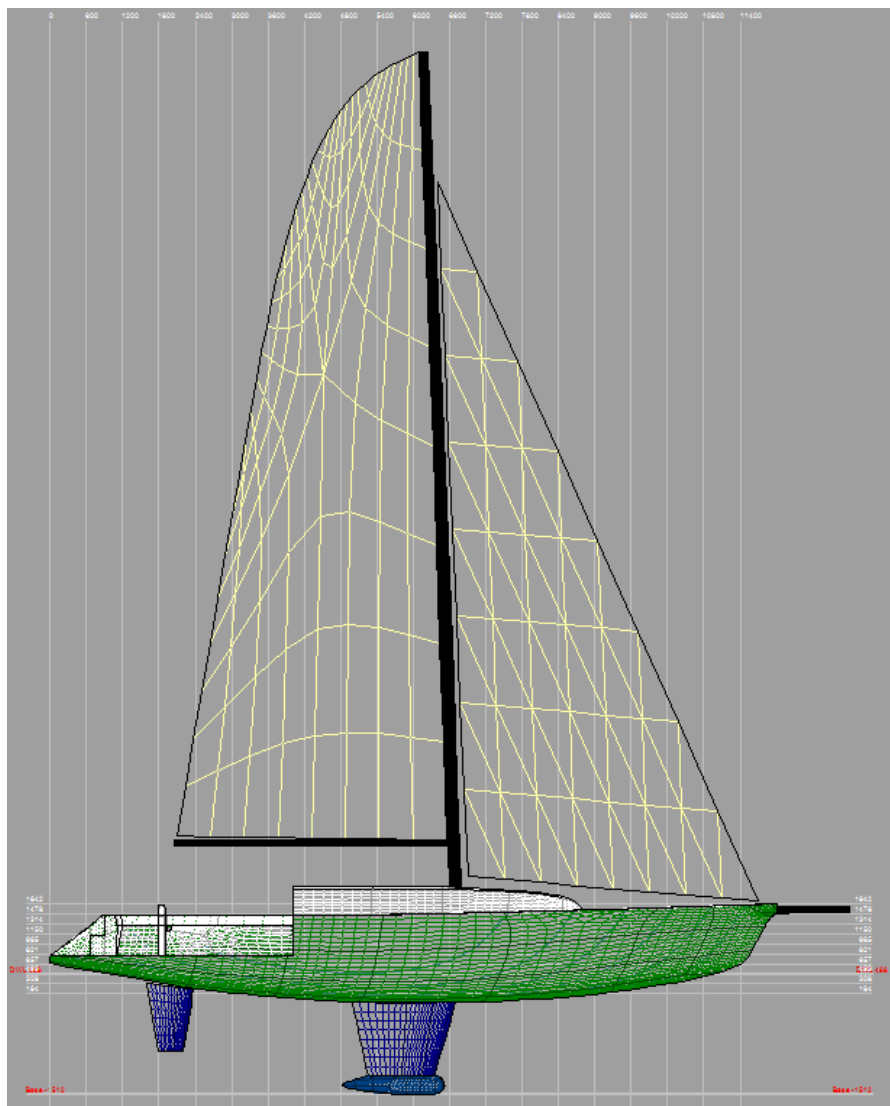
- Υψηλό κόστος αρχικής επένδυσης. Παρότι το κόστος σε όλα τα υποσυστήματα φθίνει συνεχώς, ειδικά σε περιπτώσεις μετατροπής από θερμική σε ηλεκτρική πρόωση, όπου πιθανώς να χρειαστούν εκτενής αλλαγής ώστε να επιτευχθούν τα ζητούμενα αποτελέσματα, είναι υψηλότερο. Αναμφίβολα όμως εφόσον αρχίσουν να σχεδιάζονται αμιγώς ηλεκτρικά σκάφη τα κόστη θα τείνουν να γίνουν συγκρίσιμα.
- Υψηλότερες απώλειες στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης, σε σύγκριση με το μηχανικό σύστημα. Για παράδειγμα, σε συμβατικό σύστημα κινητήρα Diesel - προπέλας ρυθμιζόμενου βήματος, οι απώλειες του συστήματος μετάδοσης-εντοπίζονται στην έλικα και τον μειωτήρα- είναι περίπου 4% όταν η έλικα λειτουργεί στον βέλτιστο συνδυασμό ταχύτητας/βήματος. Σε εγκατάσταση νηξελο-ηλεκτρικής πρόωσης, το σύστημα μετάδοσης προκαλεί απώλειες 7 - 8%, που οφείλονται στις γεννήτριες, στους μετασχηματιστές, στους μετατροπείς συχνότητας και στους προωστήριους ηλεκτροκινητήρες. Επομένως, ο ολικός βαθμός απόδοσης είναι υψηλότερος στο σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης μόνον όταν κάθε μηχανή λειτουργεί σε σταθερή ταχύτητα περιστροφής και επί μεγάλα χρονικά διαστήματα στη βέλτιστη περιοχή.
- Προβλήματα ποιότητας ηλεκτρικής ενέργειας εξαιτίας της εγκατάστασης διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος.
- Οι υπάρχουσες σχεδιάσεις σκαφών, έχοντας λάβει χώρα λαμβάνοντας υπόψιν τις σχεδιάσεις των θερμικών κινητήρων συχνά αποτελούν τροχοπέδη (συνήθως μέσω χωροταξικών περιορισμών που εντοπίζονται κυρίως στην έλικα) για την επίτευξη της μέγιστης δυνατής βελτίωσης της συνολικής απόδοσης.
- Οι υπάρχουσες προπέλες δεν έχουν σχεδιαστεί με γνώμονα την ηλεκτρική πρόωση και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της, συνεπώς χρήζουν βελτίωσης ώστε να αξιοποιηθούν στο μέγιστο όλες οι δυνατότητες (π.χ. ανάκτηση ενέργειας, υψηλή ροπή σε χαμηλές στροφές).

1.3 Μέρη ιστιοφόρου σκάφους

Ένα ιστιοφόρο σκάφος απαρτίζεται από τα εξής μέρη:

- Την γάστρα του σκάφους
- Την ιστιοφορία
- Το σύστημα πρόωσης saildrive ή αξονικό, με έλικα
- Το σύστημα παραγωγής κίνησης
- Το ηλεκτρικό σύστημα

Στο ακόλουθο σχήμα, εμφανίζεται το μοντέλο του ιστιοφόρου, από όπου λήφθηκαν οι προδιαγραφές. [6]



Σχήμα 1-1 Μοντελοποιημένο ιστιοφόρο σκάφος

Ειδικότερα θα εστιάσουμε στα ακόλουθα συστήματα, από όπου και πηγάζουν οι προδιαγραφές του ηλεκτροκινητήρα.

Γάστρα σκάφους

Αδιαμφισβήτητα, η γάστρα είναι αυτή που επιβάλλει κατά κύριο λόγο τις απαιτήσεις ισχύος και ώσης. Τα ποικίλα γεωμετρικά (όπως πχ. γωνίες, όγκοι, λόγος μήκους προς πλάτος, καμπυλότητες και πολλά άλλα) και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά (τραχύτητα υλικού, βάρος κλπ) καθορίζουν την υδροδυναμική συμπεριφορά και απόδοση. Εν γένει, υπάρχουν τρία είδη γαστρών. Οι εκτοπίσματος, ημιεκτοπίσματος (εδώ συχνά διαφοροποιείται από τις γάστρες ημιπλαναρίσματος) και πλαναρίσματος. Η διαφοροποίηση στηρίζεται στο αν κατά την τέλεση πλόων, δύναται να μειώσει το εκτόπισμα του, που σύμφωνα με την αρχή του Αρχιμήδη είναι πάντα ίσο με το βάρος του. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε μόνο με σκάφη μιας γάστρας και εκτοπίσματος, στις οποίες δεν μειώνεται το εκτόπισμα (μολονότι οι πολύγαστρες εφαρμογές παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω των μεγάλων ταχυτήτων που μπορούν να αναπτύξουν). Θεωρείται λοιπόν απαραίτητο οποιαδήποτε μελέτη, να λαμβάνει υπόψιν τα παραπάνω χαρακτηριστικά.

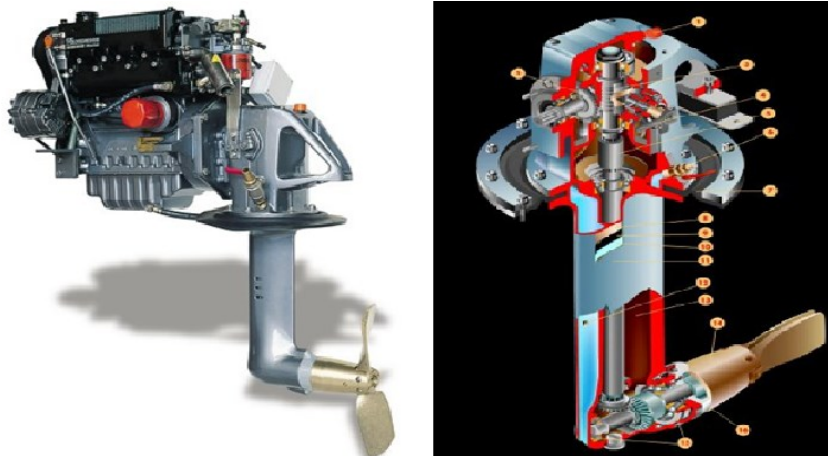
Ηλεκτρικό σύστημα

Απαρτίζεται από τα υποσυστήματα αποθήκευσης και διαχείρισης ενέργειας (μπαταρίες, φορτιστές, συσκευές γαλβανικής απομόνωσης κοκ.), τα συστήματα παραγωγής ενέργειας (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες ή θερμικές γεννήτριες), το σύστημα ελέγχου του κινητήρα, τον ηλεκτροκινητήρα και όλες τις αναγκαίες καλωδιώσεις. Εκτενέστερη αναφορά θα γίνει στη συνέχεια [7].

Μηχανικό σύστημα

Απαρτίζεται από τον άξονα μετάδοσης της κίνησης (σε άλλες εφαρμογές πιθανώς πάνω από ένα), όλους τα απαραίτητους συνδέσμους (ελαστικούς, αλλαγής κλίσης κλπ) και τον μειωτήρα στροφών εφόσον αυτός υπάρχει. Οι συνηθέστερες τοπολογίες μετάδοσης κίνησης, που απαντώνται στα ιστιοφόρα είναι:

- Saildrive. Η μετάδοση saildrive αποτελείται από ένα σύνολο, αξόνων και γραναζιών που επιτρέπει την λήψη κίνησης από την θερμική εσωλέμβια μηχανή στον οριζόντιο άξονα, και την απόδοση της κίνησης εκτός του σκάφους πλέον πάλι στον οριζόντιο άξονα. Τα saildrive, μοιάζουν αρκετά με τα Z-drives (συστήματα μετάδοσης τύπου Z λόγω της χαρακτηριστικής μορφής).
- Αξονικός, με άξονα που μπορεί να είναι είτε ευθύς, είτε κεκλιμένος ή και με παραπάνω από μια αλλαγές κλίσης.



Σχήμα 1-2 Φωτογραφίες από saildrive. Αριστερά το saildrive συζευγμένο με τον κινητήρα και δεξιά η τομή του saildrive της Lombardini Marine

Η μετάδοση τύπου saildrive, θα μπορούσε βιαστικά, λόγω των αυξημένων απωλειών που εμφανίζει να αποκλειόταν από μια εφαρμογή όπως αυτή, που η απόδοση έχει μείζονα ρόλο. Στην πράξη όμως, παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον και θα πρέπει να μελετηθούν εκτενώς σε εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης. Αυτό οφείλεται στο διαφορετικό προφίλ των καμπύλων ροπής και ισχύος που έχουν οι ηλεκτρικοί κινητήρες σε σχέση με τους θερμικούς, σε συνδυασμό με την ικανότητα παραγωγής πολύ υψηλής ροπής σε χαμηλές στροφές, συνθήκες που ευνοούν την χρήση προπελών μεγάλης διαμέτρου και βήματος, οι οποίες είναι αρκετά πιο αποδοτικές ώστε να υπερκαλύπτουν τις αυξημένες απώλειες που παρουσιάζουν τα saildrive. Τονίζεται εδώ πως λόγω γεωμετρία της γάστρας η χρήση μεγάλης διαμέτρου ήταν απαγορευτική λόγω τοπολογικών ή υδροδυναμικών περιορισμών, κάτι που λύνεται σε μεγάλο βαθμό με. Για όλους τους παραπάνω λόγους θεωρούμε ως σύστημα μετάδοσης στην παρούσα εργασία τύπου saildrive.

Το σύστημα πρόωσης

Αποτελείται από την έλικα (εν προκειμένω αναφερόμαστε σε εφαρμογή μονής έλικας). Αυτή μπορεί να είναι είτε σταθερού βήματος (FPP fixed pitch propeller), μεταβλητού βήματος (VPP variable pitch propeller), ενώ τέλος ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι προπέλες μεταβλητού βήματος με δυνατότητα αναδίπλωσης (folding propellers).

Η έλικα είναι υπεύθυνη για την μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε πρόωση (ευθύγραμμη κίνηση) και αυτό αναδεικνύει και την επίδραση που έχει η απόδοσή της στο συνολικό αποτέλεσμα. Βέβαια όπως σε όλα τα συστήματα όπου λαμβάνει χώρα κάποια μετατροπή, έχουμε απώλειες και στην προπέλα εμφανίζονται από τις υψηλότερες. Μια προπέλα χαρακτηρίζεται από τον τύπο της που ήδη αναφέραμε, την διάμετρο, το βήμα (pitch) -δηλαδή την θεωρητική πρόοδο που θα κατέγραφε σε μια πλήρη περιστροφή αν δεν υπήρχε ολίσθηση- και τον αριθμό των πτερυγίων της.

Οι προπέλες σταθερού βήματος έχουν χαμηλότερο κόστος και μεγαλύτερη αξιοπιστία καθώς δεν έχουν κινητά μέρη που μπορούν να αστοχήσουν ή να επηρεαστούν από τη ρυπαρότητα, και είναι ευκολότερες στην κατασκευή και επισκευή. Αντίστοιχα οι έλικες μεταβλητού βήματος πλεονεκτούν σε εφαρμογές όπου η ταχύτητα έχει έντονη μεταβλητότητα, στην λειτουργία “ανάποδα” και γενικά όπου απαιτείται υψηλή ελικτική ικανότητα σε κατάσταση διαφορετικής από της ονομαστικής, όπου οι σταθερού βήματος λειτουργούν σε υποβέλτιστη κατάσταση.

Μέχρι τώρα η συνηθέστερη επιλογή στα ιστιοφόρα σκάφη ήταν η χρήση σταθερού βήματος. Πέραν της οικονομίας στο κόστος, τα πλεονεκτήματα της χρήσης μιας προπέλας μεταβλητού βήματος ήταν οριακά λόγω του βασικού προφίλ χρήσης του κινητήρα. Πιο συγκεκριμένα, στα ιστιοφόρα σκάφη ο κινητήρας χρησιμοποιείται κατά βάση ή ελλείπει ανέμου, ή λόγω υπερβολικού ανέμου και κατά την διάρκεια χειρισμών ελλιμενισμού. Με την εξαίρεση των χειρισμών ελλιμενισμού, όπου οι προπέλες σταθερού βήματος έχουν αργή απόκριση και χαμηλή ικανότητα ελικτικότητας, στην διάρκεια ταξιδιού καθώς η ταχύτητα είναι σταθερή οι προπέλες σταθερού βήματος πλεονεκτούν. Συνεκτιμώντας το γεγονός πως την συντριπτική πλειονότητα του χρόνου, ο κινητήρας δουλεύει σε σταθερή ταχύτητα υπηρεσίας, τα πλεονεκτήματα του μεταβλητού βήματος γίνονταν σχεδόν αμελητέα.

Όμως σε εφαρμογές πλήρως εξηλεκτρισμένου σκάφους, προκειμένου να υπάρξει ικανοποιητική ανάκτηση ενέργειας κατά την διάρκεια πλόων με χρήση ιστού, καθίσταται σχεδόν επιβεβλημένη η χρήση ελίκων μεταβλητού βήματος και/ή αναδιπλούμενων. Μάλιστα, αν και η ανάκτηση ισχύος είναι μικρή σε σκάφη μονής γάστρας (single hull) -λόγω της μικρής αναπτυσσόμενης ταχύτητας και του μεγάλου εκτοπίσματος, μελέτες δείχνουν πως σε εφαρμογές multihull η ανακτώμενη ενέργεια μπορεί να γίνει συγκρίσιμη της καταναλισκόμενης καθιστώντας έτσι ακόμα πιο θελκτική και πιθανώς βιώσιμη την ηλεκτρική πρόωση.

Καθώς λοιπόν η προπέλα μετατρέπει την περιστροφική κίνηση σε πρόωση, επόμενο είναι να επιβάλει για δοσμένη επιθυμητή ταχύτητα τον αριθμό των στροφών, καθώς και την απαιτούμενη ροπή που πρέπει να αναπτύσσει ο κινητήρας ή ο συνδυασμός κινητήρα-μειωτήρα στροφών.



Σχήμα 1-3 Προπέλα μεταβλητού βήματος 4 πτερυγίων σε δύο διαφορετικές θέσεις, της Variprop

1.4 Συνηθέστερες τοπολογίες

Οι συνηθέστερες υπάρχουσες τοπολογίες ηλεκτρικής πρόωσης είναι οι εξής:

Εφόσον πρόκειται για αντικατάσταση θερμικού κινητήρα με ηλεκτρικό, ελέω ελαχιστοποίησης κόστους και σχεδιαστικών περιορισμών, έχουμε:

Τις μπαταρίες οι οποίες φορτίζονται, είτε από γεννήτρια πετρελαίου ή βενζίνης σε υβριδικά συστήματα, είτε μέσω σύνδεσης με το υπαίθριο δίκτυο με χρήση φορτιστών

φορτιστών και μπορεί να υπάρχουν επικουρικά φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες, σε αυτόνομα συστήματα. Στη συνέχεια έχουμε τον αντιστροφέα που μετατρέπει την DC τάση των μπαταριών σε τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα. Ακολουθεί ο κινητήρας, ο δρομέας του οποίου συνδέεται μέσω κατάλληλου μειωτήρα στροφών με τον άξονα της προπέλας. Αυτό γίνεται προκειμένου να ταιριάζουν οι στροφές του κινητήρα με τις απαιτούμενες στροφές της προπέλας για την επίτευξη της επιθυμητής ταχύτητας, καθώς η προπέλα ήταν σχεδιασμένη για τις προδιαγραφές του θερμικού κινητήρα. Ήδη διαφαίνεται, το βασικότερο μειονέκτημα αυτών των τοπολογιών, που δεν είναι άλλο από την μη πλήρη εκμετάλλευση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των ηλεκτροκινητήρων λόγω της χρήσης της προϋπάρχουσας υποδομής.

Σε περιπτώσεις πλήρως εξηλεκτρισμένων εφαρμογών και πρώτης τοποθέτησης, οι κυριότερες διαφοροποιήσεις είναι πως δύναται να μην χρησιμοποιηθεί μειωτήρας στροφών, αλλά ο δρομέας του κινητήρα να είναι απευθείας συζευγμένος με τον άξονα της έλικας (αυξάνοντας περαιτέρω την απόδοση), ενώ υπάρχουν και πιθανές αλλαγές στον τύπο της έλικας και στην τοπολογία της. Διαφορές που τελικά έχουν μεγάλη επίπτωση στην συνολική απόδοση.

Όσον αφορά στους κινητήρες πρόκειται κυρίως για τριφασικούς, σύγχρονους κινητήρες, μόνιμων μαγνητών. Οι κινητήρες αυτοί επιλέγονται για την υψηλή τους απόδοση που είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας σε τέτοιες εφαρμογές και για την υψηλή πυκνότητα ροπής και ισχύος. Έτσι έχουμε πλεονέκτημα και στην μείωση του όγκου και της μάζας του κινητήριου συστήματος. Εκτενέστερη όμως αναφορά θα γίνει στα επόμενα κεφάλαια.

1.5 Επιλογή προδιαγραφών

Η επιλογή των βασικών παραμέτρων πρόωσης και κίνησης έγινε με αρκετά συνδυαστικά κριτήρια. Μέχρι τώρα οι θερμικοί κινητήρες, εξαιτίας των εγγενών προβλημάτων χαμηλής ροπής σε χαμηλές στροφές σε σχέση με τις ονομαστικές, υπερδιαστασιολογούνταν με βάση την ροπή εκκίνησης. Έτσι είναι σύνηθες το φαινόμενο, οι ηλεκτροκινητήρες που αντικαθιστούν θερμικούς να είναι συχνά 2-4 φορές μικρότερης ισχύος σε σχέση με τους αντίστοιχους θερμικούς.

Ο υπολογισμός των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών των σκαφών είναι μια απαραίτητη διαδικασία, αλλά συνήθως αρκετά προσεγγιστική, με την εξαίρεση CFD αναλύσεων μέσω πεπερασμένων στοιχείων (CAD/FEA). Συνεπώς, βασίζεται, είτε σε απλοποιητικές παραδοχές, είτε σε δεδομένα ανάλογων εφαρμογών, είτε ακόμα και σε εμπειρικούς τύπους εισάγοντας όμως κατ' αυτόν τον τρόπο αρκετούς περιορισμούς στα μοντέλα και μια σημαντική απόκλιση από την πραγματικότητα. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί, στο μέτρο του δυνατού, αυτός ο παράγοντας, έγινε χρήση αρκετών μεθόδων και σταθμίστηκαν τα δεδομένα. Βασικός αρωγός σε αυτή την προσπάθεια, ήταν το πρόγραμμα FREESHIP το οποίο πραγματοποιεί υπολογισμούς υδροδυναμικών χαρακτηριστικών, βασιζόμενο στα δεδομένα που προκύπτουν από τα χαρακτηριστικά σχεδίασης, αλλά όχι από πεπερασμένα στοιχεία. Ως βάση υπολογισμών χρησιμοποιήθηκε, ένα ιστιοφόρο σκάφος 40 ποδιών, με αρκετά κοινότοπη σχεδίαση, ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ως ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα των αναγκών ισχύος και πρόωσης ομοειδών σκαφών [6], [8].

Έτσι λοιπόν το πρώτο κριτήριο επιλογής είναι η ισχύς.

Για την επιλογή της, πέραν των αποτελεσμάτων των μεθόδων, χρησιμοποιήθηκαν και τυπικοί συντελεστές προσαύξησης κακής θάλασσας, ρυπασμένης γάστρας κοκ, ώστε να εξασφαλίζεται η ικανή πρόωση κάτω από όλες τις συνθήκες. Κατόπιν υπολογισμών, επιλέχθηκε ως:

$$P_{nom} = 9000 \text{ W}$$

ούτως ώστε να δύναται να αναπτύσσει μέγιστη ταχύτητα 7 κόμβων. Η ταχύτητα των 7 κόμβων δεν είναι τυχαία. Από την θεωρία, η μέγιστη θεωρητική ταχύτητα ενός σκάφους εκτοπίσματος προκύπτει από τον τύπο:

$$v = 2.43 * \sqrt{LWL} \quad (1-1)$$

Όπου LWL (Load Waterline Length) το μήκος ισάλου που για την εφαρμογή μας είναι:

$$LWL = 10 \text{ m}$$

Συνεπώς με αντικατάσταση έχουμε πως:

$$v_{max,est} = 7.68 \text{ knots}$$

Έτσι θεωρώντας περίπου το 90% της θεωρητικής μέγιστης ταχύτητας για λόγους εφικτότητας έχουμε τελικά ως μέγιστη επιθυμητή ταχύτητα, για την οποία υπολογίστηκε η απαραίτητη ισχύς:

$$v_{max} = 7 \text{ knots}$$

Τέλος ως ονομαστική ταχύτητα θεωρείται:

$$v_{nom} = 5.5 \text{ knots}$$

Δεύτερο κριτήριο αποτελεί η ταχύτητα περιστροφής.

Το ζήτημα της ταχύτητας περιστροφής, πέραν της επίδρασης που έχει σε βασικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, με κυριότερο τον αριθμό των πόλων, είναι κεφαλαιώδους σημασίας για το σχεδιασμό του συστήματος πρόωσης. Ενδεικτικά, η χρήση μειωτήρα στροφών ή όχι και η σχεδίαση της έλικας, είναι δύο μόνο σημαντικότεροι παράγοντες άρρηκτα συνδεδεμένοι με την επιλογή της ταχύτητα περιστροφής. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή παρότι θεωρήθηκε χρήση τύπου saildrive επιλέχθηκε να μην χρησιμοποιηθεί μείωση στροφών. Δηλαδή, παρότι έχουμε saildrive, η σχέση μετάδοσης είναι 1:1.

Καθώς η επιθυμητή ονομαστική ταχύτητα είναι οι 5,5 κόμβοι, θα πρέπει το βήμα της έλικας στις ονομαστικές στροφές να έχει θεωρητική ταχύτητα 30-50% αυξημένη, καθώς είναι δεδομένη η ύπαρξη της ολίσθησης, δηλαδή της διαφοράς της θεωρητικής απόστασης που θα έπρεπε να διανύει, με την πραγματική. Έπειτα, με χρήση των διαγραμμάτων ώθησης-ταχύτητας των μεθόδων έχουμε μια ένδειξη της απαραίτητης ώθησης που πρέπει να παράγει η έλικα. Έτσι προκύπτουν περαιτέρω γεωμετρικοί σχεδιασμοί, που στα πλαίσια αυτής της εργασίας δεν θα μας απασχολήσουν ιδιαίτερα, αλλά είναι ιδιαίτερης σημασίας στην πραγματική σχεδίαση και στην προσπάθεια βελτιστοποίησης της πρόωσης. Αργόστροφες έλικες με μεγάλη διάμετρο έχουν αυξημένη απόδοση [9]. Έτσι λοιπόν προτιμήθηκε η χρήση χαμηλών στροφών, κάτι που από ηλεκτρικής σκοπιάς δίνει περαιτέρω σχεδιαστική ευελιξία.

Η θεωρητική ταχύτητα πρόωσης δίνεται από τον τύπο:

$$v_{(pr,th)} = n * pitch * \frac{2.54*60}{1852*100} \quad (1-2)$$

Όπου n η ταχύτητα περιστροφής, $pitch$ το βήμα της προπέλας σε ίντσες και $v_{pr,th}$ η θεωρητική ταχύτητα εκφρασμένη σε κόμβους.

Καθώς θέλουμε να μπορεί να αναπτυχθεί η μέγιστη ταχύτητα των 7 κόμβων θα πρέπει ο συνδυασμός βήματος και ταχύτητας περιστροφής να δίνουν θεωρητική ταχύτητα ανώτερη των 7 κόμβων. Όμως ο κινητήρας θα βελτιστοποιηθεί για την ονομαστική ταχύτητα $v_{nom} = 5.5 \text{ knots}$. Επομένως θα επιλεγεί ένας τέτοιος συνδυασμός που να ικανοποιεί την ονομαστική (συνυπολογιζόμενης μια ολίσθησης 30-50%), αλλά να πληροί και το κριτήριο της μέγιστης ταχύτητας. Από τον τύπο (1-2) για $v_{nom} = 5.5 \text{ knots}$ προκύπτει πως:

$$n * pitch \approx 6684 \text{ rpm} * \text{inches}$$

Όμως έχουμε ήδη αναφέρει την πρόθεση για διερεύνηση αργόστροφου συστήματος με χρήση προπελών μεγάλης διαμέτρου και βήματος. Αναζητώντας σε κατασκευαστές ελίκων, βρέθηκε πως το άνω όριο του βήματος είναι στην περιοχή των 20 περίπου ίντσών.

Με βάση τα παραπάνω επιλέχθηκε το βήμα στις 19 inches με διάμετρο 0,45m και ταχύτητα περιστροφής $n = 530 \text{ rpm}$ που μας προσφέρει περιθώριο για ολίσθηση 50% στην ονομαστική ταχύτητα (που είναι τυπική τιμή σε τέτοια σκάφη), ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζει και την μέγιστη θεωρητική ταχύτητα προσφέροντας ένα περιθώριο ολίσθησης στην μέγιστη ταχύτητα 18%. [10]

Προδιαγραφές ηλεκτρικών μεγεθών

Η συνηθέστερη διάταξη τροφοδοσίας του κινητήρα, είναι μέσω DC/AC inverter τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος, τροφοδοτούμενο από συστοιχία μπαταριών. Η τάση του κινητήρα, η τάση της μπαταρίας και ο τύπος του inverter είναι παράμετροι που καθορίζουν τα ηλεκτρικά μεγέθη.

Η αποθήκευση ενέργειας γίνεται σε μπαταρίες και αναλόγως απαιτήσεων τάσης σε παράλληλες συστοιχίες μπαταριών. Καθώς λοιπόν οι μπαταρίες που κυκλοφορούν ευρέως στην αγορά είναι συνήθως 12 ή 24 volt, επιλέγεται ως τάση μπαταριών κάποιο πολλαπλάσιο αυτών. Σε αντίθεση με τις περισσότερες υλοποιήσεις που χρησιμοποιήθηκαν 48V, προτιμήθηκε η χρήση 84V ώστε να έχουμε μειωμένο ρεύμα

που συνεπάγεται λιγότερες απώλειες χαλκού. Και καθώς οι απώλειες χαλκού, είναι η κυρίαρχη συνιστώσα απωλειών συνεπάγεται και αυξημένη απόδοση. Επιπλέον, υψηλότερη τάση συνεπάγεται και αυξημένο αριθμό ελιγμάτων που ωφελεί την συμπεριφορά βραχυκύκλωσης και μεταβατικών φαινομένων.

Έτσι λοιπόν επιλέγεται: $V_{bat} = 84 V$

Στη συνέχεια η DC τάση μετατρέπεται μέσω του αντιστροφέα σε τριφασική εναλλασσόμενη. Η μετατροπή αυτή υπόκειται σε κάποιους περιορισμούς και σε κάποιους κανόνες καλής σχεδίασης. Θεωρώντας λοιπόν αντιστροφέα SPWM και εύρος βέλτιστης οδήγησης του συντελεστή διαμόρφωσης $ma = 0,65 - 0,85$, προκύπτει πως το πλάτος της θεμελιώδης συνιστώσας της φασικής τάσης εξόδου του μετατροπέα είναι [11], [12]:

$$V_{pp,1,ph} = ma * \frac{V_{dc}}{2} \quad (1-3)$$

δηλαδή το άνω όριο για $ma=0,85$ είναι $V_{max} = 35.7V$.

Για λόγους πληρότητας δίνεται και το κάτω όριο για $ma=0,65$ είναι $V_{min} = 27.3 V$.

Παρόλα αυτά έχουμε ήδη υπονοήσει πως θα σχεδιάσουμε κοντά στο άνω όριο. Αυτό δεν γίνεται ούτε καταχρηστικά ούτε αυθαίρετα. Απλά, όπως ήδη αναφέραμε, η υψηλότερη τάση έχει σημαντικά πλεονεκτήματα και έτσι θεωρείται προτιμητέα. Για λόγους ικανότητας οδήγησης του κινητήρα η θεμελιώδης τιμή πλάτους, της φασικής τάσης της αναπτυσσόμενης αντί-HEΔ θα πρέπει να είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του inverter. Συνεπώς επιλέγεται:

$$V_{opt}=30,6V$$

Έτσι λοιπόν, επιθυμούμε το πλάτος της θεμελιώδης συνιστώσας της επαγόμενης αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης του κινητήρα να βρίσκεται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην τιμή V_{opt} (υπό κανονικές συνθήκες πάντα). Απόρροια αυτών, είναι ένας περιορισμός-κριτήριο σχεδίασης του κινητήρα.

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω έχουμε ως αρχικές προδιαγραφές του κινητήρα τις ακόλουθες:

Προδιαγραφή	Τιμή
Ονομαστική ισχύς	$P_{nom}=9000 \text{ Watt}$
Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής	$n=530 \text{ RPM}$
Ονομαστική ροπή	$T=162,15 \text{ Nm}$
Βέλτιστο πλάτος θεμελιώδους συνιστώσας ΗΕΔ	$V_{ph-emf_opt}=30,6 \text{ V}$

Πίνακας 1-1 Πίνακας βασικών προδιαγραφών κινητήρα

Κεφάλαιο 2ο. Σχεδίαση και διαμόρφωση ηλεκτρικών μηχανών

2.1 Κατασκευαστικά υλικά ηλεκτρικών μηχανών

Κάθε ηλεκτρική μηχανή κατασκευάζεται από μια πληθώρα υλικών. Τα επιλεγμένα υλικά, καθορίζουν εν πολλοίς, τις ηλεκτρικές, μαγνητικές, μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του κινητήρα. Λόγω της τεράστιας σημασίας τους, θα αναφερθούμε εκτενέστερα σε αυτά.

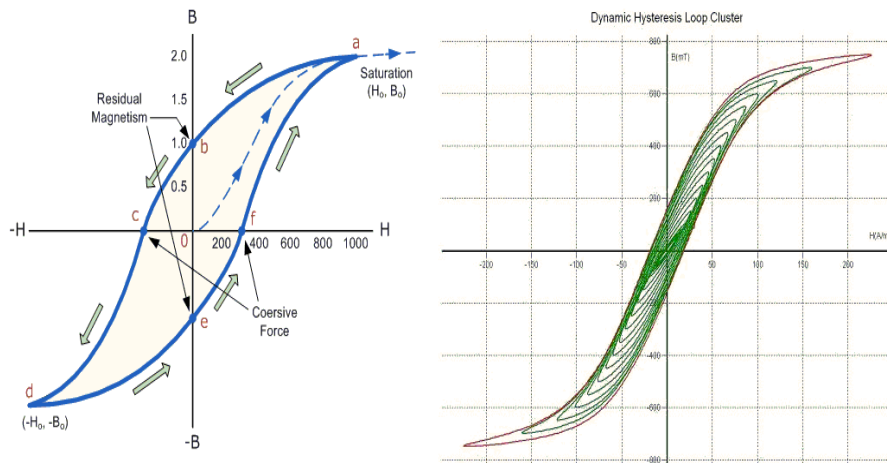
2.1.1 Σιδηρομαγνητικά υλικά

Ο πυρήνας του στάτη και του δρομέα κατασκευάζονται από σιδηρομαγνητικά υλικά, μέσω των οποίων διανέμεται η μαγνητική ροή στη γεωμετρία της μηχανής. Επιπλέον, τα υλικά αυτά έχουν και δομικό ρόλο καθώς είναι υπεύθυνα για την δομική αντοχή του κινητήρα. Η διαπερατότητα αυτών των υλικών είναι μη-γραμμική και πολύτιμη, για αυτό και συνήθως περιγράφονται από τον βρόχο υστέρησής τους. Τα υλικά αυτά είναι είτε ελασματοποιημένα, είτε συμπαγή. Η μεταβλητότητα της μαγνητικής ροής, η ένταση της μαγνητικής ροής, το κόστος των επιμέρους υλικών αλλά και οι περιορισμοί των υλικών όσον αφορά στις υλοποιήσεις (π.χ. μηχανικές και θερμικές αντοχές), είναι μερικοί μόνο παράγοντες, που καθορίζουν την επιλογή ανάμεσα σε λαμαρίνα και συμπαγή σίδηρο. Όπως όλα τα υλικά, έτσι και τα σιδηρομαγνητικά, παρουσιάζουν εγγενώς, τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα. Γι' αυτό το λόγο, οι κατασκευαστές ηλεκτρικών μηχανών πρέπει να επιλέγουν το κατάλληλο υλικό ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής, αλλά και τους διάφορους περιορισμούς και προβλήματα που παρουσιάζονται.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι απαιτούμενες ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες των υλικών κατασκευής του πυρήνα:

- Υψηλή μαγνητική επιδεκτικότητα και διαπερατότητα, με σκοπό την όσο το δυνατόν χαμηλότερη μαγνητική αντίδραση του μαγνητικού κυκλώματος.
- Υψηλή μαγνητική επαγωγή κορεσμού, ώστε να διέρχεται περισσότερη μαγνητική ροή ανά μονάδα όγκου και να ελαχιστοποιείται ο όγκος και το βάρος της μηχανής.
- Μικρό εμβαδό βρόχου υστέρησης και μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Κατ' αυτό τον τρόπο επιτυγχάνονται μειωμένες ειδικές απώλειες, υψηλή απόδοση και μικρή θερμοκρασιακή αύξηση κατά τη λειτουργία. Το τελευταίο είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας σε κινητήρες μόνιμων μαγνητών, όπου οι μαγνήτες δύνανται ακόμα και να καταστραφούν λόγω υπερθέρμανσης. Παράλληλα, μειώνονται οι απαιτήσεις απαγωγής θερμότητας, απλοποιώντας τη μέθοδο ψύξης και κάνοντάς την λιγότερο δαπανηρή. Επιλέγοντας λοιπόν, υλικά χαμηλών απωλειών μειώνεται το λειτουργικό κόστος της ηλεκτρικής μηχανής, ενώ στον αντίποδα αυξάνεται το κατασκευαστικό της κόστος.

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά διαχωρίζονται σε μαλακά και σκληρά. Στα μαλακά η κανονική καμπύλη μαγνήτισης παρουσιάζει έντονη κλίση, ενώ ο βρόχος υστέρησης μικρό εμβαδόν, οδηγώντας προφανώς σε μειωμένες απώλειες υστέρησης. Επιπρόσθετα, τα υλικά αυτά εμφανίζουν μικρή τιμή παραμένουτος μαγνητισμού και υψηλή διαπερατότητα. Μερικά παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι ο μαλακός σίδηρος, ο πυριτιούχος χάλυβας και τα κράματα σιδήρου-νικελίου τύπου Permalloy. Χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε μετασχηματιστές ισχύος, ηλεκτρικές γεννήτριες, ηλεκτρικούς κινητήρες, και εν γένει διατάξεις που υπόκεινται σε χρονικά εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία, εξαιτίας του μικρού βρόχου υστέρησης. Στα σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά, η κανονική καμπύλη μαγνήτισης εμφανίζει μικρότερη κλίση συγκριτικά με τα μαλακά, ενώ το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης είναι μεγαλύτερο. Άμεση συνέπεια αυτών, είναι οι υψηλότερες απώλειες υστέρησης. Επιπλέον εμφανίζουν υψηλή τιμή παραμένουτος μαγνητισμού και χαμηλή διαπερατότητα. Ο μείζων καθώς και οι ελάσσονες βρόχοι υστέρησης [13] [14] [15].



Σχήμα 2-1 Αριστερά βρόχος υστέρησης με απεικόνιση την παραμένουσας μαγνήτισης, της δύναμης επαναφοράς και του σημείου κορεσμού. Δεξιά με κόκκινο ο μείζων βρόχος υστέρησης και με πράσινο ελάσσονες βρόχοι.

Τυπικό παράδειγμα, σκληρού μαγνητικού υλικού είναι το κράμα Alnico. Τα σκληρά μαγνητικά υλικά, είναι κατάλληλα για την κατασκευή μονίμων μαγνητών, στους οποίους είναι επιθυμητές υψηλές τιμές τόσο για την παραμένουσα μαγνήτιση B_r όσο και για το πεδίο επαναφοράς H_c , προκειμένου να μην απομαγνητίζονται εύκολα.

Αναφορικά με το συμπαγή σίδηρο, η προσθήκη μικρής ποσότητας πυριτίου βελτιώνει πολλές από τις ιδιότητές του: αυξάνεται η ηλεκτρική του αντίσταση, η μαγνητική αντίσταση μειώνεται αισθητά και βελτιώνεται η σταθερότητα των μαγνητικών του χαρακτηριστικών στο χρόνο. Η αύξηση της περιεκτικότητας πυριτίου περιορίζεται από το γεγονός ότι ο σίδηρος γίνεται εύθραυστος (ψαθυρός) και υποβαθμίζεται η αντοχή του σε μηχανικές καταπονήσεις. Επιπλέον, σημειώνεται μικρή μείωση στην επαγωγή κόρου. Η παρασκευή κράματος σιδήρου-πυριτίου απαιτεί τόσο θερμικές, όσο και μηχανικές διεργασίες, με συνέπεια το βελτιωμένο υλικό να έχει αυξημένο κόστος. Η λαμαρίνα (ελάσματα σιδηρομαγνητικού υλικού) χρησιμοποιείται όταν υπάρχει εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, που έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία δινορρευμάτων και συνακόλουθα αυξημένων απωλειών. Η χρήση της περιορίζει τα επαγόμενα δινορρεύματα, καθώς μειώνεται η αγώγιμη διαδρομή του ρεύματος. Για αυτό το λόγο η μία ή και οι δύο επιφάνειες του ελάσματος είναι καλυμμένες με μονωτικό υλικό και ο προσανατολισμός τους είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής. Επιπρόσθετα η μονωτική επίστρωση προστατεύει τον σίδηρο από την οξείδωση.

Υπάρχουν δύο τύποι ελασμάτων: με ή χωρίς κατευθυνόμενους κόκκους. Τα ελάσματα χωρίς κατευθυνόμενους κόκκους, είναι ιστροπικά και χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις ηλεκτρικές μηχανές. Τυπικές τιμές ειδικών απωλειών είναι 3-4W/Kg για ελάσματα πάχους 0.35 mm και 0.5 mm αντίστοιχα, υπό ένταση μαγνητικής επαγωγής 1.5T και συχνότητα εναλλασσόμενου πεδίου 50Hz [16]. Αντίθετα, τα ελάσματα με κατευθυνόμενους κόκκους παρουσιάζουν μία κατεύθυνση στην οποία οι μαγνητικές ιδιότητες είναι βελτιωμένες και χρησιμοποιούνται κυρίως στην κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών όπου εμφανίζονται υψηλές συχνότητες. Τυπικές τιμές απωλειών σε αυτή την περίπτωση είναι 1 W/Kg σε 1.5 T, 50 Hz, για έλασμα πάχους 0.35 mm.

Υπάρχουν επίσης ελάσματα από κράμα Σιδήρου-Κοβαλτίου με την ονομασία “Permendur”, τα οποία χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές και υψηλές συχνότητες. Αυτά παρουσιάζουν υψηλή μαγνητική επιτρεπτότητα και πολύ υψηλό σημείο κορεσμού. Χρησιμοποιούνται επίσης κράματα Σιδήρου -Νικελίου, “permalloy”, τα οποία εμφανίζουν πολύ υψηλή επιτρεπτότητα και μικρή τιμή πεδίου επαναφοράς, ενώ η μαγνητική επαγωγή κορεσμού τους είναι πολύ χαμηλή.

2.1.2 Μόνιμοι Μαγνήτες

Οι μόνιμοι μαγνήτες χρησιμοποιούνται ως εναλλακτικός τρόπος για την δημιουργία του πεδίου διέγερσης στις σύγχρονες μηχανές, αντικαθιστώντας το τύλιγμα πεδίου που τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα. Συνήθως πρόκειται για κράματα από σπάνιες γαίες (π.χ. νεοδύμιο, το δυσπρόσιο, το υτέρβιο και το σαμάριο) και μέταλλα (π.χ. σίδηρος, κοβάλτιο, νικέλιο). Οι συνηθέστερες επιλογές είναι οι μαγνήτες Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου (NdFeB, Neodymium Iron Boron) και Σαμαρίου-Κοβαλτίου (SmCo Samarium Cobalt). Ο μόνιμος μαγνήτης έχει αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια, η οποία διατηρείται αν δεν επιβληθεί πολύ ισχυρό μαγνητικό πεδίο αντίθετα σε αυτόν, αν δεν υπερθερμανθεί ή αν δεν δεχτεί μηχανική καταπόνηση. Ο μαγνήτης δεν παρέχει ισχύ, αλλά την προϋπόθεση για την ανάπτυξη ροπής. Η ισχύς παρέχεται από το τύλιγμα του τυμπάνου της μηχανής. Σημειώνεται ότι και στην περίπτωση χρήσης τυλίγματος για τη δημιουργία του πεδίου διεγέρσεως, η ενέργεια του πεδίου αυτού διατηρείται. Το βασικό του όμως μειονέκτημα είναι οι ωμικές απώλειες λόγω της αντίστασης των πηνίων. Και καθώς οι ωμικές απώλειες είναι κυρίαρχη συνιστώσα απωλειών τα οφέλη καθίστανται προφανή. [17]

Συνοπτικά, η χρήση μόνιμων μαγνητών στην κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών, έναντι των κλασσικών κατασκευών δύο τυλιγμάτων, πλεονεκτεί στους εξής τομείς:

- Προσφέρει μειωμένες απώλειες, καθώς δεν υπάρχουν ωμικές απώλειες στο τύλιγμα διέγερσης.
- Αυξημένη πυκνότητα ισχύος και ροπής.
- Απλοποιεί την κατασκευή καθώς δεν υπάρχει πλέον ανάγκη παροχής DC ρεύματος στο δρομέα μέσω ψηκτρών ή δακτυλίων.
- Έχουν πιο γραμμική χαρακτηριστική καμπύλη ταχύτητας-ροπής, που προσφέρει πιο προβλέψιμη συμπεριφορά.
- Έχουν καλύτερη δυναμική συμπεριφορά καθώς έχουν αυξημένη πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο.
- Είναι πιο αξιόπιστοι και δεν χρειάζονται σχεδόν καθόλου συντήρηση.
- Έχουν μικρότερα διαφυγόντα ρεύματα στις εδράσεις λόγω μεγαλύτερου διακένου.
- Προκαλούν πολύ μικρότερες ακτινικές δυνάμεις-καταπονήσεις (ως και 10 φορές σε σχέση με τους συμβατικούς), εξαιτίας του μεγαλύτερου διακένου.
- Λειτουργούν σε χαμηλότερη θερμοκρασία, λόγω χαμηλότερων απωλειών.

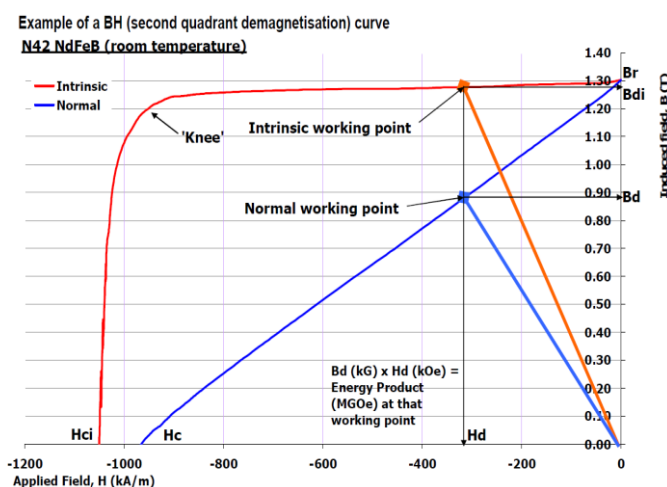
Αντιθέτως, μειονεκτούν στους εξής τομείς:

- Η τιμή της μαγνήτισής τους είναι σταθερή, δεν υπάρχει δηλαδή δυνατότητα μεταβολής της διέγερσης. Όμως σε ορισμένες περιπτώσεις (π.χ. σε εφαρμογές υψηλής ταχύτητας περιστροφής), κρίνεται σκόπιμο να υπάρχει έλεγχος διέγερσης (εξασθένηση πεδίου-field weakening). Προκειμένου να έχουμε αποτελεσματική εξασθένηση πεδίου χρειάζονται πιο περίπλοκα ηλεκτρονικά ισχύος για την οδήγηση του κινητήρα.
- Ελλοχεύει ο κίνδυνος απομαγνήτισης των μόνιμων μαγνητών, είτε λόγω επιβολής ισχυρού εξωτερικού πεδίου αντίθετου με το μαγνήτη, είτε λόγω πολύ υψηλής θερμοκρασίας, είτε εξαιτίας έντονης μηχανικής καταπόνησης.
- Σε ορισμένες τοπολογίες π.χ. θαμμένων μόνιμων μαγνητών, η κατασκευή και τοποθέτηση των μαγνητών καθίσταται δύσκολη, ενώ σε επιφανειακών μαγνητών χρειάζεται βελτίωση στον τρόπο συγκράτησής των στο δρομέα σε εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων.
- Είναι ακριβότεροι.
- Η διάθεση τους λόγω της αυξημένης ζήτησης συνεχώς μειώνεται.

Παρόλα αυτά, η χρήση τους διαδίδεται όλο και περισσότερο, ιδιαίτερα λόγω της ανακάλυψης του κράματος NdFeB, που ήρθε να αντικαταστήσει το ακριβότερο SmCo, ενώ ταυτόχρονα έχει και υψηλότερη αποθηκευμένη ενέργεια $(BH)_{max}$. Επιπλέον, ήδη γίνονται προσπάθειες για νέους συνθετικούς μαγνήτες που θα έχουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά, ενώ παράλληλα θα μειώνουν και την απαραίτητη ποσότητα σπάνιων γαιών. Εφόσον αυτό καταστεί εφικτό, θα έχουμε περαιτέρω μείωση του κόστους και του όγκου και αύξηση της πυκνότητας ισχύος και ροπής.

Μαγνητικές ιδιότητες

Οι μόνιμοι μαγνήτες είναι σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά που τείνουν να διατηρούν τη μαγνήτισή τους απουσία μαγνητικού πεδίου, όπως επίσης σε περίπτωση επιβολής ασθενούς μαγνητικού πεδίου αντίθετα στο δικό τους. Σε αντίθεση με το μαλακό σίδηρο για παράδειγμα, ο βρόχος υστέρησης ενός μόνιμου μαγνήτη έχει μεγάλο εύρος και αρκετά υψηλό πεδίο επαναφοράς. Σημαντική είναι η γνώση της καμπύλης απομαγνήτισής τους (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2-2 Καμπύλη απομαγνήτισης μόνιμου μαγνήτη N42 NdFeb, e-Magnets UK©

Στην καμπύλη απομαγνήτισης διακρίνονται τα παρακάτω μεγέθη: Η παραμένουσα μαγνήτιση, B_r , που είναι ενδεικτική της μέγιστης μαγνητικής ροής που μπορεί να επάγει ο μαγνήτης. Το πεδίο επαναφοράς, H_c , είναι η τιμή του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου που μηδενίζει τη μαγνητική ροή στο μαγνήτη. Σε περίπτωση που η ένταση του μαγνητικού πεδίου πλησιάσει σε τιμές κοντά στο H_c , υπάρχει κίνδυνος μερικής ή και ολικής απομαγνήτισής του. Για αυτό συνιστάται το σημείο λειτουργίας να βρίσκεται μακριά από το εικονιζόμενο γόνατο. Ένα ακόμα

μέγεθος μεγάλου ενδιαφέροντος είναι η το σημείο μέγιστης ενέργειας του μαγνήτη, $(BH)_{max}$. Το σημείο λειτουργίας του μαγνήτη, (H_d, B_d) , καθορίζεται από το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο και τη γεωμετρία του χώρου. Η λειτουργία, όσο το δυνατόν εγγύτερα, στο σημείο μέγιστης ενέργειας εξασφαλίζει τη βέλτιστη αξιοποίηση του μόνιμου μαγνήτη και αυτό λαμβάνεται υπόψη κατά τη σχεδίαση, όταν επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση του όγκου και του κόστους του.

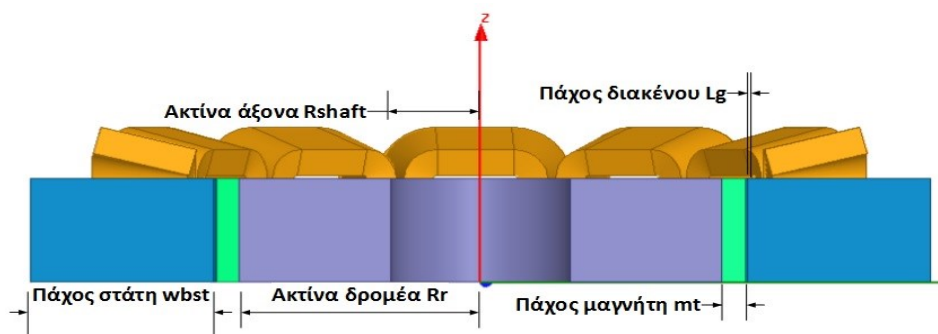
Όπως και τα σιδηρομαγνητικά υλικά, έτσι και οι μαγνήτες έχουν απώλειες λόγω της υψηλής τους ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Τόσο απώλειες υστέρησης όσο και δινορρευμάτων λαμβάνουν χώρα. Οι απώλειες γίνονται σημαντικές σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής. Σε κάθε όμως περίπτωση πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά την σχεδίαση καθώς οι απώλειες θερμαίνουν τους μαγνήτες και όπως ήδη έχουμε αναφέρει η υπερθέρμανση, μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή. Μια επιτυχής πρακτική που χρησιμοποιείται για την μείωση των δινορρευμάτων, είναι η κατακερμάτιση των μαγνητών (κατά αντιστοιχία με την ελασματοποίηση των σιδηρομαγνητικών υλικών) [18], [17].

2.2 Θεμελιώδεις σχέσεις προκαταρκτικής σχεδίασης

2.2.1 Βασικά μεγέθη

Κατά την προκαταρκτική σχεδίαση μίας ηλεκτρικής μηχανής προσδιορίζεται η επιφάνεια διακένου για την διασφάλιση της ζητούμενης ροπής, λαμβάνοντας υπόψιν τυπικές τιμές βασικών ηλεκτρικών και μαγνητικών μεγεθών [19].

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αυτά τα μεγέθη μαζί με τις σχέσεις υπολογισμού τους. Στο Σχήμα 2-3 διακρίνονται οι βασικές διαστάσεις μιας σύγχρονης μηχανής.



Σχήμα 2-3 Βασικές διαστάσεις ηλεκτρικής μηχανής

2.2.1.1 Ειδική μαγνητική φόρτιση

Η ειδική μαγνητική φόρτιση, συνδέει τον αριθμό των πόλων με τη μαγνητική ροή ανά πόλο μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$\bar{B} = \frac{P \cdot \Phi_{max}}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (2-1)$$

Όπου D είναι η διάμετρος του διακένου, L το αξονικό μήκος του ενεργού μέρους της μηχανής, P ο αριθμός των πόλων, Φ_{max} η μέγιστη μαγνητική ροή ανά πόλο. Τυπικές τιμές του \bar{B} είναι από 0.5 έως 0.75T, με το άνω όριο να τίθεται, προς πρόληψη του φαινομένου του κορεσμού του σιδηρομαγνητικού υλικού στα δόντια του στάτη. Αυξανόμενη της ειδικής μαγνητικής φόρτισης έχουμε μεγαλύτερη δυνατότητα παραγωγής ροπής και ισχύος. Βέβαια, το αντίτιμο είναι οι αυξημένες απώλειες πυρήνα, ειδικά όταν παρατηρείται έντονος κορεσμός στα δόντια του στάτη.

2.2.1.2 Ειδική ηλεκτρική φόρτιση

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση προσδιορίζεται από την ενεργό τιμή των αμπερελιγμάτων ανά μήκος της περιφέρειας διακένου από την παρακάτω σχέση:

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

Τυπικές τιμές της ηλεκτρικής φόρτισης σύγχρονων μηχανών είναι από 15000 έως 45000 A·ε/m. Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση σε συνδυασμό με την ειδική μαγνητική φόρτιση, καθορίζουν την ικανότητα παραγωγής ροπής μίας μηχανής. Η ηλεκτρική φόρτιση συνδέεται με τις απώλειες χαλκού της μηχανής.

Τα δύο παραπάνω μεγέθη συνδέονται με τη λεγόμενη σχέση εξόδου της μηχανής, η οποία δίνει μία εκτίμηση της ροπής ή της ισχύος εξόδου. Για την εύρεση αυτής της σχέσης, χρειάζεται ο προσδιορισμός μερικών ακόμα βασικών μεγεθών.

2.2.1.3 Επαγόμενη τάση

Η ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης e δίνεται από την σχέση:

$$E = 4,44 * kw * f * Ns * \Phi \quad (2-3)$$

Όπου kw ο συντελεστής τυλίγματος, f η ηλεκτρική συχνότητα, N_s ο αριθμός σπειρών ανά φάση, Φ η θεμελιώδης μαγνητική ροή ανά πόλο.

2.2.1.4 Φαινόμενη ισχύς

Η φαινόμενη ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$S = 3 * E * I \quad (2-4)$$

Όπου I το ρεύμα ανά φάση.

2.2.1.5 Ηλεκτρική συχνότητα

Η ηλεκτρική συχνότητα f συνδέεται με τη μηχανική ταχύτητα περιστροφής n (στροφές/δευτερόλεπτο) μέσω της σχέσης:

$$f = \frac{P}{2} n \quad (2-5)$$

Όπου P ο αριθμός των πόλων της μηχανής.

2.2.1.6 Σχέση εξόδου μηχανής

Ο συνδυασμός των προηγούμενων σχέσεων δίνει την εξίσωση ισχύος εξόδου της ηλεκτρικής σύγχρονης μηχανής:

$$S = 1,11 * kw * \pi^2 * \bar{B} * ac * D^2 * L * n \quad (2-6)$$

Όπως φαίνεται από αυτή τη σχέση, η ισχύς εξόδου της μηχανής (ή ισοδύναμα η ροπή), είναι ανάλογη του αξονικού μήκους του ενεργού μέρους του πυρήνα και του

τετραγώνου της διαμέτρου του διακένου. Συνεπώς, κατά τη σχεδίαση ενός κινητήρα πρέπει να προσδιοριστεί ο πιο συμφέρων συνδυασμός ειδικής ηλεκτρικής και μαγνητικής φόρτισης, διαστάσεων διακένου, αξονικού μήκους και ταχύτητας περιστροφής ώστε να ληφθεί η επιθυμητή ισχύς στην έξοδο χωρίς να θυσιαστούν άλλα χαρακτηριστικά της μηχανής, όπως για παράδειγμα η απόδοση, το κόστος κατασκευής και το συνολικό βάρος.

2.2.1.7 Απόδοση

Το μέγεθος μιας μηχανής και η τιμή της ονομαστικής της ισχύος είναι παράγοντες καθοριστικής σημασίας για την απόδοση. Μια εκτίμηση παρέχεται με τον υπολογισμό της μεταβολής της ισχύος εξόδου και των απωλειών όταν οι διαστάσεις μιας μηχανής μεγεθύνονται κατά τον ίδιο λόγο, έστω x . Όπως αποδεικνύεται, για δεδομένη θερμοκρασιακή αύξηση, η ισχύς εξόδου αυξάνεται με συντελεστή $x^{3.5}$ ενώ οι απώλειες αυξάνονται με συντελεστή x^2 . Αμελώντας τις μηχανικές απώλειες, η απόδοση, η , υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \propto \frac{x^{3.5}}{x^{3.5} + K \cdot x^2} \propto \frac{1}{1 + \frac{K}{x^{1.5}}} \quad (2-7)$$

Η εξίσωση δείχνει ότι η απόδοση αυξάνει με αύξηση στις γραμμικές διαστάσεις [19]. Αυτό δικαιολογεί εν μέρει γιατί κινητήρες με ισχύ μικρότερη του ενός, 1kW, έχουν απόδοση της τάξης του 60%, ενώ γεννήτριες μεγάλης ισχύος έχουν απόδοση πάνω από 97%.

2.2.1.8 Οριακή τάση διακένου

Αποτελεί βασικό μέγεθος της μηχανικής αντοχής της μηχανής και δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή των 10 tn/cm^2 . Ορίζεται ως η φυγόκεντρος δύναμη του δρομέα ανά μονάδα επιφανείας.

Η φυγόκεντρος δύναμη δίνεται από τη σχέση:

$$F = m \cdot \omega \cdot R^2 \quad (2-8)$$

Όπου m η μάζα του δρομέα, ω η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και R η ακτίνα του. Συνεπώς:

$$\text{Οριακή τάση διακένου} = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot \omega \cdot R^2}{2 \cdot \pi \cdot L} \quad (2-9)$$

2.2.1.9 Πυκνότητα ρεύματος τυλίγματος

Ένα ακόμα βασικό ηλεκτρικό μέγεθος της μηχανής είναι και η πυκνότητα ρεύματος J του τυλίγματος. Σχετίζεται με τη θερμική της ισορροπία, αφού καθορίζει το μέγεθος των ωμικών απωλειών στο τύλιγμά της. Κατά κανόνα, οι θερμικές απώλειες ισχύος στην ονομαστική κατάσταση λειτουργίας είναι κατά κύριο λόγο απώλειες χαλκού και κατά δεύτερο λόγο απώλειες σιδήρου. Οι θερμικές απώλειες προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας της μηχανής, η οποία, μπορεί να επιφέρει ως και καταστροφή των υλικών που την απαρτίζουν αν ξεπεραστούν τα όρια θερμικής αντοχής τους. Ένα άλλο πιθανό ενδεχόμενο είναι ο υποβιβασμός της μονωτικής ικανότητας των μονωτικών υλικών που χρησιμοποιούνται (πχ. μίκα), γεγονός που μπορεί να έχει πολλαπλές επιπτώσεις όπως: αύξηση διελιγματικής τάσης, αύξηση δινορρευμάτων και παρεπόμενα απωλειών κοκ. Ένα εμπειρικό όριο πυκνότητας ρεύματος είναι $J = 4 \text{ A/mm}^2$, πάνω από το οποίο συνήθως υπάρχει ανάγκη για εξαναγκασμένη ψύξη ώστε να αυξηθεί η ικανότητα παροχής ισχύος της ηλεκτρικής μηχανής. Η εξαναγκασμένη ψύξη υλοποιείται με τεχνητό αερισμό μέσω φτερωτών συνήθως ή με κλειστό σύστημα κυκλοφορίας ψυκτικού υγρού (π.χ. νερό, λάδι κοκ) σε περίπτωση μηχανών μεγάλης ισχύος.

2.2.2 Διαστασιολόγηση διακένου

Ο προσδιορισμός της ελάχιστης επιφάνειας διακένου γίνεται για την μέγιστη επιθυμητή αναπτυσσόμενη ροπή. Στον υπολογισμό αυτό η γωνία μεταξύ των πεδίων στάτη και δρομέα λαμβάνεται 90 ηλεκτρικές μοίρες. Η επαπτομενική πίεση διακένου προκύπτει από τη σχέση:

$$P_t = \frac{1}{\pi \cdot D \cdot \mu_0} \oint_C \overline{Bn} * \overline{Bt} dl \quad (2-10)$$

Όπου \overline{Bn} η ακτινική και \overline{Bt} η εφαπτομενική συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο, ενώ το ολοκλήρωμα εκτείνεται κατά μήκος του μέσου του διακένου.

Σημειώνεται ότι η μέγιστη αυτή ροπή σε σύγχρονες μηχανές που συνδέονται απ' ευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο δεν είναι η ονομαστική, εφόσον για λόγους ευστάθειας αποδίδουν το ονομαστικό τους φορτίο σε γωνία $\delta = 30 - 45$ μοίρες.

Αφού υπολογιστεί η εφαπτομενική πίεση, το γινόμενο $D^2 * L$ υπολογίζεται από την μέγιστη ροπή ως εξής:

$$\begin{aligned} F_t &= P_t * A \\ T_e &= \frac{1}{2} D * F_t \\ T_e &= \frac{\pi}{2} D^2 * L * P_t \end{aligned} \quad (2-11)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, F_t ορίζεται η μέση μαγνητική δύναμη στο διάκενο, ενώ η επιφάνεια του διακένου $A = \pi \cdot D \cdot L$.

2.2.2.1.1 Αναλογία διαστάσεων D και L

Η διαστασιολόγηση του διακένου, καθώς και των διαστάσεων D και L της ηλεκτρικής μηχανής συζευγνύει θέματα επίδοσης, απόδοσης, επιθυμητών μηχανικών ιδιοτήτων (π.χ. ροπή αδράνειας), μηχανικής αντοχής και αναπόφευκτα κόστους. Σχετικά με την επίδοση, η σχέση παραπάνω υποδεικνύει ότι δισκοειδείς μηχανές είναι προτιμητέες, από σκοπιάς ισχύος, καθώς η ισχύς της μηχανής αυξάνεται με το τετράγωνο της διαμέτρου του διακένου. Όμως η σχέση αυτή και συνακόλουθα και η προκύπτουσα σχεδίαση υπόκειται σε περιορισμούς. Για παράδειγμα, η απόδοση της μηχανής δεν αυξάνεται συνεχώς, αυξανομένης της αναλογίας D/L. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως όταν η διάμετρος διακένου είναι μεγάλη σε σχέση με το μήκος της μηχανής, αυξάνεται το ποσοστό του τυλίγματος που βρίσκεται εκτός της ενεργής περιοχής του πυρήνα. Κατά συνέπεια οι θερμικές απώλειες αυξάνονται, χωρίς αντίστοιχη αύξηση της επίδοσης και η απόδοση τελικά μπορεί ακόμα και να μειωθεί. Τέλος, σε περιπτώσεις κινητήρων όπου κυριαρχούν οι απώλειες πυρήνα, ή είναι συγκρίσιμες με την κυρίαρχη συνιστώσα απωλειών, σχεδιασμοί με μακρύ διάκενο οδηγούν σε μεγάλη μάζα πυρήνα και αναμένεται να εμφανίζουν αυξημένες απώλειες σιδήρου και μη βέλτιστη απόδοση.

Η μηχανική αντοχή του δρομέα και η διαστασιολόγηση του διακένου εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Σε μικρές ταχύτητες περιστροφής, προτιμάται μεγάλος λόγος D/L . Σε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής, η οριακή τάση διακένου περιορίζει τον δρομέα σε μικρή ακτίνα με την επιθυμητή ισχύ να επιτυγχάνεται μέσω αύξησης του αξονικού μήκους της μηχανής. Και σε αυτή την περίπτωση όμως, υπάρχει μηχανικό όριο στην μείωση του λόγου D/L , το οποίο συνίσταται στην ακαμψία του σώματος του δρομέα και την διατήρηση του διακένου.

Στη βιβλιογραφία προσδιορίζονται ορισμένες εμπειρικές διαστατικές αναλογίες, ούτως ώστε η προκύπτουσα μηχανή να χαρακτηρίζεται από υψηλή επίδοση, απόδοση ή έναν ισορροπημένο συνδυασμό και των δύο. Συνήθως προσδιορίζεται ο λόγος του αξονικού μήκους της μηχανής, L προς το μήκος ενός πόλου, τ_p . Το μήκος πόλου δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_p = \frac{\pi * D}{p} \quad (2-12)$$

Στον Πίνακα 2-1 παρατίθενται οι περιοχές τιμών του λόγου L/τ_p , καθώς και τα εμπειρικά αναλογούντα τους χαρακτηριστικά [19].

L/τ_p	Χαρακτηριστικό ηλεκτρικής μηχανής
1.0	Ισορροπημένη σχεδίαση
1.0 - 1.5	Υψηλός συντελεστής ισχύος
1.5	Υψηλή απόδοση
1.5 - 2.0	Ελάχιστο κόστος

Πίνακας 2-1 Περιοχές τιμών λόγου L/τ_p και χαρακτηρισμός σχεδίασης

Ωστόσο, σε διπολικές μηχανές και σε κινητήρες ισχύος μικρότερης του ενός kW μπορεί να παρατηρηθούν τιμές του λόγου L/τ_p , μέχρι και 0.6. Ο λόγος είναι, ότι σε αυτές τις μηχανές, οι μεγάλες τιμές L/τ_p , οδηγούν σε μικρή διάμετρο, με αποτέλεσμα την έλλειψη του απαιτούμενου χώρου για τις άυλακες του στάτη.

2.2.2.2 Πάχος διακένου

Το πάχος του διακένου, είναι κεφαλαιώδους σημασίας για την επίτευξη των επιθυμητών χαρακτηριστικών μιας ηλεκτρικής μηχανής. Εν γένει, επιδιώκεται να έχει το μικρότερο δυνατό πάχος, το οποίο καθορίζεται από την κατασκευαστική ακρίβεια και την δυνατότητα μηχανικής στήριξης δρομέα και στάτη. Αυξημένο διάκενο οδηγεί σε χαμηλότερη επίδοση, σε αντιστάθμιση όμως της μειωμένης επίδοσης, προσφέρει πιο ημιτονική μαγνητεγερτική δύναμη, και τούμπαλιν για σχεδιάσεις με μικρό διάκενο. Στη βιβλιογραφία υφίστανται διάφορες σχέσεις για τον προσδιορισμό του ελάχιστου δυνατού πάχους διακένου, ανάλογα με την ισχύ και τον τύπο μηχανής [20] [21] [22].

2.2.2.3 Αριθμός πόλων

Ένα ακόμα βασικό μέγεθος, που καθορίζεται από τα πρώτα βήματα της προκαταρκτικής σχεδίασης, είναι ο αριθμός των πόλων της μηχανής. Μετά τη διαστασιολόγηση του διακένου, επιλέγονται οι πόλοι της μηχανής, βάσει της θεωρούμενης μηχανικής ταχύτητας. Σ' αυτό το βήμα λαμβάνεται υπόψιν και το μηχανικό μέρος, αν δηλαδή παρεμβάλλεται κιβώτιο ταχυτήτων ανάμεσα στον κινητήρα και τον άξονα όπου λαμβάνεται η επιθυμητή ισχύς/ροπή ή αντίστοιχα στον άξονα που συνδέει την γεννήτρια και την κινητήρια μηχανή. Η σχέση ανάμεσα στη σύγχρονη ταχύτητα και στον αριθμό των πόλων είναι η ακόλουθη:

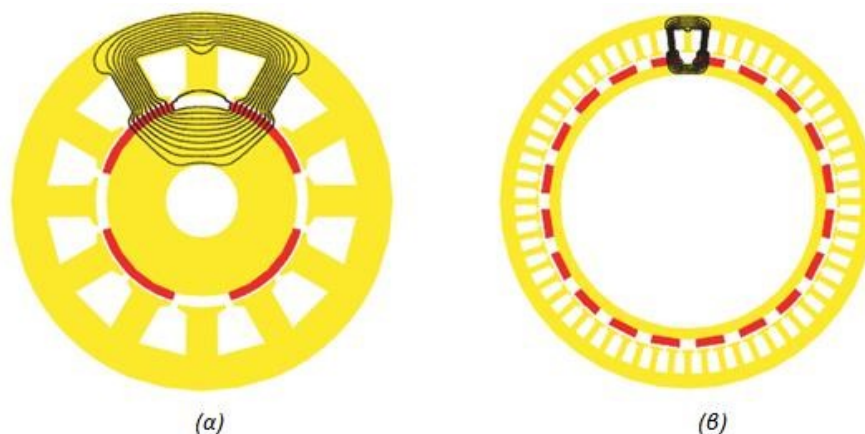
$$n = \frac{120 * f}{p} \quad (2-13)$$

Όπου f η θεμελιώδης ηλεκτρική συχνότητα.

Μηχανές με μικρό αριθμό πόλων, σχεδιασμένες για λειτουργία υψηλών ταχυτήτων, μπορούν να λειτουργήσουν σε μικρότερες ταχύτητες, μειώνοντας βάσει της παραπάνω σχέσης και την συχνότητα. Ειδικά όμως σε μηχανές που συνδέονται σε μετατροπέα η λύση αυτή δε θεωρείται αποδοτική, δεδομένου ότι η παρεχόμενη συχνότητα απομειώνεται κάτω από το εύρος συχνοτήτων του μετατροπέα. Συνεπώς, σε εφαρμογές χαμηλών ταχυτήτων χωρίς παρεμβολή κιβωτίου (low-speed direct-drive) προτιμώνται πολυπολικές μηχανές, προκειμένου να διατηρηθεί η σύγχρονη συχνότητα κοντά στα 50Hz. Επιπλέον υψηλές συχνότητες οδηγούν σε αυξημένες απώλειες

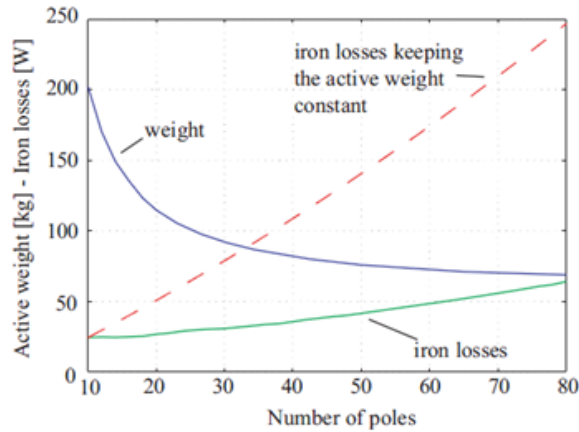
πυρήνα (όπως θα εξηγηθεί και στη συνέχεια), καθώς και σε αυξημένες αρμονικές. Επιπλέον, σε εφαρμογές σύγχρονων μηχανών επιλέγονται κυρίως μόνιμου μαγνήτη, εν αντιθέσει με τις ασύγχρονες λόγω της δυσκολίας μεταβολής του πεδίου διέγερσης, μολονότι γίνονται βήματα και προς αυτή την κατεύθυνση. Εν προκειμένω, αυξάνοντας τον αριθμό των πόλων, ο συντελεστής ισχύος μίας μηχανής επαγωγής ελαττώνεται εξαιτίας της αυξημένης αυτεπαγωγής σκέδασης. Έτσι, για εφαρμογές χαμηλών ταχυτήτων προτιμώνται μηχανές μόνιμων μαγνητών, στις οποίες ο συντελεστής ισχύος δεν σχετίζεται κατ' αυτό τον τρόπο με τον αριθμό των πόλων και η πυκνότητα ροής και ισχύος είναι ιδιαίτερα υψηλή [15].

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό του υψηλού αριθμού πόλων σε σύγχρονες μηχανές μόνιμων μαγνητών, είναι και το χαμηλό ενεργό βάρος τους. Πράγματι, για την ίδια ονομαστική ροπή, μηχανές με περισσότερους πόλους έχουν ελαφρύτερο μαγνητικό κύκλωμα. Αυτό εξηγείται στο ακόλουθο παράδειγμα. Οι μηχανές του Σχήμα 2-4 έχουν ίδια πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο, αλλά η ροή από τον έναν πόλο στον άλλο είναι αντιστρόφως ανάλογη του αριθμού των πόλων. Καθώς λοιπόν, η ροή στην πολυπολική μηχανή είναι μικρότερη, το πάχος δοντιού, το σώμα του στάτη και το σώμα του δρομέα μπορούν να μειωθούν χωρίς να κορεστεί ο σίδηρος.



Σχήμα 2-4 α) 4-πολική, β) 20-πολική μηχανή μόνιμων μαγνητών

Από την σχέση παραπάνω, γίνεται εμφανές ότι για χαμηλή ταχύτητα ο αριθμός των πόλων δύναται να αυξηθεί, διατηρώντας σχετικά μικρή συχνότητα. Έτσι, οι απώλειες πυρήνα γι' αυτές τις εφαρμογές είναι σχετικά χαμηλές, συγκρινόμενες με τις απώλειες χαλκού. Στο Σχήμα 2-5 φαίνονται το ενεργό βάρος και οι απώλειες πυρήνα μίας μηχανής μόνιμου μαγνήτη για διάφορες τιμές αριθμού πόλων.



Σχήμα 2-5 : Ενεργό βάρος και απώλειες πυρήνα συναρτήσει του αριθμού των πόλων για διάφορες Σ.Μ.Μ.Μ.

Από το Σχήμα 2-5 φαίνεται ξεκάθαρα ότι το ενεργό βάρος μειώνεται, αυξάνοντας τον αριθμό των πόλων. Επιπροσθέτως, οι απώλειες πυρήνα αυξάνονται, λόγω της αύξησης της ηλεκτρικής συχνότητας. Εντούτοις, η αύξηση αυτή δεν είναι ιδιαίτερα έντονη.

Τέλος, λόγω της χρήσης συγκεντρωμένου τυλίγματος (εκτενέστερη αναφορά παρακάτω), η αύξηση του αριθμού των πόλων αναμένεται να ελαττώσει και τις απώλειες χαλκού για τον εξής λόγο: αυξάνοντας τους πόλους μειώνεται το πάχος του δοντιού, συνεπώς 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 τυλίγματος. Έτσι λοιπόν, για συγκεκριμένο επίπεδο τάσης, αναμένονται μικρότερες απώλειες χαλκού για μεγαλύτερο αριθμό πόλων.

Συνυπολογίζοντας πως η κυρίαρχη συνιστώσα για μηχανές ισχύος της ίδιας τάξης με την εφαρμογή μας, είναι κατά κανόνα είναι οι απώλειες χαλκού, η επιλογή πολυπολικής μηχανής αναμένεται να οδηγήσει σε αύξηση και της απόδοσης. Και γενικότερα όμως, αναμένεται στην χειρότερη περίπτωση, οριακή μείωση, προσφέροντας όμως τα θετικά χαρακτηριστικά που ήδη έχουμε αναφέρει.

2.3 Απώλειες ηλεκτρικών μηχανών

Η απόδοση των ηλεκτρικών μηχανών εξαρτάται από τις απώλειες που λαμβάνουν χώρα στη μηχανή. Αυτές κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

2.3.1 Απώλειες χαλκού

Πρόκειται για τις ωμικές απώλειες (λόγω φαινομένου Joule) που προκαλούνται απ' την διέλευση ρεύματος στα τυλίγματα των φάσεων της μηχανής. Οι απώλειες χαλκού είναι ανάλογες της συνολικής αντίστασης ανά φάση και του τετραγώνου της ενεργού τιμής του ρεύματος που διαρρέει τα πηνία της μηχανής. Η ύπαρξη αρμονικών συνιστωσών στο φασικό ρεύμα προκαλεί επιπλέον απώλειες χαλκού. Αυτός άλλωστε είναι ένας βασικός λόγος στην προσπάθεια καταστολής των αρμονικών ανώτερης τάξης. Επιπρόσθετα, καθώς η αντίσταση μεταβάλλεται και εν προκειμένω αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, προσπάθειες καταβάλλονται και για την ικανοποιητική ψύξη ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες. Τέλος καθώς η αντίσταση εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών (διατομή και μήκος), καθώς και την ειδική αντίσταση του υλικού, η επιλογή των αγωγών (πχ. αγωγός ή μπάρα χαλκού κοκ.) υπαγορεύεται από την εκάστοτε εφαρμογή [13].

2.3.2 Απώλειες πυρήνα

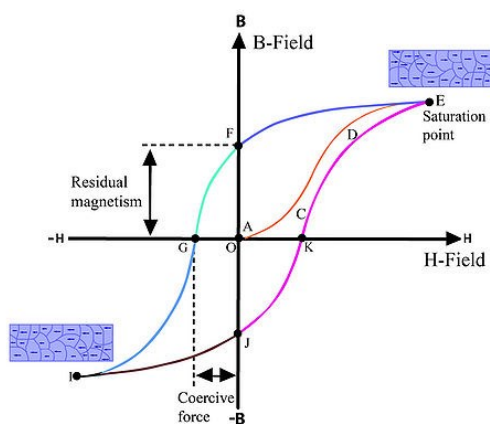
Όταν ένα μαγνητικό υλικό βρίσκεται υπό την επίδραση χρονικά μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου, εμφανίζει απώλειες πυρήνα, τις οποίες αντιλαμβανόμαστε λόγω της έκλυσης θερμότητας. Οι κύριοι μηχανισμοί μετατροπής της ενέργειας του πεδίου σε θερμότητα είναι δύο, οπότε προκύπτουν τα αντίστοιχα είδη απωλειών πυρήνα: οι απώλειες λόγω υστέρησης και οι απώλειες λόγω δινορρευμάτων. Στη συνέχεια περιγράφονται οι μηχανισμοί αυτοί και ορισμένοι τρόποι μοντελοποίησής τους για την εκτίμηση των συνολικών απωλειών πυρήνα στις ηλεκτρικές μηχανές.

2.3.2.1 Απώλειες υστέρησης

Όταν η πυκνότητα μαγνητικής ροής σε ένα μέσο μεταβάλλεται σε σχέση με το χρόνο, τότε είτε απορροφάται ή αποδίδεται ενέργεια από το μέσο αυτό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως οι μαγνητικές ιδιότητες ενός υλικού, οφείλονται στον προσανατολισμό σε ορισμένη διεύθυνση και φορά των στοιχειωδών διπολικών ροπών. Καθώς αρχικά είναι ουδέτερα προσανατολισμένο, χρειάζεται ενέργεια ώστε να λάβει χώρα ο προσανατολισμός. Η ενέργεια ανά μονάδα όγκου του μέσου δίνεται από το ολοκλήρωμα:

$$w = \int_{B_1}^{B_2} H * dB \left(\frac{J}{m^3} \right) \quad (2-14)$$

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά, τείνουν να διατηρήσουν τον προσανατολισμό στο σώμα τους έπειτα από την επιβολή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου. Αυτό ισχύει ακόμα και μετά την αφαίρεσή του καθώς χρειάζεται ενέργεια για τον αποπροσανατολισμό. Για το λόγο αυτό οι καμπύλες μαγνήτισης και απομαγνήτισης διαφέρουν, σχηματίζοντας τελικά τον βρόχο υστέρησης όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6:



Σχήμα 2-6 Βρόχος υστέρησης

Υπολογίζοντας το παραπάνω ολοκλήρωμα για ένα πλήρη κύκλο μαγνήτισης και απομαγνήτισης, προκύπτει ότι το υλικό απορροφά περισσότερη ενέργεια απ' όση αποδίδει. Η ενεργειακή διαφορά σε κάθε κύκλο, μετατρέπεται σε θερμότητα και ισούται με το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης επί τον όγκο του υλικού. Η ενέργεια που απορροφάται σε κάθε κύκλο ονομάζεται απώλεια υστέρησης και λαμβάνει χώρα σε όλο τον όγκο του υλικού, με συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας του και τη μείωση της απόδοσης, είτε πρόκειται για μετασχηματιστή είτε για ηλεκτρική μηχανή. Το γεγονός πως χρειάζεται ενέργεια για τον αποπροσανατολισμό, και άρα την

απομαγνήτιση του υλικού, είναι και ο λόγος που οι μόνιμοι μαγνήτες δύνανται να καταστραφούν είτε λόγω μηχανικού σοκ είτε λόγω αύξησης της θερμοκρασίας τους.

Στην ειδική περίπτωση που η μαγνητική ροή μεταβάλλεται ημιτονοειδώς σε σχέση με το χρόνο με συχνότητα f , χωρίς το σχηματισμό μικρότερων βρόχων, και με μέγιστη τιμή B_m , η ειδική απώλεια λόγω υστέρησης δίνεται από την προσεγγιστική σχέση:

$$p_h = k_h * f * B_m^x \left(\frac{W}{m^3} \right) \quad (2-15)$$

Όπου k_h σταθερά που εξαρτάται από τη δομή του υλικού και x η σταθερά του Steinmetz, που κυμαίνεται από 1.8 έως 2.2, ενώ συνήθως λαμβάνεται ως 2.

Η παραπάνω μοντελοποίηση, των απωλειών υστέρησης, προϋποθέτει πως η μαγνητική ροή μεταβάλλεται μόνο ως προς το μέτρο, ενώ η διεύθυνσή της παραμένει σταθερή. Αυτή η κατάσταση απαντάται στους μετασχηματιστές, στο μεγαλύτερο μέρος του πυρήνα τους. Όμως στους κινητήρες λαμβάνει χώρα και μεταβολή της διεύθυνσης της μαγνητικής ροής. Κατά συνέπεια, στις ηλεκτρικές μηχανές εμφανίζεται επιπλέον και περιστροφική απώλεια υστερήσεως (ιδιαίτερα στα δόντια). Γενικότερα στους κινητήρες, λόγω της χρήσης ηλεκτρονικών ισχύος που εισάγουν αρμονικές ρεύματος, έχουμε κατά κανόνα παραπάνω από δύο μεταβολές στο πρόσημο της παραγώγου dH/dt στη διάρκεια μια περιόδου. Συνεπώς αναπτύσσονται οι απαραίτητες προϋποθέσεις ώστε πέραν του μείζονα βρόχου υστέρησης να αναπτυχθούν και ελάσσονες ή/και ασύμμετροι βρόχοι υστέρησης και προφανώς να έχουμε αυξημένες απώλειες. Τέλος στη πράξη εμφανίζεται ένας συνδυασμός από μορφές βρόχων υστέρησης ανάλογων της συχνότητας, του επιπέδου της διέγερσης, και των μεταβολών της διέγερσης που οδηγούν σε αυξημένες απώλειες, αλλά το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι η δυσκολία μοντελοποίησης, καθώς η συμπεριφορά τους εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και εν πολλοίς δεν είναι γραμμική. [23], [24], [13]

2.3.2.2 Απώλειες δινορρευμάτων

Η χρονική μεταβολή της μαγνητικής ροής επάγει ηλεκτρικό πεδίο-τάση, σύμφωνα με τον νόμο του Faraday, στο σώμα του πυρήνα. Λόγω της αγωγιμότητας των σιδηρομαγνητικών υλικών εμφανίζονται ρεύματα στο σώμα του πυρήνα, που καλούνται δινορρεύματα καθώς ρέουν κυκλικά (σαν δίνες σε υδραυλικό ανάλογο) σε επίπεδο κάθετο προς τη διεύθυνση της μαγνητικής ροής. Κατά συνέπεια, εμφανίζονται απώλειες Joule και μέρος της ενέργειας του πεδίου μετατρέπεται σε θερμότητα. Η απώλεια από δινορρεύματα αποδεικνύεται ότι είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της συχνότητας, το τετράγωνο του πάχους του ελάσματος, τετράγωνο της πυκνότητας της ροής και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογη της ειδικής αντίστασης του υλικού.

Στην ειδική και πάλι, περίπτωση που η μαγνητική ροή μεταβάλλεται ημιτονοειδώς στο χρόνο -και μόνο ως προς το μέτρο της-, μια σχέση περιγραφής της ειδικής απώλειας από δινορρεύματα είναι η ακόλουθη:

$$p_e = k_e * f^2 * B^2 \left(\frac{W}{m^3} \right) \quad (2-16)$$

Όπου k_e σταθερά που εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού, και f η συχνότητα μεταβολής του μαγνητικού πεδίου.

Καθώς οι απώλειες λόγω δινορρευμάτων εξαρτώνται από τη συχνότητα μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής, εμφανίζεται πρόσθετη απώλεια σε περίπτωση που μεταβάλλεται και η διεύθυνση της μαγνητικής επαγωγής.

Προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες λόγω δινορρευμάτων η συνηθέστερη και πιο αποτελεσματική πρακτική είναι η χρήση, ελασματοποιημένης λαμαρίνας. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται σημαντικά η ηλεκτρική του αγωγιμότητα και έτσι μειώνονται και οι απώλειες λόγω δινορρευμάτων. Ο λόγος είναι πως ο πυρήνας φτιάχνεται από πεπεσμένα ελάσματα μετάλλου, που ανάμεσά τους φέρουν μονωτική ουσία. Η μονωτική ουσία μειώνει την ηλεκτρική αγωγιμότητα, αφήνοντας όμως πρακτικά ανεπηρέαστες τις μαγνητικές ιδιότητες. Τέλος, για την καταστολή των δινορρευμάτων υπό υψίσυχη συχνότητα διέγερσης, είναι σχεδόν επιβεβλημένη η χρήση λαμαρίνας χαμηλής αγωγιμότητας [21], [23], [25]

2.3.3 Απώλειες δινορρευμάτων στους μαγνήτες

Απώλειες δινορρευμάτων εμφανίζονται και στους μαγνήτες. Η σχετικά υψηλή αγωγιμότητα των μαγνητών Νεοδυμίου Σιδήρου Βορίου (NdFeB) προκαλεί επιπλέον απώλειες λόγω δινορρευμάτων. Η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω των απωλειών αυτών, μπορούν να γίνουν αιτία μερικής (ή και ολικής/μη-αναστρέψιμης αν ξεπεράσουν κάποια κρίσιμη θερμοκρασία) απομαγνήτισης των μαγνητών. Σε σύγχρονες μηχανές μόνιμων μαγνητών με συγκεντρωμένο τύλιγμα (και ιδιαίτερα σε τοπολογίες με κοντινούς αριθμούς πόλων και αυλάκων), η μαγνητεγερτική δύναμη του στάτη περιέχει έναν μεγάλο αριθμό χωρικών αρμονικών, οι οποίες είναι βασική αιτία για τις απώλειες δινορρευμάτων στους μαγνήτες. Ειδικά στην περίπτωση που η μηχανή συνδέεται σε μετατροπέα, οι χρονικές αρμονικές του ρεύματος επαυξάνουν περαιτέρω αυτές τις απώλειες.

Μία αναλυτική μέθοδος εκτίμησής τους θεωρεί ως μοναδική αιτία των απωλειών λόγω δινορρευμάτων στους μαγνήτες το μαγνητικό πεδίο λόγω αντίδρασης οπλισμού. Στη συνέχεια, τα επαγόμενα αυτά ρεύματα υπολογίζονται από τη χρονική μεταβολή του διανυσματικού δυναμικού στην περιοχή των μαγνητών, δίνοντας τελικά τη συνολική απώλεια για τους μαγνήτες. Το θεωρητικό αποτέλεσμα που προκύπτει μπορεί να αξιολογηθεί εφαρμόζοντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων: απ' ενός λογαριάζεται η χρονική μεταβολή στο φασικό ρεύμα και στο μαγνητικό πεδίο της μηχανής, απ' ετέρου μπορεί να αναπτυχθεί ένα συζευγμένο μοντέλο που λογαριάζει την επίδραση του εξωτερικού φορτίου (συγκεκριμένα τις ανώτερες αρμονικές φασικού ρεύματος που προκαλούνται απ' τον ανορθωτή στην έξοδο της μηχανής). Προκειμένου να περιοριστούν οι απώλειες στους μαγνήτες, μία συνηθισμένη πρακτική είναι η χρήση της τεχνικής ελεγχόμενης ανόρθωσης PWM, μέσω της οποίας καταστέλλονται οι ανώτερες αρμονικές του φασικού ρεύματος. Μία άλλη ιδιαίτερα αποδοτική μέθοδος, σχετική με την κατασκευή της μηχανής, είναι η κατάτμηση των μαγνητών στο δρομέα [14]. Καθώς η απώλεια λόγω δινορρευμάτων στους μαγνήτες είναι αντιστρόφως ανάλογη με τον αριθμό των επιμέρους μαγνητών σ' ένα πολικό βήμα. Συνεπώς, «τεμαχίζοντας» το μαγνήτη ενός πόλου σε περισσότερα τμήματα, οι απώλειες στους μαγνήτες περιορίζονται σημαντικά [13], [26].

2.3.4 Απώλειες περιστροφής

Απώλειες περιστροφής ορίζονται συνήθως ως οι απώλειες, εξαιτίας της σχετικής κίνησης του ρευστού που παρεμβάλλεται μεταξύ του στάτη και του δρομέα (ακτινική συνιστώσα). Ανάλογα τον τύπο του κινητήρα και της ισχύς του το ρευστό δύναται να μην είναι μόνο αέρας και επίσης οι απώλειες ανεμισμού να μην περιορίζονται μόνο στην σχετική κίνηση δρομέα-στάτη αλλά να επεκτείνονται γενικά στα κινούμενα μέρη που απαρτίζουν τον κινητήρα (φτερωτές εκτός κυρίως σώματος κλπ). Επιπλέον συχνά λαμβάνεται υπόψιν και η ροή του ρευστού που υπάρχει ανάμεσα στο δρομέα και στο κέλυφος του κινητήρα τόσο ακτινικά όσο και αξονικά.

Υπάρχουν αρκετοί εμπειρικοί τύποι στην βιβλιογραφία, ενώ πλέον μέσω λογισμικών πακέτων CFD (computer fluid dynamics) δύναται να υπολογιστούν με μεγάλη ακρίβεια, αλλά και μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Γενικά πάντως, οι απώλειες εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής υψωμένη σε κάποια δύναμη, το ρευστό και τις ιδιότητές του, την πίεση, την θερμοκρασία και άλλες μεταβλητές. [27] [28]

2.3.5 Διαφεύγουσες απώλειες

Εδώ κατατάσσονται οι απώλειες που είτε δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν-προσεγγιστούν ικανοποιητικά, είτε οφείλονται σε γνωστά φαινόμενα αλλά ο υπολογισμός τους είναι κοπιώδης με μικρή συνεισφορά στην βελτίωση των αναλύσεων.

Σε αυτές μπορούμε να τοποθετήσουμε το επιδερμικό φαινόμενο, το φαινόμενο γειννίασης, την μεταβολή των ιδιοτήτων συναρτήσει της θερμοκρασίας, μη-γραμμικότητες και αρκετά από τα φαινόμενα λόγω αρμονικών και λόγω φόρτισης. Ειδικότερα:

Επιδερμικό φαινόμενο καλείται το φαινόμενο κατά το οποίο, σε υψηλές συχνότητες, το ρεύμα που διαρρέει έναν αγωγό, δεν κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη του τη διατομή, όπως γίνεται στο συνεχές ρεύμα, αλλά τείνει να κατανέμεται σε ένα λεπτό εξωτερικό κέλυφος. Αυτό είναι αποτέλεσμα της μεταβαλλόμενης μαγνητικής ροής

εντός του αγωγού της, μεταβολή η οποία οφείλεται στο ίδιο το ρεύμα του αγωγού. Έτσι, προκύπτουν δινορρέυματα που αναπτύσσονται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να ενισχύουν το ρεύμα κοντά στην επιφάνεια του αγωγού και να το εξασθενούν προς το κέντρο της διατομής του αγωγού. Ως απόρροια αυτού, σε αγωγούς κυκλικής διατομής, έχουμε μέγιστη πυκνότητα ρεύματος στην εξωτερική επιφάνεια και ελάχιστη στο κέντρο, ενώ σε αγωγούς τετραγωνικής διατομής έχουμε αντίστοιχα, μέγιστη πυκνότητα στις γωνίες, μικρότερη στις ακμές, και ελάχιστη στο κέντρο. Αποτέλεσμα αυτών είναι η αύξηση της αντίστασης του αγωγού (στη βιβλιογραφία συναντάται και ως ενεργός αντίσταση) και κατ' επέκταση αύξηση των απωλειών χαλκού. Επιπρόσθετα η ανακατανομή του ρεύματος, καθώς το αίτιο αντιτίθεται στο αιτιατό, έχει τέτοιο χαρακτήρα ώστε να μειώνεται η σύζευξη της μαγνητικής ροής με το αγώγιμο υλικό. Συνεπώς, η συνολική ενέργεια μαγνητικού πεδίου μειώνεται, προκαλώντας μείωση της συνολικής επίδοσης.

Η αύξηση της ενεργού αντίστασης και η μείωση του συντελεστή αυτεπαγωγής, είναι ανάλογη της αύξησης της συχνότητας f του ρεύματος, και εξαρτάται από την ειδική αγωγιμότητα σ , την μαγνητική διαπερατότητα μ και τις γεωμετρικές διαστάσεις και μορφολογίας του αγωγού. Σημαντικό μέγεθος για την περιγραφή του επιδερμικού φαινομένου είναι το επιδερμικό βάθος (skin depth) δ , που ορίζεται ως το βάθος από την αγωγή κυκλικής διατομής στο οποίο, η πυκνότητα ρεύματος έχει πάρει την τιμή $1/e$ της τιμής στην επιφάνεια.

Το επιδερμικό βάθος δίνεται από τον τύπο

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\sigma\pi\mu f}} \quad (2-17)$$

Τέλος, καθώς ο χαλκός είναι το κύριο υλικό που χρησιμοποιείται στα τυλίγματα, αναφέρεται ότι για θερμοκρασία 20°C, σε συχνότητα 50Hz το επιδερμικό βάθος για το χαλκό είναι 9.3mm, ενώ στο 1kHz είναι 2.1mm και στα 50kHz είναι 0.3mm.

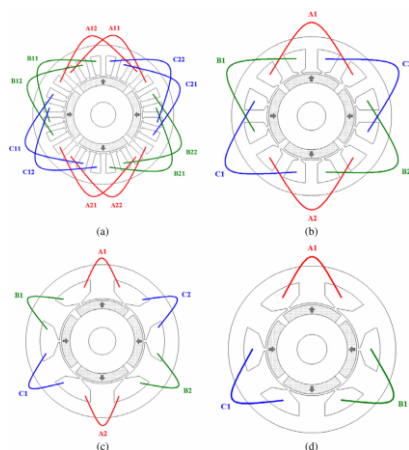
Για την μείωση του επιδερμικού φαινομένου, προτιμάται η χρήση όσο το δυνατόν λεπτότερων αγωγών, έχοντας πάντα να αντισταθμίσουμε την αύξηση της αντίστασης όσο λεπταίνει ο αγωγός.

Φαινόμενο γειτνίασης, καλείται το φαινόμενο κατά το οποίο: σε έναν ρευματοφόρο αγωγό που γειτνιάζει με άλλους αγωγούς οι οποίοι διαρρέονται από ρεύμα της ίδιας

τάξης (ή και μεγαλύτερης) με το ρεύμα εντός του ίδιου, οι κατανομές του μαγνητικού πεδίου και της πυκνότητας ρεύματος εντός του ίδιου, καθορίζονται κατά κύριο λόγο από την επίδραση των γειτονικών αγωγών και με τη γεωμετρία της σχετικής τοποθέτησης των αγωγών μπορεί, η οποία μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή. Βέβαια, στη γενική περίπτωση, η επίδραση αυτή μειώνεται όταν αυξάνονται οι αποστάσεις των γειτονικών αγωγών από τον εξεταζόμενο αγωγό, αλλά για ένα μεγάλο πλήθος αγωγών που οι αποστάσεις από τους γειτονικούς τους αγωγούς είναι της τάξης των διαστάσεων της διατομής αυτών, το φαινόμενο γειννίασης σε κάθε έναν από αυτούς είναι σημαντικότερο από το επιδερμικό. Το αποτέλεσμα είναι και πάλι η συγκέντρωση του ρεύματος στις περιοχές της διατομής του αγωγού όπου το μαγνητικό πεδίο εμφανίζεται ισχυρότερο και η συνακόλουθη αύξηση της ενεργού αντιστάσεως [13], [20].

2.4 Τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών

Το τύλιγμα μίας ηλεκτρικής μηχανής χαρακτηρίζεται ως προς τις τερματικές συνδέσεις των επιμέρους πηνίων, τον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται στα αυλάκια και το βήμα συστάδας. Έτσι, μπορεί να είναι βροχοειδές ή κυματοειδές (το 1^ο χρησιμοποιείται σε μηχανές με λίγους πόλους ενώ το 2^ο σε πολυπολικές μηχανές χαμηλών ταχυτήτων), διανεμημένο (με 1 ή περισσότερα αυλάκια ανά πόλο και φάση), πλήρους ή κλασματικού βήματος. Στο Σχήμα 2.7 παρατίθενται 4 διαφορετικές περιπτώσεις τυλιγμάτων:



Σχήμα 2-7 Διαμορφώσεις τυλιγμάτων στάτη: (a) 24 αυλάκες, επικαλυπτόμενο, διανεμημένο, (b) 6 αυλάκες, επικαλυπτόμενο, (c) 6 αυλάκες, μη επικαλυπτόμενο, όλα τα δόντια τυλιγμένα, (d) 6 αυλάκες, μη επικαλυπτόμενο, τυλίγματα στα μισά δόντια

Οι συνηθέστερες περιπτώσεις είναι:

- Επικαλυπτόμενο, διανεμημένο με 1 ή 2 αυλάκια ανά πόλο και φάση
- Μη επικαλυπτόμενο, συγκεντρωμένο, όλα τα δόντια με τυλίγματα ή ανά δύο.

Το διανεμημένο επικαλυπτόμενο τύλιγμα παράγει γενικά πιο ημιτονοειδή ΜΕΔ στο διάκενο, γι' αυτό χρησιμοποιείται εκτεταμένα στις μηχανές μόνιμου μαγνήτη χωρίς συλλέκτη (Brushless AC PM machines). Για το συγκεντρωμένο τύλιγμα θα γίνει ειδικότερη αναφορά καθώς είναι και αυτό που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εφαρμογή.

2.4.1 Συγκεντρωμένο τύλιγμα

Μια νέα τοπολογία, που χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο, είναι το συγκεντρωμένο τύλιγμα κλασματικού βήματος (Fractional Slot Concentrated Winding). Ο λόγος διάδοσης έγκειται στην υψηλή πυκνότητα ισχύος, την απόδοση και τα κοντά άκρα τυλιγμάτων. Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται κάποια χαρακτηριστικά συγκεντρωμένων διανεμημένων τυλιγμάτων [4]:

	Διανεμημένα	Συγκεντρωμένα
Συντελεστής πληρότητας χαλκού στις αύλακες	35%-45%	50%-65%
Κατασκευή στάτη	Συνεχή ελάσματα	Συνεχή ελάσματα ή τμηματικές κατασκευές
Τυλίγματα τερματικών συνδέσεων	Μακρά επικαλυπτόμενα	Κοντά μη επικαλυπτόμενα
Αρμονικό περιεχόμενο παραγόμενης από το στάτη ροπής	Θεμελιώδης	Στις περισσότερες περιπτώσεις (εκτός από $q=1/2$) υψηλότερης τάξης αρμονικές

Πίνακας 2-2: Χαρακτηριστικά διανεμημένων και συγκεντρωμένων τυλιγμάτων

Ορισμένα βασικά πλεονεκτήματα των συγκεντρωμένων τυλίγμάτων είναι τα ακόλουθα:

- Ευκολία στην κατασκευή, εφόσον πρόκειται για μη επικαλυπτόμενα τυλίγματα.
- Υψηλός συντελεστής πληρότητας χαλκού, άρα μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος.
- Κοντύτερα άκρα τυλίγματος, με αποτέλεσμα χαμηλότερες απώλειες χαλκού.
- Υψηλότερη ανοχή στα σφάλματα και καλύτερη συμπεριφορά σε μεταβατικές καταστάσεις, εφόσον δεν υπάρχουν αμοιβαίες επαγωγές ανάμεσα στις φάσεις.
- Χαμηλή ροπή ευθυγράμμισης, δεδομένου ότι περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό κύκλων ευθυγράμμισης ανά μηχανική περιστροφή.

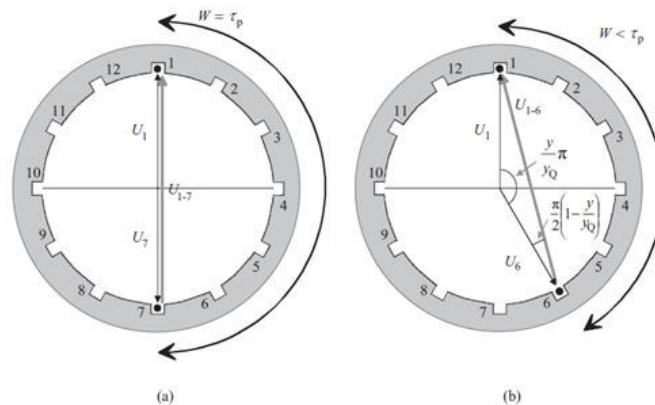
Στα συγκεντρωμένα τυλίγματα επιτυγχάνεται υψηλότερος συντελεστής πληρότητας χαλκού (άρα και υψηλότερη πυκνότητα ισχύος), τα άκρα είναι κοντύτερα, οι απώλειες χαλκού χαμηλότερες, η ροπή όμως περιλαμβάνει στις περισσότερες περιπτώσεις ανώτερες αρμονικές, εν αντιθέσει με τα διανεμημένα τυλίγματα όπου κυριαρχεί η θεμελιώδης αρμονική ροπής, 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 μαγνήτες λόγω των ανώτερων αρμονικών του μαγνητικού πεδίου. Σημειώνεται ακόμη ότι το συγκεντρωμένο τύλιγμα στα δόντια του στάτη, μέχρι πριν λίγα χρόνια, χρησιμοποιούνταν κυρίως σε εφαρμογές μικρής ισχύος (κλασματικού ίππου) και πολλών πόλων (μόνο έτσι μπορεί να υλοποιηθεί τριφασικό σύστημα).

Σε εφαρμογές ασύγχρονων μηχανών, η υιοθέτηση συγκεντρωμένου τυλίγματος κλασματικού βήματος χαρακτηρίζεται από μικρότερη ικανότητα ροπής, υψηλότερη κυμάτωση και απώλειες στους αγωγούς του δρομέα, εν συγκρίσει με το κλασικό διανεμημένο τύλιγμα, και για αυτό τον λόγο δεν είναι τόσο διαδεδομένη.

Από την άλλη, το κατανεμημένο τύλιγμα δίνει μεγαλύτερη ΗΕΔ χάρη στον υψηλότερο συντελεστή τυλίγματος. Ειδικά σε εφαρμογές μηχανών εσωτερικών μονίμων μαγνητών (Internal PMSMs), το διανεμημένο τύλιγμα παράγει υψηλότερη μέση ροπή και χαμηλότερη ροπή ευθυγράμμισης (cogging torque) [14], [15], [20].

2.4.1.1 Κλασματικό βήμα

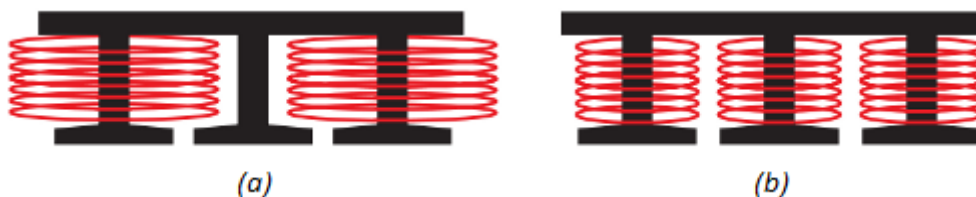
Τα τυλίγματα στα οποία ο αριθμός αυλάκων ανά πόλο και ανά φάση δεν είναι ακέραιος αλλά κλασματικός, ονομάζονται τυλίγματα κλασματικού βήματος. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι τα πηνία έχουν τοποθετηθεί κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι πιο κοντά σε μήκος συγκριτικά με τα τυλίγματα πλήρους βήματος. Για παράδειγμα, σε μία διπολική μηχανή 12 αυλάκων (πολικού βήματος εκπεφρασμένο σε αύλακες $Q/P = 6$), το πηνίο της αύλακας 1 θα έπρεπε να καταλήγει στην αύλακα 7 (αφού η αλληλουχία είναι $A A -C -C B B -A$). Όμως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8, το πηνίο αυτό καταλήγει στην αύλακα 6, εξ' ου και ο όρος κλασματικού βήματος $5/6$ (δηλαδή το βήμα του πηνίου είναι $5/6 * 180^\circ = 150^\circ$ ηλεκτρικές μοίρες).



Σχήμα 2-8 (α) Πλήρες, (β) κλασματικό βήμα

2.4.1.2 Διπλή στρώση

Στην περίπτωση συγκεντρωμένου τυλίγματος κλασματικού βήματος, μία σημαντική επιλογή είναι ο αριθμός των στρώσεων. Στα τυλίγματα μονής στρώσης τα πηνία τυλίγονται γύρω από εναλλασσόμενα δόντια, ενώ στη διπλή στρώση τυλίγονται γύρω από κάθε δόντι. Αυτό φαίνεται παραστατικά στο Σχήμα 2-9.



Σχήμα 2-9 Τυλίγματα (α) μονής στρώσης, (β) διπλής στρώσης

Στον επόμενο πίνακα γίνεται σύγκριση ανάμεσα στα τυλίγματα μονής και διπλής στρώσης [29]

	Τυλίγματα διπλής στρώσης	Τυλίγματα μονής στρώσης
Πηνία/αύλακες	2	1
Αμοιβαία ζεύξη φάσεων	Σημαντική λόγω αυτεπαγωγής σκέδασης στην αύλακα	Χαμηλή αμοιβαία επαγωγή
Άκρα τυλίγματος	Κοντά	Μακρά
Φασική αυτεπαγωγή	Χαμηλότερη λόγω μικρότερης αυτεπαγωγής σκέδασης	Υψηλότερη εξαιτίας μεγαλύτερης αυτεπαγωγής σκέδασης (καλύτερη ικανότητα εξασθένησης πεδίου)
Απώλειες δρομέα	Χαμηλότερες λόγω χαμηλότερων αρμονικών ΜΕΔ στάτη	Υψηλότερες εξαιτίας σημαντικότερου αρμονικού περιεχομένου ΜΕΔ στάτη
Συνδυασμοί αυλάκων-πόλων	Περισσότεροι	Λιγότεροι
Κατασκευή	Δυσκολότερη εφόσον υπάρχουν δύο πηνία/αύλακα	Ευκολότερη
Συντελεστής τυλίγματος	Χαμηλότερος	Υψηλότερος
Αντί-ΗΕΔ	Πιο ημιτονοειδής	Λιγότερο ημιτονοειδής

Πίνακας 2-3 Συγκριτικός πίνακας τυλιγμάτων μονής και διπλής στρώσης

Τα τυλίγματα μονής στρώσης παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή σε βραχυκύκλωμα, χάρη στις μεγαλύτερες αυτεπαγωγές ανά φάση, περιορίζοντας έτσι το ρεύμα σφάλματος. Επίσης εμφανίζουν και μικρότερες αμοιβαίες επαγωγές, εμποδίζοντας έτσι την απώλεια «υγειών» φάσεων σε περίπτωση σφάλματος). Επιπλέον, χάρη στην μεγαλύτερη αυτεπαγωγή σκέδασης, τα μονής στρώσης τυλίγματα προτιμώνται σε εφαρμογές που απαιτούν λειτουργία σταθερής ισχύος σε μεγάλο εύρος στροφών (CPSR).

Στα τυλίγματα διπλής στρώσης οι απώλειες πυρήνα λόγω δινορρευμάτων είναι χαμηλότερες, λόγω του μικρότερου αρμονικού περιεχομένου της ΜΕΔ που προκαλεί η αντίδραση στάτη. Επιπλέον, η ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι περισσότερο ημιτονοειδής. Παρόλα αυτά, στη διπλή στρώση η ικανότητα παραγωγής ροπής σε κατάσταση υπερφόρτισης είναι μικρότερη απ' ό τι στη μονή [29]

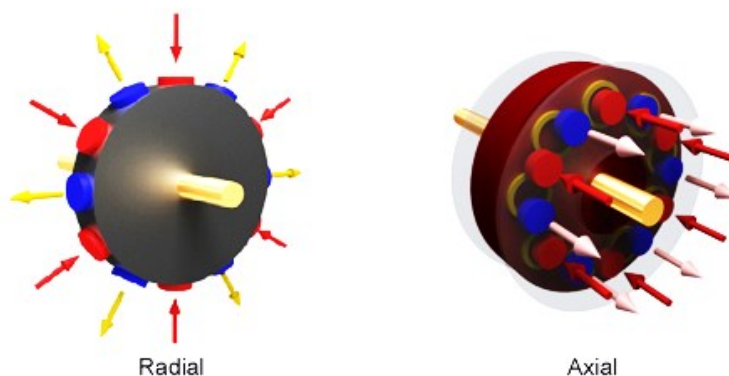
Στην συγκεκριμένη εφαρμογή δεν αναμένεται λειτουργία σε μεγάλο εύρος στροφών ή υπερφόρτιση του κινητήρα. Επιπλέον, απαιτούνται χαμηλές απώλειες, ώστε ο βαθμός απόδοσης της μηχανής να είναι ικανοποιητικός και σε χαμηλό φορτίο. Επιπρόσθετα, επιθυμητή είναι και η ελαχιστοποίηση των διαστάσεων της μηχανής. Παρά τα μειονεκτήματα της διπλής στρώση που αναφέρθηκαν, όσον αφορά στη ροπή (μικρότερη ικανότητα παραγωγής ροπής, υψηλότερη κυμάτωση), αυτή η τοπολογία χαρακτηρίζεται από χαμηλότερα επίπεδα απωλειών δρομέα και θορύβου. Επιπλέον καθώς το σύστημα πρόωσης, λόγω των αξόνων, της προπέλας και των λοιπών στρεφόμενων μαζών, διαθέτει μεγάλη αδράνεια, η κυμάτωση της ροπής δεν αποτελεί ουσιώδες πρόβλημα καθώς η μεγάλη αδράνεια, αναμένεται να εξομαλύνει την κυμάτωση ροπής στον άξονα εξόδου. Για τους παραπάνω λόγους, επιλέγεται τελικά συγκεντρωμένο τύλιγμα κλασματικού βήματος διπλής στρώσης.

2.5 Διαμορφώσεις δρομέα μηχανών μονίμων μαγνητών

Οι μηχανές μονίμων μαγνητών, ανάλογα με την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής, διαχωρίζονται στις δύο επόμενες κατηγορίες [15] [14]:

- Μηχανές ακτινικής ροής
- Μηχανές αξονικής ροής

Οι πρώτες είναι και οι πιο συνηθισμένες. Σ' αυτές η ροή κινείται ακτινικά στη μηχανή, ενώ το ρεύμα κυκλοφορεί στην αξονική διεύθυνση, όπως φαίνεται παραστατικά και στο Σχήμα 2-10.



Σχήμα 2-10 Αριστερά μηχανή ακτινικής ροής, δεξιά αξονικής ροής.

Οι μηχανές μόνιμου μαγνήτη αξονικής ροής αποτελούν μία ακόμα δυνατότητα για εφαρμογές χαμηλής ταχύτητας με απ' ευθείας οδήγηση. Χαρακτηριστικό τους είναι η σχετικά μεγάλη διάμετρος και το μικρό αξονικό μήκος τους συγκριτικά με τις μηχανές ακτινικής ροής.

2.5.1 Μηχανές επιφανειακών μόνιμων μαγνητών με εσωτερικό δρομέα

Σ' αυτές τις μηχανές οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δρομέα. Πρόκειται για την πιο συνηθισμένη διαμόρφωση. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι η απλότητά της και το χαμηλότερο κόστος της συγκριτικά με άλλες διαμορφώσεις. Το κυριότερο μειονέκτημα είναι ο κίνδυνος απομαγνήτισης των μαγνητών λόγω εξωτερικών πεδίων, μολονότι έχει καλές ιδιότητες ψύξης των μαγνητών. Επιπλέον, οι μαγνήτες υπόκεινται σε φυγόκεντρες δυνάμεις που μπορεί να προκαλέσουν την αποκόλλησή τους απ' τον δρομέα. Συνακόλουθα, δε συνίστανται σε εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων.

2.5.2 Μηχανές εσωτερικά επιφανειακών μαγνητών

Σ' αυτή την περίπτωση οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δρομέα, αλλά τα μεταξύ τους διάκενα είναι πληρωμένα με σίδηρο. Η εκτυπότητα λόγω σιδήρου, προκαλεί μία ροπή αντίδρασης, πέραν εκείνης που οφείλεται στους μαγνήτες. Σε σχέση με τους εξωτερικά επιφανειακούς παρέχουν αυξημένη ικανότητα συγκράτησης των μαγνητών. Συνεπώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής σε σχέση με τους εξωτερικούς, στον αντίποδα όμως έχουν χειρότερη θερμική συμπεριφορά [30].

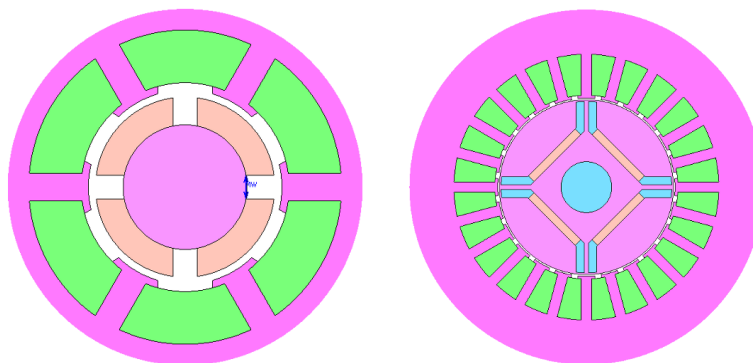
2.5.3 Μηχανές εσωτερικών μαγνητών

Σ' αυτή τη διαμόρφωση μηχανών, οι μαγνήτες τοποθετούνται στο εσωτερικό της λαμαρίνας του δρομέα («θαμμένοι»). Εν συγκρίσει με τη διάταξη επιφανειακών μόνιμων μαγνητών, η μαγνητική ροή απ' τους μαγνήτες μπορεί να συγκεντρωθεί στο

δρομέα, επιτυγχάνοντας πολύ υψηλές τιμές μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο. Επιπλέον, οι εσωτερικοί μαγνήτες διατρέχουν μικρότερο κίνδυνο απομαγνήτισης λόγω θερμικών, μαγνητικών ή μηχανικών καταπονήσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, πως η θέση τους, δεν επιτρέπει απότομες μεταβολές στην θερμοκρασία, μειώνει την επίδραση των εξωτερικών πεδίων και προστατεύει από μηχανικές καταπονήσεις. Στον αντίποδα, υπάρχει σαφής κατασκευαστική δυσκολία καθώς και αυξημένο κόστος. Στον επόμενο πίνακα συγκρίνονται οι επιφανειακοί με τους εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες. Η εγκατάσταση εσωτερικών μαγνητών στο δρομέα, χάρη στη χαμηλή τιμή αυτεπαγωγής του καθέτου άξονα, μειώνει τις απώλειες σιδήρου σε υψηλές ταχύτητες. Μάλιστα, η χρήση αγωγών ορθογώνιας διατομής μπορεί να μειώσει το εύρος των τερματικών συνδέσεων, επιτυγχάνοντας ακόμα υψηλότερο συντελεστή πληρότητας.

Επιπρόσθετα, σε ορισμένες εφαρμογές έχει διαπιστωθεί ότι ο εσωτερικός μαγνήτης παρουσιάζει υψηλότερη πυκνότητα μέγιστης ροπής συγκριτικά με τον επιφανειακό για ίδια ονομαστικά μεγέθη ρεύματος και ΗΕΔ. Προσφέρει επίσης ευρεία περιοχή σταθερής ισχύος με υψηλή πυκνότητα ροπής και υψηλό συντελεστή ισχύος καθώς το σώμα του δρομέα αποτελεί εμπόδιο στη μαγνητική ροή. Αντίθετα, στον επιφανειακό μαγνήτη η περιοχή σταθερής ισχύος είναι περιορισμένη, εξαιτίας της μειωμένης ικανότητας εξασθένησης πεδίου (field weakening capability).

Στο Σχήμα 2-11 φαίνονται οι τοπολογίες, εσωτερικών και επιφανειακών μόνιμων μαγνητών. Αναφέρεται, πως οι επιφανειακοί εσωτερικοί,



Σχήμα 2-11 Αριστερά μηχανή επιφανειακών εξωτερικών μόνιμων μαγνητών $P=4, Q=6$ (SMPM) και δεξιά μηχανή εσωτερικών μόνιμων μαγνητών $P=4, Q=12$ (IPM)

Κεφάλαιο 3ο. Διαστασιολόγηση και προκαταρκτική σχεδίαση κινητήρα μόνιμων μαγνητών ισχύς 9000 Watt

3.1 Προδιαγραφές κινητήρα

Η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, που καθορίζει και την ταχύτητα περιστροφής της έλικας, επιλέγεται σε στροφές ανά λεπτό να είναι:

$$n_{nom} = 530 \text{ RPM}$$

Κατ' επέκταση η ονομαστική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα θα είναι:

$$\omega_{r,nom} = \frac{2*\pi*n_{nom}}{60} = 55.5 \text{ rad/sec} \quad (3-1)$$

Η ονομαστική ισχύς, όπως υπολογίστηκε προηγουμένως, είναι:

$$P_{nom} = 9000 \text{ Watt}$$

Επομένως η ονομαστική ροπή του κινητήρα είναι:

$$T_{nom} = \frac{P_{nom}}{\omega_{r,nom}} = 162.15 \text{ Nm} \quad (3-2)$$

Αφού καθορίσαμε τις θεμελιώδεις προδιαγραφές της εφαρμογής μπορούμε να προχωρήσουμε στην προκαταρκτική σχεδίαση που θα μας δώσει μια αρχική προσέγγιση του κινητήρα.

3.2 Προκαταρκτική σχεδίαση

Η προκαταρκτική σχεδίαση μιας ηλεκτρικής μηχανής, αποτελεί θεμελιώδη διαδικασία στην βελτιστοποίηση των ηλεκτρικών μηχανών, καθώς αποτελεί ένα ασφαλές σημείο εκκίνησης για την διαδικασία βελτιστοποίησης που θα ακολουθήσει. Η προκαταρκτική σχεδίαση απαρτίζεται από τα εξής βήματα:

- Προσδιορισμό της επιφάνειας διακένου, ώστε η μηχανή να αναπτύσσει την απαραίτητη ηλεκτρομαγνητική ροπή, 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 ειδική ηλεκτρικής και μαγνητικής φόρτισης.
- Προσδιορισμός επίδοσης και απόδοσης.

Δεδομένου πως στην προκαταρκτική σχεδίαση, επιδρούν πολλές μεταβλητές, αναπτύχθηκε στο λογισμικό MATLAB, script το οποίο επέτρεψε τον υπολογισμό της επίπτωσης των μεταβολών των μεταβλητών στην προκύπτουσα κάθε φορά σχεδίαση, αλλά και την διενέργεια αρκετών υπολογισμών.

3.2.1 Διαστασιολόγηση διακένου

3.2.1.1 Επιφάνεια διακένου

Στο στάδιο αυτό, βάσει της απαραίτητης αναπτυσσόμενης ροπής υπολογίζεται η απαιτούμενη επιφάνεια διακένου. Η ροπή διακένου T_e υπολογίζεται βάσει της μέσης εφαπτομενικής πίεσης των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο και της επιφάνειας διακένου A , μέσω των ακόλουθων σχέσεων.

$$F_t = P_t * A \quad (3-3)$$

$$T_e = \frac{D * F_t}{2} \quad (3-4)$$

$$T_e = \frac{\pi}{2} D^2 * L * P_t \quad (3-5)$$

Όπου: D η μέση διάμετρος του διακένου και L το ενεργό μήκος της μηχανής

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

$$F_t = L \oint_C \overline{B}_n \cdot \overline{B}_t dl = \frac{L}{\mu_0} \oint_C \overline{B}_n \cdot \overline{B}_t dl \quad (3-6)$$

Καθώς όμως, η επιφάνεια διακένου είναι $A = \pi * D * L$, η μέση πίεση της επαπτομενικής δύναμης στο διάκενο ορίζεται από τον τύπο:

$$P_t = \frac{F_t}{A} = \frac{1}{\pi * D * \mu_0} \oint_C \bar{B}_n \cdot \bar{B}_t dl \quad (3-7)$$

Η μέση μαγνητική φόρτιση επιλέγεται $\bar{B} = 0.7 T$. Θεωρώντας πως για την μαγνητική επαγωγή ισχύει πως, η γωνία μεταξύ της ακτινικής και επαπτομενικής είναι $\theta = 85^\circ$, η μέση επαπτομενική πίεση διακένου δίνεται από τον τύπο:

$$B_n = \bar{B} * \sin \theta \quad (3-8)$$

$$B_t = \bar{B} * \cos \theta \quad (3-9)$$

$$P_t = \frac{B^2 * \pi * D * \sin \theta * \cos \theta}{\pi * D * \mu_0} = \frac{B^2 * \sin 2\theta}{2 * \mu_0} = 33.855 \text{ kN/m}^2 \quad (3-10)$$

Έτσι λοιπόν, θέτοντας την προκύπτουσα τιμή της μέσης επαπτομενικής πίεσης $T_e = \pi * D * L * P_t$ (3-5) έχουμε πως:

$$D^2 * L = 3.0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Η επιλογή των τιμών των ελεύθερων μεταβλητών έχει γίνει λαμβάνοντας υπόψιν εμπειρικούς κανόνες καλής σχεδίασης, όπως για παράδειγμα τη μέση μαγνητική φόρτιση. Επιπρόσθετα, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, και όπως φαίνεται από την σχέση μεταξύ ενεργού μήκους και μέσης διαμέτρου διακένου, οι διαστάσεις της μηχανής επαφίονται στην κρίση του σχεδιαστή, αν δεν υπάρχουν άλλοι λόγοι που να υπαγορεύουν την επιβολή ορίων ή μορφής.

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, κρίθηκε σκόπιμο η προκύπτουσα τοπολογία να έχει αυξημένη ροπή αδράνειας, ώστε να αλληλοεπιδρά ομαλά με το υπόλοιπο μηχανικό σύστημα, όπου θα εφαρμοστεί. Συνεπώς προτιμήθηκε δισκοειδής σχεδίαση, έναντι κυλινδρικών γεωμετριών.

Έτσι η επιλογή των διαστάσεων ήταν η εξής:

$$D = 177 \text{ mm}$$

Και

$$L = 80 \text{ mm}$$

Σημειώνεται, πως οι επιλεγθείσες διαστάσεις δίνουν μικρότερη επιφάνεια διακένου, καθώς μέσω των αναλύσεων προέκυψε πως οι προδιαγραφές πληρούνταν με μικρότερη επιφάνεια διακένου.

3.2.1.2 Πάχος διακένου

Το πάχος διακένου, εν γένει καταβάλλεται προσπάθεια ώστε να ελαχιστοποιείται. Συχνά μάλιστα, το πάχος διακένου υπαγορεύεται από τις ανοχές των εδράσεων ή τις κατασκευαστικές ανοχές της μηχανής. Επιπλέον, αυξημένο διάκενο συνεπάγεται μειωμένη απόδοση, με μειωμένο όμως αρμονικό περιεχόμενο και πιο ημιτονική ΜΕΔ και τούμπαλιν. Στην βιβλιογραφία εμφανίζεται πληθώρα, εμπειρικών τύπων για τον υπολογισμό του πάχους διακένου. Παρ' όλα αυτά στη συγκεκριμένη εφαρμογή, το διάκενο διαστασιολογήθηκε λαμβάνοντας υπόψιν τους περιορισμούς των εδράσεων και τυχούσες μηχανικές καταπονήσεις εξαιτίας της φύσης της εφαρμογής.

Έτσι το διάκενο επιλέχθηκε να έχει πάχος:

$$L_g = 1mm$$

3.2.2 Προσδιορισμός γεωμετρίας και μεγεθών στάτη

Επόμενο βήμα, είναι ο προσδιορισμός της γεωμετρίας, τοπολογίας και διαστασιολόγησης του στάτη. Το πρώτο βήμα, δεν είναι άλλο από τον προσδιορισμό του αριθμού των πόλων και της συχνότητας. Τα δύο αυτά μεγέθη είναι συζευγμένα, απαιτώντας ακόμα μια λήψη απόφασης.

Ισχύει πως:

$$f = \frac{n \cdot P}{120} \Leftrightarrow \frac{f}{P} = \frac{n}{120} \quad (3-11)$$

Η φύση της εφαρμογής είναι τέτοια, όπου δεν αναμένεται λειτουργία σε μεγάλο εύρος στροφών. Αντίθετα, η λειτουργία σε ονομαστική ταχύτητα έχει ένα αυξημένο duty cycle, συνεπώς η μηχανή αναμένεται να λειτουργεί σε τιμές κοντά στην

υπολογιζόμενη. Επιπρόσθετα, για λόγους μείωσης απωλειών, κρίνεται σκόπιμο η συχνότητα να μην είναι πολύ υψηλή. Από τους διάφορους συνδυασμούς συχνότητας και πόλων, προτιμήθηκε η επιλογή των δέκα πόλων που οδηγεί σε εύλογη συχνότητα, καθώς και δυνατότητα καλού CPSR αν τυχόν χρειαστεί.

Για $P = 10$ πόλους και $n = 530rpm$ προκύπτει $f=44$ Hz

Χρησιμοποιώντας τα προηγούμενα αποτελέσματα, υπολογίζεται η μέγιστη μαγνητική ροή ανά πόλο:

$$\Phi_{max} = \frac{\pi \cdot \bar{B} \cdot D \cdot L}{P} = 3.11 \text{ mWb} \quad (3-12)$$

Εν συνεχεία, καθορίζεται το επίπεδο τάσης του κινητήρα. Με βάση το επίπεδο τάσης, θα εκτιμηθεί ο απαιτούμενος αριθμός σπειρών ανά φάση. Στην εφαρμογή αυτή, το επίπεδο της τάσης καθορίζεται από το επίπεδο τάσης των μπαταριών, την δυνατότητα οδήγησης του αντιστροφέα και την προσπάθεια μείωσης των απωλειών.

Κάνοντας μια πρωθύστερη αναφορά, καθώς η κυρίαρχη συνιστώσα απωλειών, είναι οι απώλειες χαλκού, είναι προφανές πως όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο τάσης τόσο πιο αποδοτικός θα είναι ο κινητήρας. Έτσι λοιπόν η τάση των μπαταριών επιλέγεται:

$$V_{bat} = 84 \text{ V}$$

Θεωρώντας αντιστροφέα SPWM και συντελεστή διαμόρφωσης $m_a=0,85$, το πλάτος της θεμελιώδης συνιστώσας της φασικής τάσης εξόδου θεωρείται ίσο με:

$$V_{pp-ph} = \frac{m_a \cdot V_{dc}}{2} = 35.7 \text{ V} \quad (3-13)$$

Και όπως έχει ήδη εξηγηθεί: $V_{pp-ph,opt} = 30.6 \text{ V}$ επομένως η RMS τιμή της αντί-HEΔ θα είναι:

$$e_{ph} = \frac{V_{pp-ph,opt}}{\sqrt{2}} = 21.64 \text{ V} \quad (3-14)$$

Η αναπτυσσόμενη HEΔ από τον κινητήρα δίνεται από τον τύπο:

$$e_{ph} = 4.44 \cdot k_w \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi_{max} \quad (3-15)$$

Από όπου, προκύπτει πως για συντελεστή τυλίγματος $k_w=0.933$, ο απαιτούμενος αριθμός ελιγμάτων ανά φάση είναι:

$$N_s = \frac{e_{ph}}{4.44 \cdot k_w \cdot f \cdot \Phi_{max}} = 8 \text{ σπείρες/φάση} \quad (3-16)$$

Θεωρώντας ένα τυπικό συντελεστή ισχύος $\cos \varphi = 0,8$ επαγωγικό το ονομαστικό ρεύμα γραμμής θα είναι:

$$I_N = \frac{P_{nom}}{3 * e_{ph} * \cos \varphi} = 173.31 A \quad (3-17)$$

3.2.3 Ειδική ηλεκτρική και μαγνητική φόρτιση

Η ειδική μαγνητική φόρτιση της μηχανής έχει καθοριστεί:

$$\bar{B} = 0.7 T$$

Αντίστοιχα η ειδική ηλεκτρική φόρτιση υπολογίζεται ως εξής:

$$a_c = \frac{3 * N_s * P * I_N}{\pi * D} = 74802 A \varepsilon / m \quad (3-18)$$

3.2.4 Προσδιορισμός αριθμού αυλάκων

Στον Πίνακα 3-1 παρουσιάζονται οι συντελεστές τυλίγματος, για συγκεντρωμένο τύλιγμα κλασματικού βήματος διπλής στρώσης, και για διάφορους συνδυασμούς πόλων και αυλάκων, ενώ τονίζονται και οι μη αποδεκτοί συνδυασμοί [14].

$Q_s \setminus p$	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
6	0.866		0.866	0.5		0.5	0.866		0.866	0.5		0.5	0.866		0.866	0.5		0.5	0.866
9	0.617	0.866	0.945	0.945	0.866	0.617	0.328		0.328	0.617	0.866	0.945	0.945	0.866	0.617	0.328		0.328	0.617
12	$q=1$		0.866	0.933		0.933	0.866								0.866	0.933		0.933	0.866
15			0.621	0.866		0.951	0.951		0.866	0.621								0.621	0.866
18		$q=1$		0.647	0.866	0.902	0.945		0.945	0.902	0.866	0.647							
21					0.866	0.89		0.953	0.953		0.89	0.866							
24			$q=1$			0.76	0.866		0.933	0.95		0.95	0.933		0.866	0.76			
27								0.866	0.877	0.915	0.945	0.954	0.954	0.945	0.915	0.877	0.866		
30				$q=1$					0.866	0.874		0.936	0.951		0.951	0.936		0.874	0.866
33									0.866		0.903	0.928		0.954	0.954		0.928	0.903	
36					$q=1$					0.866	0.867	0.902	0.933	0.945	0.953		0.953	0.945	
39											0.866	0.863		0.918	0.936		0.954	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	

$q=1/2, 1/4$	$q=3/8, 3/10$	$Q_s=21+6k, p=Q_s \pm 1, k=0, 1, 2, \dots$
$q=3/7, 3/11$	$q=5/14, 5/16$	$Q_s=24+6k, p=Q_s \pm 2, k=0, 1, 2, \dots$
$q=2/5, 2/7$	not appropriate	$k w_1 < 0.866$

Πίνακας 3-1 Πίνακας συντελεστών τυλίγματος για διάφορους συνδυασμούς πόλων και αυλάκων

Βάσει του παραπάνω πίνακα και δεδομένου πως έχει ήδη επιλεγεί ο αριθμός των πόλων να είναι $P=10$, οι επιλογές του αριθμού αυλάκων περιορίζονται στις τιμές : 9,12,15. Όμως για 9 αύλακες παρουσιάζεται ασύμμετρη μαγνητική δύναμη. Ενώ για 15 αύλακες έχουμε μειωμένο συντελεστή τυλίγματος. Έτσι επιλέγεται ο αριθμός αυλάκων να είναι:

$$Q_s = 12 \text{ αύλακες}$$

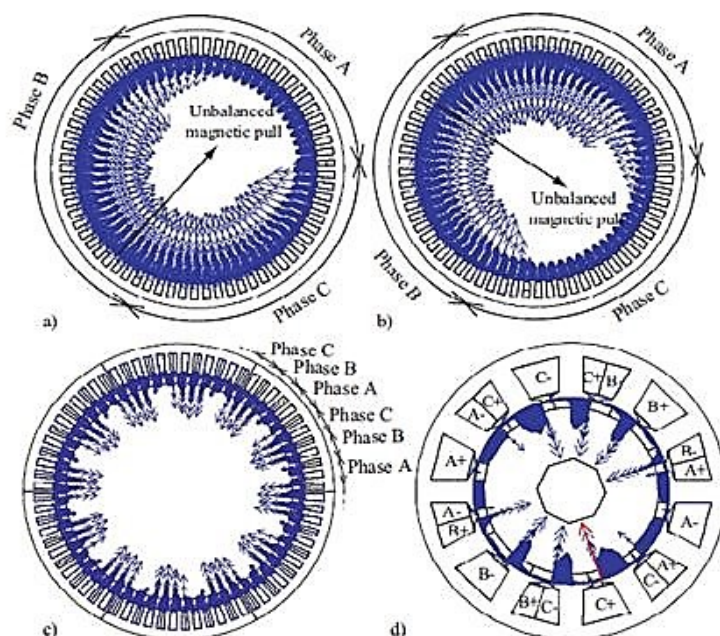
3.2.4.1 Ασύμμετρη κατανομή μαγνητικής δύναμης και μαγνητική έλξη

Σε ορισμένες τοπολογίες μηχανών, εξαιτίας του συνδυασμού πόλων, αυλάκων και αλληλουχίας τυλιγμάτων οι ακτινικές δυνάμεις δεν είναι συμμετρικά κατανεμημένες κατά μήκος του διακένου. Ιδανικά, αν οι ακτινικές δυνάμεις ήταν συμμετρικά κατανεμημένες δεν θα υφίσταντο συνισταμένη δύναμη. Όμως, εξαιτίας αυτής της ανισοκατανομής προκύπτει μια συνισταμένη ελκτική δύναμη, που είναι υπεύθυνη για την παραγωγή θορύβου και δονήσεων. Οι δονήσεις είναι υπεύθυνες για κοπωτικά φαινόμενα στους άξονες και τις εδράσεις, που οδηγούν σε πρόωρη φθορά και συνεπώς είναι ανεπιθύμητες. Επιπλέον, λόγω της ανισοκατανομής, οι μηχανές αυτές δεν είναι κατάλληλες για υλοποίηση μηχανών που στρέφονται και προς τις δύο φορές. Αν και ανεπιθύμητη, συχνά εμφανίζονται εφαρμογές με τέτοιες τοπολογίες, καθώς δύνανται να έχουν αυξημένο συντελεστή τυλίγματος και να οδηγήσουν σε ιδιαίτερα αποδοτικές μηχανές που στρέφονται μόνο προς τη μια φορά περιστροφής. Η δύναμη αυτή υπολογίζεται από την κάθετη και εφαπτομενική συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση [15] [20]:

$$\sigma(\theta, t) = \frac{1}{2\mu_0} (B_n^2(\theta, t) - B_t^2(\theta, t)) \quad (3-19)$$

Όπου σ είναι η ακτινική μαγνητική δύναμη συναρτήσει της γωνίας θ τη χρονική στιγμή t ενώ B_n και B_t η ακτινική και εφαπτομενική συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής

διακένου αντίστοιχα. Λόγω των παραπάνω κρίνεται σκόπιμο σε γενικές εφαρμογές να προτιμούνται τοπολογίες που δεν εμφανίζουν ασύμμετρη μαγνητική έλξη. Παραδείγματα εφαρμογών ασύμμετρης και συμμετρικής μαγνητικής έλξης παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-1:



Σχήμα 3-1 Παραδείγματα συμμετρικής και ασύμμετρης έλξης

Αναλυτικότερα για το Σχήμα 3-1, οι μαγνητικές δυνάμεις έχουν προκύψει από ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων σε μία μηχανή μόνιμου μαγνήτη με 68 πόλους και 69 αύλακες. Στο a) και στο b) ελλείπει συμμετρία των αναπτυσσόμενων δυνάμεων, αναπτύσσεται μαγνητική έλξη, με την διεύθυνση της συνισταμένης να ορίζεται σε κάθε σχήμα. Στο Σχήμα 3.2 c) αναπαρίσταται μηχανή με 60 πόλους και 72 αύλακες. Το τύλιγμα της παρουσιάζει συμμετρία στο ένα έκτο της μηχανής. Κατ' αυτό τον τρόπο, η συνισταμένη δύναμη μηδενίζεται, με αποτέλεσμα να μην έχουμε ανεπιθύμητες δονήσεις. Η μηχανή 3.2 d) έχει το ίδιο τύλιγμα ($q = 2/5$) αλλά 10 πόλους, και εμφανίζοντας συμμετρία κατά το ένα δεύτερο, επίσης δεν προκαλεί μαγνητική έλξη. Βλέπουμε λοιπόν ήδη πως η σχέση πόλων αυλάκων φαίνεται να καθορίζει την εμφάνιση ή όχι ασύμμετρης μαγνητικής κατανομής.

Πράγματι, τυλίγματα με περιττό αριθμό αυλάκων $Q_s = 9 + 6k$, όπου $k = 0,1,2 \dots$ ή $P = Q_s \pm 1$ δεν προτείνονται λόγω προκαλούμενου μαγνητικού θορύβου [15] [29].

Αναφέρουμε, σε αυτό το σημείο, πως ο επιλεγμένος συνδυασμός πόλων αυλάκων που επιλέχθηκε ($Q_s = 12, P = 10$), δεν εμπίπτει σε κάποια από τις παραπάνω περιπτώσεις σε αντίθεση με τις εναλλακτικές που είχαμε και ανήκαν και οι δύο και γι' αυτό απορρίφθηκαν. Συνεπώς, δεν αναμένεται να εμφανιστεί ασύμμετρη μαγνητική δύναμη στον κινητήρα λόγω επιλογής πόλου και αυλάκων.

3.2.5 Τύλιγμα κινητήρα, αλληλουχία φάσεων

Ακολούθως εξηγείται η διαδικασία τοποθέτησης των πηνίων των τριών φάσεων στις αύλακες για τον επιλεγθέντα συνδυασμό αυλάκων πόλων. Τα βασικά βήματα είναι τα ακόλουθα:

- Ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση αναλύεται σε κλάσμα που δεν επιδέχεται περαιτέρω απλοποίηση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπου $Q_s = 12$ και $P = 10$, είναι:

$$q = \frac{Q_s}{3 \cdot P} = \frac{n}{d} = \frac{12}{30} = \frac{2}{5} \quad (3-20)$$

- Βρίσκεται στη συνέχεια μία ακολουθία από $d-n=3$ μηδενικά και $n=2$ άσσους, στην οποία οι άσσοι κατανέμονται όσο πιο ομοιόμορφα δύναται.
- Η προκύπτουσα ακολουθία επαναλαμβάνεται $\frac{3P}{d} = \frac{3 \cdot 10}{5} = 6$ φορές. Στη συνέχεια αντιστοιχίζεται με την αλληλουχία του διανεμημένου τυλίγματος με $3P = 30$ αύλακες και $q = 1$ (1 αύλακα ανά πόλο και ανά φάση).
- Οι αγωγοί του διανεμημένου τυλίγματος που αντιστοιχούν στους άσσους σχηματίζουν τη μία στρώση του τυλίγματος. Η δεύτερη στρώση προκύπτει με την επιστροφή του αγωγού απ' την άλλη πλευρά του δοντιού, δηλαδή στο επόμενο αυλάκι.
- Τέλος γράφεται ένα διάνυσμα S που περιγράφει το τύλιγμα της φάσης A . Γι' αυτό, οι αύλακες αριθμούνται από το 1 έως το 12. Εάν και οι δύο στρώσεις μιας αύλακας περιέχουν αγωγούς της φάσης A , ο αριθμός της αύλακας αυτής γράφεται δύο φορές στο διάνυσμα. Έτσι, το διάνυσμα S έχει $\frac{2}{3} \cdot Q_s = 8$ στοιχεία. Για τους αγωγούς επιστροφής της φάσης A τοποθετείται ένα «-» στον

αριθμό του αντίστοιχου αυλακιού. Σημειώνεται ότι απ' αυτό το διάνυσμα υπολογίζεται ο συντελεστής του τυλίγματος, k_w .

Εφαρμόζοντας αυτή τη διαδικασία προκύπτει η ακολουθία 10100, που επαναλαμβάνεται 6 φορές:

1 0 1 0 0 | 1 0 1 0 0 | 1 0 1 0 0 | 1 0 1 0 0 | 1 0 1 0 0 | 1 0 1 0 0 |

AC'BA'CB'AC'BA'CB'AC'BA'CB'AC'BA'CB'AC'BA'CB'...

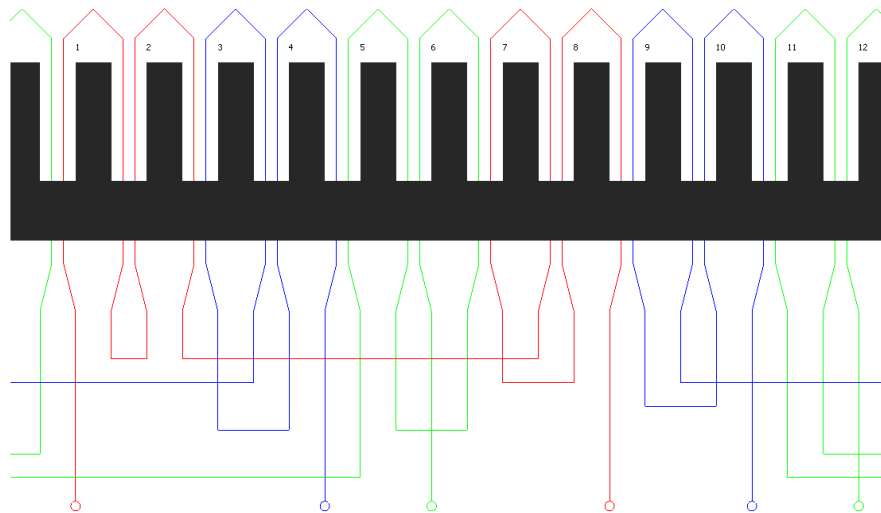
AA|A'B|B'B'|BC'|CC|C'A|A'A'|AB'|BB|B'C|C'C'|CA'|...

Slot number: 1|2|3|4|5|6|7|8|9|10|11|12

Έτσι προκύπτει το διάνυσμα S

$S=[1 \ -2 \ -2 \ 3 \ -7 \ 8 \ 8 \ -9]$ όπου S το διάνυσμα περιγραφής της φάσης A, ξεκινώντας την αρίθμηση των αυλάκων από την πρώτη στρώση που περιέχει το τύλιγμα της φάσης A.

Παρατίθεται το βροχοτύλιγμα που προέκυψε στο Σχήμα 3-2:



Σχήμα 3-2 Βροχοτύλιγμα

Όπως προκύπτει απ' την κατανομή των πηνίων στις αύλακες της μηχανής, υπάρχει αντιπεριοδικότητα ανά 6 αυλάκια (5 πόλους). Βάσει αυτής της συμμετρίας δύναται να γίνει ανάλυση μέσω πεπερασμένων στοιχείων προσομοιώνοντας μόνο τη μισή γεωμετρία. Αυτό οφείλεται στα εξής [14] [15]:

- Ο μέγιστος κοινός διαιρέτης του αριθμού των αυλάκων και των πόλων, εκφράζει τον αριθμό των συμμετριών που υπάρχουν στη μηχανή.

$$X = GCD(Q_S, P) \quad (3-21)$$

Εν προκειμένω

$$X = GCD(12,10) = 2$$

Συνεπώς η μηχανή εμφανίζει δύο συμμετρικά τμήματα

- Στη συνέχεια διαιρώντας τον αριθμό των πόλων P και των αυλάκων Q_S , με το X προκύπτει ο αριθμός των αυλάκων και των πόλων που απαρτίζουν το κάθε συμμετρικό κομμάτι. Έτσι έχουμε:

$$P' = \frac{P}{X} = 5 \text{ πόλοι} \quad (3-22)$$

Και

$$Q_S' = \frac{Q_S}{X} = 6 \text{ αύλακες} \quad (3-23)$$

Έτσι λοιπόν, κάθε συμμετρικό κομμάτι της μηχανής αποτελείται από 5 πόλους και 6 αύλακες.

3.2.6 Διατομή αύλακας

Για το επιλεγθέν συγκεντρωμένο τύλιγμα, κλασματικού βήματος, διπλής στρώσης, δεδομένου ότι $N_S = 8$ σπείρες/φάση, ο αριθμός σπειρών ανά αύλακα θα' ναι:

$$n_c = \frac{m \cdot N_S}{Q_S} = 2 \text{ σπείρες/αύλακα} \quad (3-24)$$

Η ενεργός διατομή αύλακας για πυκνότητα ρεύματος $J=6\text{A/καρέ}$ είναι:

$$A_{Cu} = \frac{n_c \cdot I_N}{J} = \frac{2 \cdot 173.31}{6} = 57.77 \text{ mm}^2 \quad (3-25)$$

Λαμβάνοντας συντελεστή πληρότητας χαλκού, $ff = 0.5$, στην αύλακα, η τελική απαιτούμενη επιφάνεια αύλακας προκύπτει:

$$A_{slot} = \frac{A_{Cu}}{ff} = 115.54 \text{ mm}^2 \quad (3-26)$$

3.2.7 Προσδιορισμός δρομέα και μαγνητών

Στη συνέχεια γίνεται μία αρχική εκτίμηση της γεωμετρίας και διαστασιολόγησης των μόνιμων μαγνητών, πιο συγκεκριμένα εκτιμάται το ακτινικό μήκος των μαγνητών, καθώς και το εύρος των επί του πολικού βήματος.

Στην περίπτωση επιφανειακού μόνιμου μαγνήτη, θεωρώντας σταθερή τη ΜΕΔ κατά μήκος του διακένου που αντιστοιχεί στον μαγνήτη, ισχύει:

$$B_g = B_r \frac{L_m}{L_m + L_g} \quad (3-27)$$

Όπου B_g , η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο, B_r , η παραμένουσα μαγνήτιση, L_m το πάχος του μαγνήτη και τέλος L_g το μήκος διακένου.

Η πυκνότητα μαγνητικής ροής στο διάκενο όταν η μηχανή βρίσκεται υπό φορτίο έχει θεωρηθεί 0.7T, οπότε εν κενώ θεωρείται ελαφρώς αυξημένη, $B_g = 1 T$ καθώς υπό φορτίο θα έχουμε πτώση της μαγνητικής ροής. Σε κάθε περίπτωση, η θεωρούμενη πυκνότητα μαγνητικής ροής διακένου εν κενώ, είναι ένα υψηλό ποσοστό της παραμένουσας μαγνήτισης, καθώς $B_r = 1.29 T$ όπως θα δείξουμε στη συνέχεια, και $L_g = 1mm$. Συνεπώς, το ακτινικό μήκος του μαγνήτη υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\frac{L_m}{L_m + L_g} = 0.7752 \Rightarrow L_m = 3.5mm \quad (3-28)$$

Η μαγνητική ροή στο διάκενο έχει υπολογιστεί $\Phi = 3.11 mWb$. Για την παραγωγή αυτής της μαγνητικής ροής σε κενό φορτίο, το απαιτούμενο περιφερειακό μήκος μαγνήτη εκτιμάται από την σχέση, με L το ενεργό μήκος της μηχανής:

$$L_{magnet} = \frac{\Phi}{B_g * L} = 0.03m \quad (3-29)$$

Έτσι καθώς η ακτίνα του δρομέα δίνεται από την σχέση:

$$R_r = \frac{D - L_g}{2} - L_m = 84.5mm \quad (3-30)$$

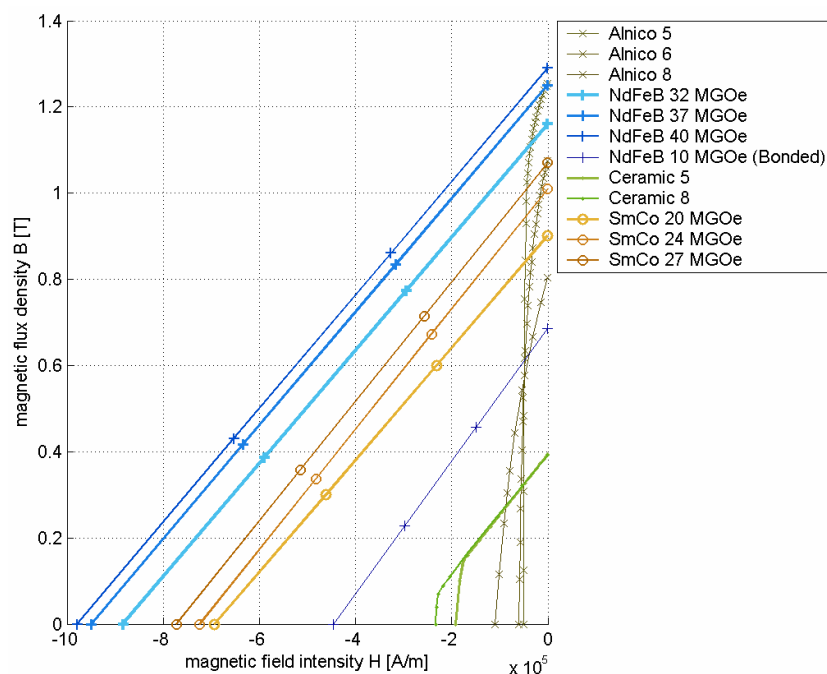
Ενώ το τόξο του μαγνήτη σε μοίρες εκφράζεται από την σχέση:

$$\theta_{magnet} = \frac{L_{magnet}}{R_r} \frac{180}{\pi} = 20.3^\circ \quad (3-31)$$

Το πλάτος μαγνήτη αντιστοιχεί σε 57% του πολικού βήματος.

3.2.8 Καμπύλη απομαγνήτισης

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή επιλέχθηκαν μαγνήτες Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου(NdFeB), λόγω της υψηλής πυκνότητας ενέργειας. Η καλή αξιοποίηση του μαγνήτη επιτυγχάνεται με τη λειτουργία του σε περιοχή της καμπύλης απομαγνήτισης κοντά στο σημείο μέγιστης μαγνητικής ενέργειας. Στο Σχήμα 3-3 δίνονται οι καμπύλες απομαγνήτισης για διάφορους μαγνήτες, ανάμεσα στους οποίους και ο NdFeB40, η οποία είναι σχεδόν ευθεία γραμμή. Έτσι, γνωρίζοντας την παραμένουσα μαγνήτιση B_r και το μαγνητικό πεδίο επαναφοράς H_C , εύκολα υπολογίζεται το σημείο μέγιστης ενέργειας που δεν είναι άλλο από το σημείο με το μέγιστο γινόμενο $(BH)_{max}$.



Σχήμα 3-3 Καμπύλες απομαγνήτισης διάφορων μαγνητών

Επίσης δίνονται τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του μαγνήτη στον ακόλουθο πίνακα:

Τύπος μαγνήτη	Παραμένουσα μαγνήτιση, B_r [T]	Πεδίο επαναφοράς H_C [A/m]	Επιτρεπτότητα μ	Ηλεκτρική αγωγιμότητα σ [MS]
NdFeB 40	1.29	979000	1.049	0.667

Πίνακας 3-2 Χαρακτηριστικά μαγνήτη NdFeB 40

Ο μαγνήτης δίνει τη μέγιστη μαγνητική ενέργεια στο σημείο $B_{nom} = 0.645 T$, $H_{nom} = 489.5 kA/m$, όπως προέκυψε από την καμπύλη απομαγνήτισής του.

Στη συνέχεια, εξετάζεται η επίδραση του μαγνητικού πεδίου του στάτη στην μαγνητική επαγωγή του μαγνήτη. Η χαρακτηριστική εξίσωση της καμπύλης απομαγνήτισης δίνεται από τον τύπο:

$$H(B) = H_c - \frac{H_c}{B_r} B \quad (3-32)$$

Με $B_r = 1.29 T$ και $H_c = 979000 A/m$ όπως αυτά δίνονται στον παραπάνω πίνακα:

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση του κινητήρα όπως έχει ήδη υπολογιστεί είναι:

$$ac = 74802 Aε/m$$

Με βάση αυτά τα μεγέθη, είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε την πτώση της μαγνητικής επαγωγής όταν ο κινητήρας βρίσκεται υπό φορτίο. Αυτή η εκτίμηση πραγματοποιείται με την βοήθεια του διαφορικού της μαγνητικής επαγωγής όπως προκύπτει από την σχέση (προηγούμενη σχέση):

$$\Delta B = \frac{B_r}{H_c} * ac = 0.093 T \quad (3-33)$$

Συνεπώς, εκτιμάται πως ακόμα και υπό φορτίο ο κινητήρας θα χρησιμοποιείται κοντά στο σημείο μέγιστης ενέργειας.

Κεφάλαιο 4ο. Παραμετροποιημένη σχεδίαση και ανάλυση ηλεκτρικού κινητήρα

Ένα πολύ σημαντικό κομμάτι της συγκεκριμένης εφαρμογής αφορά την παραμετροποιημένη σχεδίαση του κινητήρα, καθώς και την αυτοματοποιημένη επεξεργασία και μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων. Η σημασία της είναι θεμελιώδης καθώς η διαδικασία της βελτιστοποίησης βασίζεται στα αποτελέσματα που πηγάζουν από την παραμετροποιημένη σχεδίαση και επεξεργασία, μέσω προγράμματος ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA- Finite Element Analysis). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της διεπαφής MATLAB-FEMM και της ανάπτυξης κατάλληλων ρουτίνων.

4.1 Πεδιακή ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία

Η προκαταρκτική σχεδίαση μίας ηλεκτρικής μηχανής δίνει μία βασική προσέγγιση της απαιτούμενης τοπολογίας και μια αρχική διαστασιολόγηση. Όμως, η πεδιακή ανάλυση παρέχει λεπτομερή ανάλυση του μαγνητικού πεδίου, οδηγώντας στην επιβεβαίωση (ή και απόρριψη) των αναμένων χαρακτηριστικών του κινητήρα, καθώς και στην διαπίστωση της ανάγκης να μεταβληθούν κάποιοι παράμετροι ή χαρακτηριστικά. Η πεδιακή ανάλυση παρέχει την κατανομή του μαγνητικού πεδίου και στη συνέχεια, με κατάλληλη μετ-επεξεργασία, μπορούν να υπολογιστούν με υψηλή ακρίβεια μεγέθη όπως δύναμη (σε κάθε συνιστώσα), ροπή, πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος, μαγνητική επαγωγή, απώλειες, όπως και να εντοπιστούν περιοχές πυρήνα που βρίσκονται σε κορεσμό. Εξαιτίας της σημασίας που έχει η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στην παρούσα εργασία, θα αναφερθούμε αρχικά στη θεωρία που την διέπει.

4.1.1 Μαγνητοστατικά προβλήματα

Ως γνωστόν τα ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα διέπονται από τις τέσσερις εξισώσεις του Maxwell. Αυτές είναι:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \text{ (Νόμος του Faraday)} \quad (4-1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \text{ (Νόμος του Ampere)} \quad (4-2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \text{ (νόμος του Gauss)} \quad (4-3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \text{ (νόμος του Gauss)} \quad (4-4)$$

Το πρόγραμμα FEMM επιλύει ένα πλήθος προβλημάτων (ηλεκτρικά, μαγνητικά, θερμικά κοκ) και όπως τα περισσότερα προγράμματα στόχος του είναι η απλοποίηση των παραπάνω εξισώσεων. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στα μαγνητοστατικά που αποτελούν το κύριο εργαλείο ανάλυσης των ηλεκτρικών κινητήρων. Μαγνητοστατικά ονομάζονται τα προβλήματα στα οποία το μαγνητικό πεδίο είναι αμετάβλητο στο χρόνο. Σε αυτή την περίπτωση, η ένταση του μαγνητικού πεδίου H και η μαγνητική επαγωγή B ικανοποιούν τις ακόλουθες σχέσεις:

Από τον νόμο του Ampere ισχύει πως:

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

Ομως $\frac{\partial D}{\partial t} \approx 0$ για συχνότητες πολύ χαμηλότερες από ραδιοσυχνότητες και συνεπώς

$$\nabla \times H = J$$

και από τον νόμο του Gauss έχουμε πως:

$$\nabla \cdot B = 0$$

Ικανοποιείται επίσης η θεμελιώδης καταστατική σχέση μεταξύ των μεγεθών B και H για κάθε υλικό:

$$B = \mu \cdot H \quad (4-5)$$

Αν το υλικό είναι μη γραμμικό, όπως για παράδειγμα κορεσμένος σίδηρος ή μαγνήτες αλνίκο, τότε η επιτρεπτότητα, μ , είναι στην πραγματικότητα μία συνάρτηση του B :

$$\mu(B) = \frac{B}{H(B)} \quad (4-6)$$

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

$$B = \nabla \times A \quad (4-7)$$

Αυτός ο ορισμός του B ικανοποιεί πάντα τη Σχέση 2.18. Τότε, η Σχέση 2.17 διατυπώνεται ως εξής:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = J \quad (4-8)$$

Κατά αυτόν τον τρόπο έχουμε ελαττώσει την ανάλυση του προβλήματος από τις τέσσερις συζευγμένες εξισώσεις του Maxwell στην παραπάνω, μία μερική διαφορική εξίσωση.

Για ένα γραμμικό ιστροπικό μέσο (υπό την παραδοχή πως $\nabla \cdot A = 0$), προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J \quad (4-9)$$

Ως γνωστόν τα μεγέθη H, D, B, A, J είναι διανυσματικά και έτσι αποτελούνται στον τρισδιάστατο χώρο από τρεις συνιστώσες. Όμως αρκετές απλοποιήσεις μπορούν να λάβουν χώρα στις ηλεκτρικές μηχανές. Έτσι αν και στη γενική περίπτωση, το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό είναι ένα διάνυσμα τριών συνιστωσών, στις εφαρμογές των ηλεκτρικών μηχανών, οι δύο από τις τρεις συνιστώσες είναι μηδέν και μεταβάλλεται μόνο η κατακόρυφη συνιστώσα. Συνεπώς

$$A = A_z \vec{l}_z \quad (4-10)$$

Το ίδιο ισχύει και για την πυκνότητα ρεύματος J :

$$J = J_z \vec{l}_z \quad (4-11)$$

Ενώ για την πυκνότητα μαγνητικής ροής η ανάλυση περιορίζεται στις δύο διαστάσεις και εν προκειμένω:

$$B = B_x \vec{l}_x + B_y \vec{l}_y \quad (4-12)$$

Το πλεονέκτημα της χρήσης του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού, είναι όπως προείπαμε, ότι όλες οι συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται στο μαγνητοστατικό πεδίο συνδυάζονται σε μία εξίσωση. Εάν είναι γνωστό το A , τα B και H προκύπτουν από διαφορίση του A , κάτι που οι υπολογιστές δύνανται να εκτελούν με μεγάλη ταχύτητα.

Στην παραπάνω ανάλυση δεν έχουν ληφθεί υπόψιν τα δινορρεύματα. Σε περίπτωση ύπαρξης μαγνητικού πεδίου αρμονικά μεταβαλλόμενου, όπως εξηγήσαμε και προηγουμένως, επάγονται δινορρεύματα. Σε υλικά με υψηλή αγωγιμότητα, αυτά θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν. Με παρόμοια διαδικασία ξεκινώντας και πάλι από τις εξισώσεις του Maxwell προκύπτει πως περιοχές που επάγονται δινορρεύματα διέπονται από την ακόλουθη μερική διαφορική εξίσωση:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (4-13)$$

Συνοψίζοντας, το FEMM επιλύει τις ακόλουθες εξισώσεις για την εύρεση του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού A [24], [31], [32]:

Σε περιοχές με δοσμένη πυκνότητα ρεύματος, όπως οι αύλακες υπολογίζει το A μέσω της:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A_z \right) = J_z \quad (4-14)$$

Αν δεν αμεληθούν τα δινορρεύματα τότε στις περιοχές που δύναται να επαχθούν το A υπολογίζεται από την σχέση:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A_z \right) + \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} = 0 \quad (4-15)$$

Το μαγνητικό πεδίο υπολογίζεται κατόπιν από τη σχέση $B = \nabla \times A$ που με βάση τα προηγούμενα γράφεται:

$$B = \frac{\partial A_z}{\partial y} \vec{t}_x - \frac{\partial A_z}{\partial x} \vec{t}_y \quad (4-16)$$

Και τέλος το H υπολογίζεται από την καταστατική σχέση

$$H = \frac{B}{\mu(B)} \quad (4-17)$$

4.1.2 Οριακές συνθήκες

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

- Dirichlet: Σε αυτό τον τύπο οριακής συνθήκης, η τιμή του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού A δηλώνεται πάνω στο όριο. Αν $A = 0$ τότε πρόκειται για την ομογενή συνθήκη Dirichlet, διαφορετικά πρόκειται για την μη ομογενή. Η συνθήκη $A = 0$ απαντάται συχνά σε προβλήματα ηλεκτρικών μηχανών. Η φυσική σημασία της δήλωσης $A = 0$ κατά μήκος ενός ορίου της γεωμετρίας σε ένα μαγνητικό πρόβλημα, είναι πως η μαγνητική ροή περιορίζεται εντός των ορίων της μηχανής, ενώ οι γραμμές της μαγνητικής ροής θα είναι παράλληλες προς το σύνορο αυτό. Σε περιπτώσεις όπου μοντελοποιείται ολόκληρη η μηχανή, η χρήση μόνο αυτής της οριακής συνθήκης είναι επαρκής
- Neumann: Η οριακή αυτή συνθήκη ορίζει την κάθετη παράγωγο του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού κατά μήκος του ορίου. Η συνηθέστερη περίπτωση είναι η χρήση της ομογενούς συνθήκης Neumann δηλαδή $\frac{\partial A}{\partial n} = 0$. Συνήθως χρησιμοποιείται στα μαγνητικά προβλήματα σε περιπτώσεις διεπιφάνειας με υλικό πολύ μεγάλης επιτρεπτότητας. Η χρήση αυτής τη συνθήκης επιβάλλει στις μαγνητικές γραμμές να τέμνουν το σύνορο κάθετα.
- Robin: Η οριακή συνθήκη Robin είναι ένα είδος συνδυασμού των συνθηκών Dirichlet και Neumann, καθώς καθορίζει μια σχέση μεταξύ της των σταθμισμένων τιμών του A και της παραγώγου του. Ένα παράδειγμα τέτοιας οριακής συνθήκης είναι:

$$\frac{\partial A}{\partial n} + c * A = 0$$

Αυτή η οριακή συνθήκη χρησιμοποιείται συχνά προβλήματα διάδοσης

θερμότητας ως οριακή συνθήκη σε μονωτικές επιφάνειες.

- Περιοδική: Μία περιοδική οριακή συνθήκη συνδέει δύο όρια. Σε αυτό τον τύπο οριακής συνθήκης, οι οριακές τιμές στα αντίστοιχα σημεία των δύο ορίων είναι ίσες.

$$A(r, \varphi) = A\left(r, \varphi + \frac{2k\pi}{p}\right) \quad k = 1, 2, \dots, \frac{p}{2} \quad (4-18)$$

- Αντιπεριοδική: Μια αντιπεριοδική οριακή συνθήκη συνδέει επίσης δύο όρια μεταξύ τους, αλλά σε αυτή την περίπτωση τα αντίστοιχα σύνορα έχουν ίσα μέτρα αλλά αντίθετο πρόσημο.

$$A(r, \varphi) = -A\left(r, \varphi + \frac{(2k-1)\pi}{p}\right) \quad k = 1, 2, \dots, \frac{p}{2} \quad (4-19)$$

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

4.1.3 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Μολονότι η περιγραφή ενός μαγνητικού προβλήματος μπορεί να εκφραστεί υπό τη μορφή μίας μερικής διαφορικής εξίσωσης με καλώς τοποθετημένες οριακές συνθήκες (δηλαδή ενός προβλήματος οριακών συνθηκών), ωστόσο η εύρεση μιας αναλυτικής λύσης είναι στις περισσότερες περιπτώσεις δύσκολη ή αδύνατη, με την εξαίρεση προβλημάτων πολύ απλής γεωμετρίας. Προκειμένου να ξεπεραστεί αυτή η δυσκολία αναπτύχθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, το αρχικό πρόβλημα και η αρχική περιοχή χωρίζονται σε έναν μεγάλο αριθμό περιοχών και αντίστοιχων υποπροβλημάτων. Η θεμελιώδης απλοποίηση, έγκειται στο γεγονός πως στα υποπροβλήματα που δημιουργούνται η επίλυση είναι απλή. Κατ' επέκταση αν η αρχική περιοχή «τεμαχιστεί» σε επαρκή αριθμό τέτοιων υποπεριοχών, το υπολογιζόμενο μέγεθος προσεγγίζει αρκετά καλά την πραγματική του τιμή. Υπολογιστικά, το πλεονέκτημα της κατάτμησης της περιοχής του αρχικού προβλήματος σε έναν μεγάλο αριθμό μικρότερων περιοχών, είναι πως το αρχικό πρόβλημα μετασχηματίζεται από ένα, αλλά δύσκολο (ή και αδύνατο) στην επίλυση πρόβλημα, σε πολλά αλλά υπολογιστικά ταχύτατα στην επίλυση προβλήματα. Τελικώς το πρόβλημα, ανάγεται σε ένα πρόβλημα γραμμικής άλγεβρας με χιλιάδες αγνώστων

σε μορφή πινάκων. Οι πίνακες είναι συνήθως αραιοί και συμμετρικοί και έτσι με χρήση υπολογιστικών αλγόριθμων που έχουν αναπτυχθεί και αναπτύσσονται είναι δυνατή η επίλυσή του σε σύντομο χρόνο.

4.1.4 Το πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων FEMM

Το λογισμικό ανοικτού κώδικα FEMM ανήκει στην κατηγορία των προγραμμάτων επίλυσης ηλεκτρομαγνητικών και θερμικών προβλημάτων με χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Δύναται να επιλύει δισδιάστατα και μαγνητοστατικά προβλήματα, καθώς επίσης και αρμονικά προβλήματα όπου τα μεγέθη μεταβάλλονται με μια συγκεκριμένη συχνότητα. Ειδικότερα, το πρόγραμμα διακριτοποιεί την περιοχή του προβλήματος χρησιμοποιώντας τριγωνικά στοιχεία καθώς πρόκειται για δισδιάστατο πρόβλημα. Κάθε στοιχείο, απαρτίζεται από αντίστοιχους κόμβους και από τους κόμβους δημιουργείται το αποκαλούμενο πλέγμα. Κάθε κόμβος χαρακτηρίζεται από μια τιμή του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού A , ενώ για τις περιοχές που βρίσκονται ανάμεσα στους κόμβους χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή. Το πρόβλημα ανάγεται πλέον στην επίλυση ενός προβλήματος γραμμικής άλγεβρας, αραιού πίνακα που λύνεται με επαναληπτικές μεθόδους. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι η Newton-Raphson καθώς είναι ταχεία στην σύγκλιση και στην ικανότητα σύγκλισης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ελαχιστοποιηθεί το μέτρο του σφάλματος σε μια καθορισμένη τιμή.

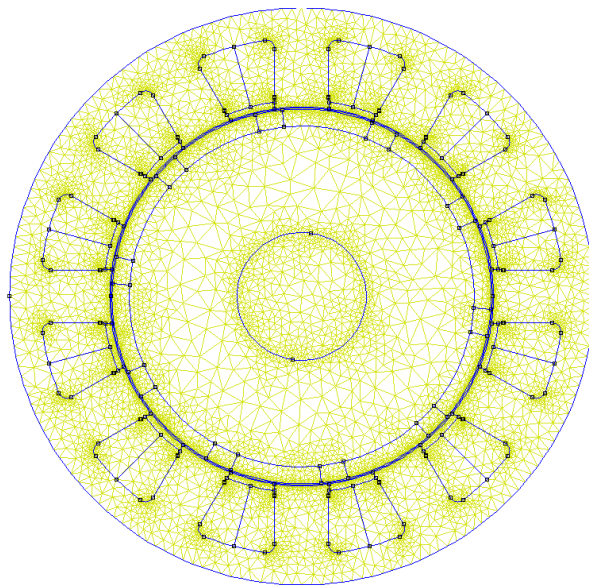
Συνοπτικά, η διαδικασία επίλυσης ενός μαγνητικού προβλήματος από το FEMM έχει τα παρακάτω στάδια:

1. Σχεδίαση της γεωμετρίας, ορισμός των οριακών και περιοδικών συνθηκών και των υλικών.
2. Πλεγματοποίηση του προβλήματος με επιθυμητό αριθμό τριγωνικών στοιχείων, αντίκειται σε θέματα πεπερασμένης ακρίβειας ή άλλων υπολογιστικών περιορισμών.
3. Επίλυση του προβλήματος γραμμικής άλγεβρας και εύρεση του διανυσματικού δυναμικού.
4. Απεικόνιση και επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

4.2 Σχεδίαση γεωμετρίας

Έχοντας εξηγήσει την λειτουργία των πεπερασμένων στοιχείων, το επόμενο βήμα σε αφορά την σχεδίαση της γεωμετρίας του κινητήρα. Σε αυτή την εργασία, έχει γίνει προσομοίωση ολόκληρου του κινητήρα και όχι μόνο του μισού όπως δείξαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο πως ήταν δυνατόν να συμβεί.

Η γεωμετρία του κινητήρα, δεδομένου πως απαρτίζεται από επαναλαμβανόμενα μοτίβο, ανάγεται τελικά στη γνώση και καθορισμό ορισμένων μεγεθών. Ακόμα και σε περιπτώσεις ασύμμετρων σχεδιασμών, δύναται με εισαγωγή κατάλληλων συντελεστών η σχεδίαση με χρήση των ίδιων βασικών μεγεθών. Στο Σχήμα 4-1 φαίνεται η μορφολογία της επιλεγθείσας τοπολογίας καθώς και το πλέγμα.



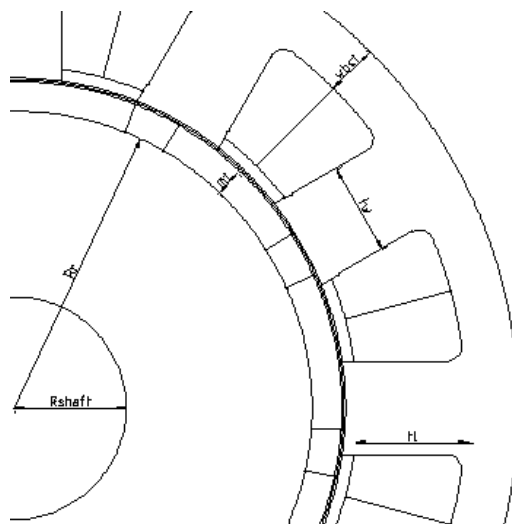
Σχήμα 4-1 Τοπολογία κινητήρα

Έτσι λοιπόν προκειμένου να σχεδιαστεί μια τοπολογία χρειάζονται οι εξής παράμετροι που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4-1 Πίνακας βασικών παραμέτρων σχεδίασης Πίνακας 4-1:

Πίνακας 4-1 Πίνακας βασικών παραμέτρων σχεδίασης

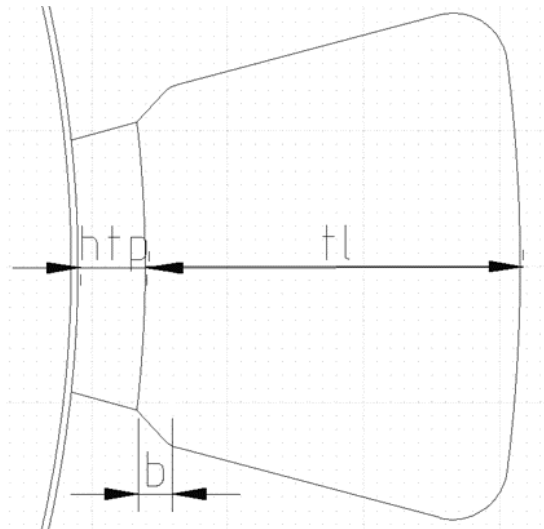
Παράμετρος	Συμβολισμός
Ακτίνα άξονα	R_shaft
Ακτίνα δρομέα	Rr
Πάχος μαγνήτη	Mt
Ποσοστό μαγνήτη επί πολικού βήματος	DCM
Μήκος διακένου	lg
Ποσοστό δοντιού επί βήματος αύλακας	DCT
Απόσταση πέλδλου δοντιού με σώμα δοντιού	b
Πάχος πέλδλου δοντιού	htp
Πλάτος δοντιού	tw
Ύψος δοντιού	tl
Πάχος σώματος στάτη	Wbst

Καθώς και κάποιες επιπλέον μεταβλητές όπως τυχόντες ακτίνες ακμών, και βοηθητικές γωνίες που χρειάζονται για την ακριβή αναπαράσταση της γεωμετρίας. Κάποια εξ' αυτών φαίνονται παραστατικό στο Σχήμα 4-2.



Σχήμα 4-2 Βασικές διαστάσεις και ορισμός αυτών

Για τον καθορισμό της γεωμετρίας των δοντιών και των αυλάκων θα γίνει εκτενέστερη αναφορά, καθώς στη βελτιστοποίηση, οι μεταβλητές απόφασης αφορούσαν κατά κύριο λόγο την μορφολογία αυλάκων και δοντιών. Έτσι η γεωμετρία της αύλακας και των δοντιών καθορίζεται από τις ακόλουθες μεταβλητές. Πάχος πέλδλου δοντιού, απόσταση μεταξύ πέλδλου και σώματος δοντιού, πάχος και ύψος δοντιού και τέλος ύπαρξη ακτίνας καμπυλότητας στις ακμές των αυλάκων. Τα παραπάνω εμφανίζονται παραστατικά στο Σχήμα 4-3.



Σχήμα 4-3 Διαστασιολόγηση αύλακας και δοντιών

Με βάση τα παραπάνω, είναι δυνατή η μοντελοποίηση πολλών γεωμετριών.

Μετά την σχεδίαση, και πριν την διαδικασία της ανάλυσης παρεμβάλλεται η διαδικασία της πλεγματοποίησης. Η πλεγματοποίηση, αν και γίνεται αυτόματα από το πρόγραμμα, χρίζει ιδιαίτερης αναφοράς καθώς η ακρίβεια των αποτελεσμάτων βασίζεται στην επιτυχημένη πλεγματοποίηση. Η πλεγματοποίηση, αφορά στην κατάτμηση της γεωμετρίας, σε τριγωνικά θεμελιώδη στοιχεία και κόμβους. Όπως, έχουμε ήδη αναφέρει κάθε κόμβος χαρακτηρίζεται από μια τιμή, και κάθε στοιχείο εντός του στοιχείου, έχει τιμή που προκύπτει από γραμμική παρεμβολή, των τιμών των κόμβων που το ορίζουν.

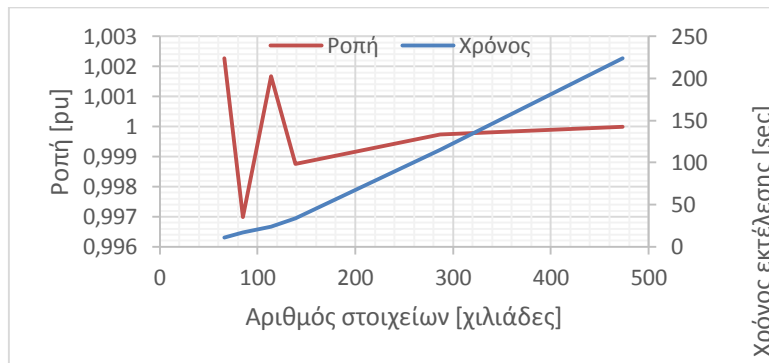
Η πλεγματοποίηση, πέραν της ακρίβειας καθορίζει και το υπολογιστικό κόστος, καθώς ο αριθμός των υπολογισμών είναι άμεσα συνδεδεμένος με τον αριθμό των κόμβων και των στοιχείων. Συνεπώς, καθώς στη βελτιστοποίηση ο περισσότερος υπολογιστικός

χρόνος δαπανάται στην επίλυση και επεξεργασία των πεπερασμένων στοιχείων, είναι θεμελιώδες να βρεθεί η χρυσή τομή ανάμεσα στην ακρίβεια και την ταχύτητα επεξεργασίας. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, καθώς η πυκνότητα του πλέγματος καθορίζεται από τον χρήστη, ακολουθούνται κάποιες πρακτικές καλής μοντελοποίησης.

Ο τρόπος υπολογισμού της ροπής, είναι ένας από τους χαρακτηριστικότερους λόγους που επιβάλλουν την πύκνωση του πλέγματος στις περιοχές που υπολογίζεται η ροπή. Πιο συγκεκριμένα η ροπή προκύπτει από το γινόμενο της ακτινικής και εφαπτομενικής συνιστώσας της ροπής. Οι συνιστώσες με την σειρά τους προκύπτουν από παραγωγή του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού A . Συνεπώς για τον ακριβή υπολογισμό της ροπής, απαιτείται πυκνότερο πλέγμα ώστε να υπολογιστούν με ακρίβεια οι συνιστώσες τις μαγνητικής επαγωγής και κατ' επέκταση η ροπή. Εν τέλει, οδηγούμαστε σε πυκνό πλέγμα στο διάκενο όπου υπολογίζεται η ροπή. Μάλιστα, έχει δειχθεί 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. Γενικά 3-4 στρώσεις δίνουν πολύ καλή ακρίβεια στις περισσότερες εφαρμογές [25].

Επίσης, πυκνότερο πλέγμα χρησιμοποιείται στα δόντια όπου αναμένεται υψηλή μαγνητική επαγωγή, ενώ αντίθετα στον άξονα του δρομέα το πλέγμα μπορεί να αυξηθεί καθώς η μαγνητική επαγωγή θα είναι περιορισμένη. [31]

Βάσει λοιπόν των παραπάνω, αλλά και ανάλυσης ευαισθησίας οδηγούμαστε σε κάποιες επιλογές, όσον αφορά στην πυκνότητα του πλέγματος ώστε να έχουμε την επιθυμητή ακρίβεια αλλά και την επιθυμητή ταχύτητα που θα μας χρειαστεί στη συνέχεια. Στο Σχήμα 4-4 που ακολουθεί, φαίνονται τα αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας της ροπής και του χρόνου σε σχέση με τον αριθμό των στοιχείων.



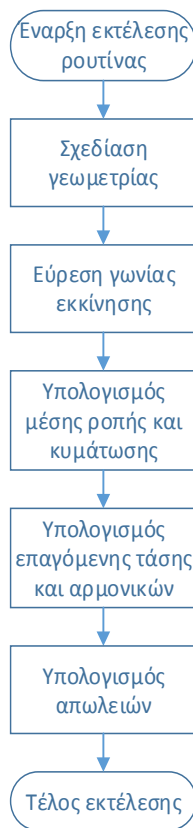
Σχήμα 4-4 Καμπύλες υπολογιστικής ακρίβειας και χρόνου συναρτήσει του αριθμού στοιχείων

Όπως φαίνεται, από το διάγραμμα η τιμή της ροπής ανά μονάδα που στην ουσία πρόκειται για το σφάλμα της ροπής καθώς κανονικοποιήθηκε με βάση την τιμή της ροπής που πήραμε για μέγιστη αριθμό στοιχείων, αυξανόμενου του αριθμού των στοιχείων τείνει να μηδενιστεί και η ροπή να πάρει την ακριβέστερη τιμή. Σε κάθε περίπτωση όμως το σφάλμα κείται σε πολύ μικρές τιμές, μέγιστης τάξης 2-3% που δεδομένου των φαινομένων που έχουν αμεληθεί, μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο. Συνεπώς το βασικό κριτήριο στην επιλογή ήταν αυτό του χρόνου, ο οποίος αυξάνεται με έντονα γραμμικό τρόπο. Τονίζεται εδώ πως ο ελάχιστος αριθμός στοιχείων, δεν είναι ο ελάχιστος δυνατός, αλλά εδώ παρουσιάστηκε η ανάλυση ευαισθησίας για μια περιοχή με ουσιώδες ενδιαφέρον, καθώς για μικρότερο αριθμό υπήρχε πολύ μεγαλύτερο σφάλμα και συνεπώς πρακτικά περιορισμένου ενδιαφέροντος αποτελέσματα.

4.3 Υπολογισμός επίδοσης και απόδοσης μηχανής

Αφού λοιπόν καθορίσαμε, πρώτα τη γεωμετρία και στη συνέχεια το πλέγμα το επόμενο βήμα είναι η επίλυση του προβλήματος και η λήψη των αποτελεσμάτων για εκτίμηση απόδοσης και επίδοσης. Αυτό γίνεται είτε άμεσα από το FEMM, είτε με συνδυασμό αποτελεσμάτων του FEMM και μετ' επεξεργασία στο περιβάλλον του MATLAB.

Η διαδικασία παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα ροής:

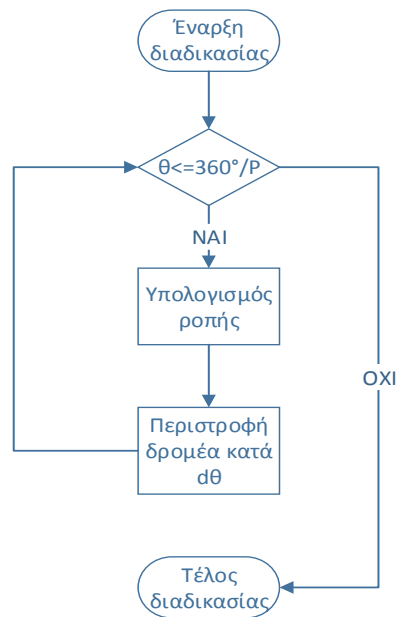


Σχήμα 4-5 Διάγραμμα ροής ρουτίνας MATLAB

4.3.1 Υπολογισμός γωνίας εκκίνησης

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα ροής της ρουτίνας στο Σχήμα 4-5, η πρώτη διαδικασία αφορά την εύρεση της γωνίας εκκίνησης. Ο τρόπος προσδιορισμού της είναι ο ακόλουθος:

Θεωρώντας ένα στιγμιότυπο τριφασικού εναλλασσόμενου ρεύματος, και έστω μέγιστο ρεύμα στη φάση A και επομένως στις φάσεις B, C θα έχουμε μείον το μισό του μέγιστου ρεύματος, στρέφουμε το δρομέα για ένα πολικό βήμα και αναζητούμε σε ποια θέση εμφανίζεται η μέγιστη ροπή. Αυτή η θέση, θεωρείται και η αρχική γωνία του δρομέα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως τα συγκεντρωμένα τυλίγματα εμφανίζουν ακανόνιστα μοτίβο και έτσι δεν είναι εύκολος ο θεωρητικός προσδιορισμός του σημείου συμμετρίας των φάσεων A,B,C και του σημείου μέγιστης ΜΕΔ διακένου. Τέλος σε εφαρμογές με έντονη εκτυπότητα, αναζητείται η γωνία εκκίνησης με αυτόν τον ευριστικό τρόπο. Τα παραπάνω φαίνονται παραστατικά και στο Σχήμα 4-6.



Σχήμα 4-6 Διαδικασία υπολογισμού γωνίας εκκίνησης

4.3.2 Υπολογισμός μέσης ροπής και κυμάτωσης

Επόμενο στάδιο στην επεξεργασία είναι ο υπολογισμός της μέσης ροπής για μια ηλεκτρική περίοδο καθώς και της κυμάτωσης της. Αυτό γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο.

Ξεκινώντας από την γωνία εκκίνησης που προσδιορίστηκε στο προηγούμενο βήμα, στρέφουμε με προκαθορισμένο βήμα τον δρομέα, για 2 πολικά βήματα και υπολογίζουμε σε κάθε βήμα την ροπή. Η κυμάτωση προκύπτει από το ποσοστό της μέγιστης μείον της ελάχιστης ροπής διά την μέση ροπή δηλαδή:

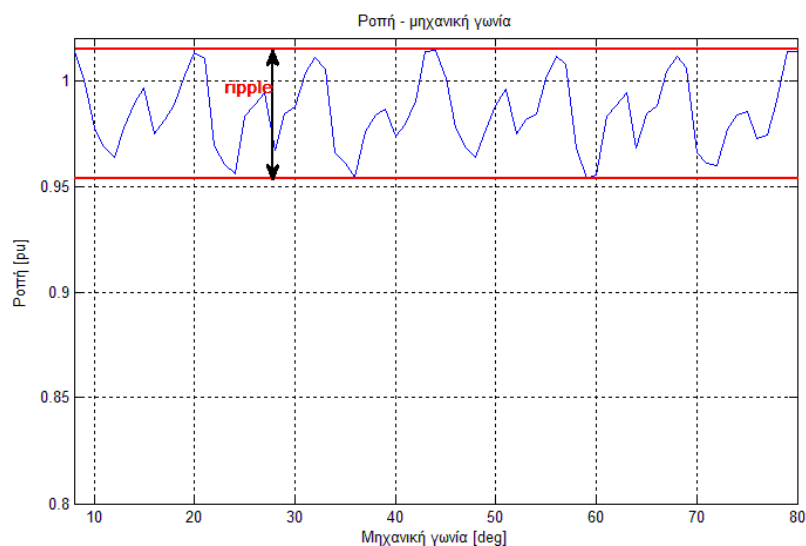
$$ripple = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{mean}} \quad (4-20)$$

Προφανώς, όσο μειώνεται το βήμα της γωνίας, τόσο αυξάνεται η ακρίβεια αλλά και το υπολογιστικό κόστος, και συνεπώς τίθεται εκ νέου μια ανάγκη συμβιβασμού. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε βήμα 1μοίρας.

Αξίζει να αναφερθούμε στις αιτίες κυμάτωσης της ροπής αυτές είναι [15]:

- Η μεταβολή της, φαινόμενης από τους μόνιμους μαγνήτες, μαγνητικής διαπερατότητας, λόγω των αυλάκων. Αυτή είναι και η αίτια της ροπής ευθυγράμμισης (cogging torque).
- Η μεταβολή της μαγνητικής διαπερατότητας λόγω κορεσμού.
- Οι αρμονικές χώρου που οφείλονται στο τύλιγμα και στον συνδυασμό πόλων, αυλάκων.
- Οι αρμονικές χρόνου λόγω του μετατροπέα.
- Σε πραγματικές εφαρμογές κατασκευαστικές ατέλειες, που δημιουργούν ανομοιομορφίες, εκκεντρότητες κοκ.

Παραθέτουμε σχήμα όπου φαίνεται η κυμάτωση ροπής.



Σχήμα 4-7Κυμάτωση ροπής

4.3.3 Υπολογισμός επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης

Ένα από τα βασικά μεγέθη του κινητήρα που χρήζει διερεύνησης, αφορά και την επαγόμενη αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται από τον κινητήρα (αντί-ΗΕΔ). Η επαγόμενη τάση παίζει σημαντικό ρόλο στην ικανότητα οδήγησης του κινητήρα καθώς και στις προδιαγραφές του συστήματος οδήγησης και τούμπαλιν. Επίσης η ποιότητα της επαγόμενης κυματομορφής (αρμονική παραμόρφωση)

διαδραματίζει σημαντικό ρόλο τόσο στην ποιότητα της εξόδου του ίδιου του κινητήρα όσο στην ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος του δικτύου με το οποίο αλληλοεπιδρά ο κινητήρας.

Όσον αφορά στον προσδιορισμό της αυτός γίνεται ως εξής:

Ξεκινώντας, είναι γνωστό πως όταν ένας αγωγίμος βρόχος διαρρέεται από μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή, τότε επάγεται μια τάση στο βρόχο.

Από τον νόμο του Faraday η αναπτυσσόμενη αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη δίνεται από τη σχέση:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (4-21)$$

Όπου N ο αριθμός των σπειρών και Φ η μαγνητική ροή. Το πρόσημο μείον οφείλεται στον κανόνα του Lenz σύμφωνα με τον οποίο το αιτιατό αντιτίθεται στο αίτιο. Συνεπώς 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 πρόσημο αλλά και το πρόθεμα «αντί» στην ηλεκτρεγερτική δύναμη.

Καθώς όμως δεν υφίσταται μια αναλυτική σχέση για την μαγνητική ροή συναρτήσει του χρόνου και συνεπώς για την μεταβολή της μαγνητικής ροής καταφεύγουμε στον ορισμό της παραγώγου, ούτως ώστε να προκύψει μια βολικότερη για την διενέργεια των υπολογισμών μορφή. Έτσι παίρνουμε:

$$e(t) = -N \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\Phi(t+h) - \Phi(t)}{h} \quad (4-22)$$

Η εναλλακτικά

$$e(t) = -N \frac{\Phi(t_2) - \Phi(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (4-23)$$

Όπου t2 και t1 δύο χρονικές στιγμές, που στην εφαρμογή μας καθορίζονται από τη μεταβολή της γωνίας δρομέα και καθώς γνωρίζουμε την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής γνωρίζουμε τελικά και την χρονική διαφορά μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$dt = t_2 - t_1 = \frac{d\theta}{\omega_r} \quad (4-24)$$

Με dθ το βήμα περιστροφής που χρησιμοποιείται στην ανάλυση και ω_r την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.

Ο υπολογισμός της μαγνητικής ροής γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

Με τον δρομέα να βρίσκεται έστω σε θέση k , η μαγνητική ροή που επάγεται στη φάση A είναι:

$$\Phi(k) = \sum_{j \in A} \Phi_j(k) - \sum_{j \in A'} \Phi_j(k) \quad (4-25)$$

Δηλαδή σε κάθε χρονική στιγμή-γωνία δρομέα, 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 των αυλάκων της επιστροφής της φάσης A, A' . Όπου λαμβάνονται με θετικό πρόσημο οι επιμέρους ροές που επάγουν τάση στους αγωγούς των αυλάκων που ανήκουν στη φάση A και με αρνητικό οι αντίστοιχες ροές για τους γειτονικούς αγωγούς επιστροφής A' .

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

$$e = -N \frac{d\Phi(k)}{d\theta} * \omega_r \quad (4-26)$$

Ιδιαίτερης αναφοράς χρήζει η επιλογή του βήματος που για άλλη μια φορά ακρίβεια και υπολογιστικό κόστος αντιτίθενται. Όπως γίνεται προφανές από τις παραπάνω σχέσεις, όσο μικρότερο είναι το dt που στην ουσία πρόκειται για βήμα περιστροφής $d\theta$, τόσο αυξάνεται η ακρίβεια των υπολογισμών, αλλά τόσο αυξάνεται και ο αριθμός των απαιτούμενων επιλύσεων. Όμως, ανάμεσα στους διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του βήματος στροφής είναι και το θεώρημα δειγματοληψίας του Shannon-Nyquist σύμφωνα με το οποίο για την αξιόπιστη δειγματοληψία ενός σήματος και του φάσματός του, απαιτείται αριθμός δειγμάτων διπλάσιος ή μεγαλύτερος από την θεμελιώδη συχνότητα του σήματος. Συνεπώς καθώς είναι σημαντική παράμετρος η αρμονική παραμόρφωση και επιθυμούμε στη συνέχεια μέσω ανάλυσης Fourier να δούμε και την επίδραση των αρμονικών απαιτείται ένας ελάχιστος αριθμός δειγμάτων της τάσης ώστε τα αποτελέσματα της ανάλυσης σε συνιστώσες να είναι αξιόπιστα.

Στην παρούσα εφαρμογή, το βήμα μεταβολής της γωνίας επιλέχθηκε: $d\theta = 1^\circ$ και η συνολική γωνιακή μετατόπιση ήταν 2 πολικά βήματα δηλαδή $\theta = 72^\circ$.

4.3.4 Υπολογισμός απωλειών

Οι απώλειες σε μια μηχανή, όπως παρουσιάστηκαν και σε προηγούμενα κεφάλαια είναι αυτές που καθορίζουν την απόδοση της μηχανής. Συνεπώς δεν θα μπορούσαν να μην συμπεριληφθούν στους υπολογισμούς. Οι απώλειες που υπολογίζονται, είναι λοιπόν οι εξής:

- Απώλειες χαλκού
- Απώλειες σιδήρου
- Απώλειες τριβών και ανεμισμού
- Απώλειες μαγνήτη

4.3.4.1 Απώλειες χαλκού

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, οι απώλειες χαλκού οφείλονται στις ωμικές απώλειες που εμφανίζονται στα τυλίγματα. Εν προκειμένω, αναφερόμαστε στο τύλιγμα του στάτη. Ο υπολογισμός του γίνεται μέσω του τύπου:

$$P_{cu} = 3 * I_{nom}^2 * R_{phase} \quad (4-27)$$

Πρέπει λοιπόν να υπολογίσουμε το I_{nom} και το R_{phase} . Κάνοντας ένα σχήμα πρωθύστερο, αναφέρουμε εδώ πως καθώς στη διαδικασία βελτιστοποίησης το I_{nom} άλλαζε καθώς μεταβάλλονταν οι διαστάσεις των αυλάκων, συνεπώς το I_{nom} έπρεπε να υπολογίζεται σε κάθε γεωμετρία, καθώς ως σταθερά λαμβάνεται η πυκνότητα ρεύματος και όχι το ρεύμα. Για δοσμένη λοιπόν πυκνότητα ρεύματος J το ρεύμα υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{nom} = \frac{J * ff * A_{slot}}{N} \quad (4-28)$$

Όπου J η RMS τιμή της πυκνότητα ρεύματος, N ο αριθμός των ελιγμάτων ανά αύλακα, ff ο συντελεστής πληρότητας και A_{slot} η επιφάνεια αύλακας.

Εν συνεχεία πρέπει να υπολογιστεί η αντίσταση ανά φάση. Προκειμένου να συμβεί αυτό χρειάζεται η γνώση του συνολικού μήκους αγωγού ανά φάση, που εξαρτάται από τον αριθμό των ελιγμάτων ανά φάση, τον αριθμό των αυλάκων και τις γεωμετρικές

ιδιότητες και διαστάσεις της τοπολογίας. Επίσης απαιτείται η γνώση της ειδικής αντίστασης του αγωγού.

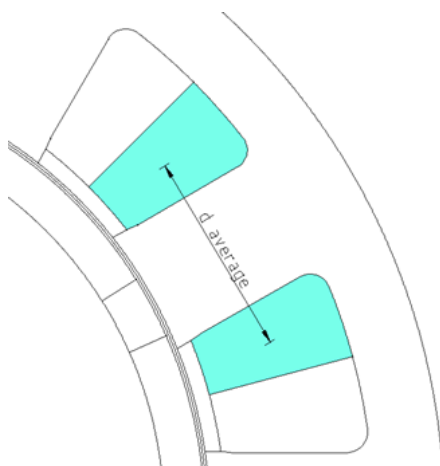
Η ειδική αντίσταση του χαλκού για θερμοκρασία περιβάλλοντος $\theta=20^{\circ}\text{C}$ είναι:

$$r_{Cu,20} = 1.75 \mu\Omega \cdot \text{cm}$$

Θεωρώντας πως η θερμοκρασία λειτουργίας της μηχανής σε ονομαστική φόρτιση είναι $\theta=70^{\circ}\text{C}$ και για συντελεστή θερμοκρασιακής μεταβολής αντίστασης του χαλκού $\alpha=3.9 \cdot 10^{-3}$ [26], η διορθωμένη ειδική αντίσταση προκύπτει:

$$r_{Cu} = r_{Cu,20}[1 + \alpha * (\theta - \theta_{20})] = 2.091 \mu\Omega \cdot \text{cm} \quad (4-29)$$

Εν συνεχεία, χρειαζόμαστε το μέσο μήκος μιας σπείρας. Για τον υπολογισμό αυτό, λαμβάνεται υπόψιν το ενεργό μήκος L της μηχανής, όπως και η απόσταση $d_{average}$ από το γεωμετρικό μέσο της μίας στρώσης μιας αύλακας, μέχρι το γεωμετρικό μέσο της ακόλουθης στρώσης της γειτονικής αύλακας, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 4-8 Αναπαράσταση μέσου μήκους μεταξύ αυλάκων

Επίσης εισάγεται ένας συντελεστής προσαύξησης του μέσου μήκους μιας σπείρας, ο συντελεστής πλέξης olf . Ο συντελεστής αυτός, υπεισέρχεται καθώς τα πηνία στην πραγματικότητα τυλίγονται κατά τέτοιο τρόπο που οδηγεί σε αυξημένο μήκος. Αυτό οφείλεται κυρίως στα εξής. Οι αγωγοί έχουν κάποιες ελάχιστες ακτίνες καμπυλότητας που πρέπει να πληρούνται για μηχανικούς λόγους. Επίσης στις κεφαλές τυλίγματος ένα τμήμα των αγωγών βρίσκεται εκτός ενεργού μήκους και τέλος κατά την πλέξη υφίστανται συχνά μεταθέσεις αγωγών.

Θεωρώντας πως $olf = 1.2$

Έχουμε τελικά πως το μέσο μήκος μιας σπείρας είναι:

$$l_{σπείρας} = olf * (2 * L + 2 * d_{average}) \quad (4-30)$$

Η διατομή του κάθε αγωγού θα είναι:

$$A_{Cu} = \frac{A_{slot} * ff}{N} \quad (4-31)$$

Με ff τον συντελεστή πληρότητας της αύλακας, A_{slot} την επιφάνεια της αύλακας και N τον αριθμό των σπειρών ανά αύλακα.

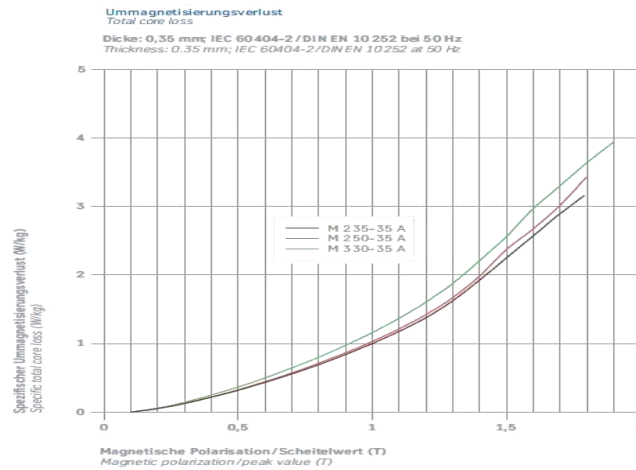
Τελικά λοιπόν η αντίσταση ανά φάση θα δίνεται από τον τύπο:

$$R_{phase} = \frac{N * Q_s}{m} * r_{Cu} * \frac{l_{σπείρας}}{A_{Cu}} \quad (4-32)$$

Με m τον αριθμό των φάσεων δηλαδή $m=3$ εδώ και Q_s τον αριθμό των αυλάκων.

4.3.4.2 Απώλειες πυρήνα

Σε αυτό το βήμα υπολογίζονται οι απώλειες πυρήνα. Οι απώλειες υπολογίζονται μέσω συνάρτησης του MATLAB με τον εξής τρόπο. Η συνάρτηση βασίζεται στον υπολογισμό των τιμών της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο βαρύκεντρο κάθε τριγώνου (δηλαδή κάθε στοιχείου του πλέγματος) σε όλες τις περιοχές της λαμαρίνας. Αρχικά, καταγράφεται η θέση κάθε στοιχείου του πλέγματος, καθώς και η επιφάνεια που αυτό καταλαμβάνει. Ακολούθως, καταγράφεται χωριστά για τα στοιχεία του στάτη και του δρομέα η μαγνητική επαγωγή τους [33]. Καθώς η λαμαρίνα που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση ήταν η M235-35A, έγινε χρήση των πειραματικών δεδομένων της καμπύλης ειδικών απωλειών συναρτήσει της πυκνότητας μαγνητικής ροής, από το φυλλάδιο προδιαγραφών της [16] που φαίνεται στο Σχήμα 4-9



Σχήμα 4-9 Καμπύλες ειδικών απωλειών λαμαρίνων

Πιο συγκεκριμένα η καμπύλη της λαμαρίνας προσομοιώθηκε με πολυώνυμο 5^{ου} βαθμού στο MATLAB. Καθώς όμως, τα πειραματικά δεδομένα είχαν ληφθεί για διαφορετική συχνότητα από αυτήν της εφαρμογής, εφαρμόσαμε γραμμική παρεμβολή ώστε να αναχθούν στην ζητούμενη συχνότητα. Στη συνέχεια για κάθε στοιχείο υπολογιζόταν μέσω του πολυωνύμου η ειδική απώλεια. Όμως έχειδειχθεί πως οι απώλειες πυρήνα εξαρτώνται από τη μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής, ενώ επίσης έχειδειχθεί πως λόγω ημιτονικής κατανομής της ΜΕΔ, επαρκεί η ανάλυση σε μια μόνο θέση του δρομέα [25], [34]. Συνεπώς για τον προσδιορισμό των απωλειών, βρίσκουμε το στοιχείο με τη μέγιστη πυκνότητα μαγνητικής ροής και τις απώλειες που του αντιστοιχούν. Τέλος γνωρίζοντας την επιφάνεια κάθε στοιχείου και πολλαπλασιάζοντας με το ενεργό μήκος της μηχανής και την πυκνότητα της λαμαρίνας αλλά και τις ειδικές απώλειες που μόλις πριν υπολογίσαμε για τον στάτη και τον δρομέα, προκύπτουν οι συνολικές απώλειες πυρήνα για τον στάτη και τον δρομέα. Μολονότι, θα μπορούσε να θεωρηθεί πως έτσι υπερεκτιμώνται οι απώλειες, αυτό δεν είναι ακριβές καθώς έχουμε αμελήσει την επιρροή των ανώτερων αρμονικών. Στον αντίποδα, η εξαγωγή δεδομένων για κάθε συχνότητα και η υπέρθεσή τους είναι επίσης εσφαλμένη καθώς τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα δεν είναι γραμμικά. Σε κάθε περίπτωση, καθώς τα δεδομένα πηγάζουν από πειραματικά δεδομένα και από λεπτομερή ανάλυση σε κάθε στοιχείο μας δίνουν μια καλή εκτίμηση των απωλειών πυρήνα. Επιπλέον καθώς το υπολογιστικό κόστος δεν μπορεί να αμεληθεί, ελέω της διαδικασίας βελτιστοποίησης, δεν πρέπει να παραγνωρίζουμε την σημαντική επιτάχυνση της επεξεργασίας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως οι απώλειες εκτιμώνται σε μια μόνο θέση του δρομέα και όχι σε κάθε dθ, και έτσι έχουμε σημαντικό κέρδος

καθώς η διαδικασία υπολογισμού όλων των παραπάνω δεδομένων για κάθε στοιχείο είναι μακράν η πιο χρονοβόρα.

4.3.4.3 Υπολογισμός απωλειών μαγνήτη

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η υψηλή αγωγιμότητα των μαγνητών Νεοδυμίου Σιδήρου Βορίου (NdFeB) προκαλεί απώλειες λόγω δινορρευμάτων. Οι απώλειες αυτές, καθώς συνήθως είναι μικρής τιμής, δεν έχουν σημαντική επίδραση στην απόδοση του κινητήρα. Έτσι, σε πολλές εφαρμογές αμελούνται καθώς είτε θεωρούνται αμελητέες, είτε θεωρούνται σταθερές και δεν ενδιαφέρει η ακριβής γνώση τους. Παρ' όλα αυτά οι απώλειες αυτές είναι καθοριστικής σημασίας, καθώς υπό προϋποθέσεις μπορούν να οδηγήσουν σε υπερθέρμανση και μόνιμη καταστροφή του μαγνήτη. Για τους παραπάνω λόγους, γίνεται μια προσπάθεια υπολογισμού των απωλειών. Ο υπολογισμός θα γίνει μέσω του ακόλουθου τύπου [26]:

$$P_{mag} \approx \frac{V_m * b_m^2 * \hat{B}_m^2 * \omega^2}{12\rho_m} \quad (4-33)$$

Όπου:

ω : η ηλεκτρική συχνότητα

V_m : ο συνολικός όγκος των μαγνητών

b_m : το πλάτος κάθε μαγνήτη

\hat{B}_m : η μέση τιμή της πυκνότητας μαγνητικής ροής στο διάκενο

ρ_m : η ειδική αντίσταση του μαγνήτη

Από την παραπάνω σχέση, προκύπτει μια καλή εκτίμηση των απωλειών. Μάλιστα, συγκρινόμενη με πιο σύνθετα μοντέλα που απαιτούν μεγάλο υπολογιστικό κόστος, για τον ακριβή υπολογισμό των δινορρευμάτων, φάνηκε πως τα αποτελέσματα του προσεγγιστικού τύπου έχουν ικανοποιητική ακρίβεια.

4.3.4.4 Υπολογισμός απωλειών τριβών και ανεμισμού

Οι απώλειες τριβών και ανεμισμού συνήθως αμελούνται και ειδικά σε εφαρμογές χαμηλών ταχυτήτων, όπως η συγκεκριμένη. Παρ' όλα αυτά, για λόγους πληρότητας έγινε προσπάθεια αποτίμησής των, ενώ δεν πρέπει να παραβλέπουμε πως σε εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων και χαμηλής ισχύος οι απώλειες τριβών και ανεμισμού είναι σημαντική συνιστώσα των συνολικών απωλειών, με σημαντική επιρροή στην απόδοση της μηχανής. Έτσι λοιπόν, προσεγγίστηκαν μέσω των ακόλουθων τύπων:

Οι απώλειες λόγω τριβών υπολογίζονται από την εμπειρική σχέση [27]

$$P_{fr} = \frac{k_{fb} * (m_{rotor} + m_{magnet}) * rpm}{1000} \quad (4-34)$$

Με:

k_{fb} : έναν εμπειρικό συντελεστή, που εδώ λαμβάνουμε ίσο με $k_{fb} = 3$

m_{rotor} : η μάζα του δρομέα

m_{magnet} : η συνολική μάζα των μαγνητών

rpm : η ταχύτητα περιστροφής εκπεφρασμένη σε ΣΑΛ

Οι απώλειες λόγω ανεμισμού εκτιμώνται από τον τύπο [28] [27]:

$$P_{windage} = \frac{L * rpm^3 * (2 * R_r + 2 * mt)^3}{10^6} \quad (4-35)$$

Όπου:

- L : το ενεργό μήκος της μηχανής
- R_r : η εξωτερική ακτίνα του δρομέα
- mt : το πάχος των μαγνητών

4.3.5 Υπολογισμός απόδοσης

Έχοντας υπολογίσει τις απώλειες καθώς και την μέση ροπή, εύκολα προσδιορίζεται η απόδοση ως εξής:

Η μηχανική ισχύς εξόδου, στον άξονα της μηχανής δίνεται από την σχέση:

$$P_m = T_{mean} * \omega_r \quad (4-36)$$

Από το ισοζύγιο ισχύος προκύπτει πως η ισχύς εισόδου δίνεται από την σχέση:

$$P_{in} = P_m + P_{losses} \quad (4-37)$$

Όπου:

$$P_{losses} = P_{windage} + P_{fr} + P_{mag} + P_{Cu} + P_{core} \quad (4-38)$$

Και η απόδοση δίνεται από την σχέση:

$$n = \frac{P_m}{P_{in}} \quad (4-39)$$

4.3.6 Υπολογισμός αυτεπαγωγών ευθέως και εγκάρσιου άξονα

Για τον υπολογισμό της αυτεπαγωγής ευθέως άξονα με την μέθοδο της συγκέντρωσης μαγνητικής ροής (flux concatenation), πρέπει να μηδενιστεί η διέγερση. Εν προκειμένω, να μηδενιστεί η μαγνητική ροή των μαγνητών. Για το λόγο αυτό οι μαγνήτες αντικαθίστανται από μη-μαγνητικό υλικό με ίδια μαγνητική διαπερατότητα. Δεδομένου ότι η μαγνητική διαπερατότητα του μαγνήτη είναι κοντά στη μονάδα, αντικαθίσταται από αέρα. Συνακόλουθα η μηχανή έχει πλέον ομοιόμορφο διάκενο λόγω της σταθερής μαγνητικής διαπερατότητας στο φαινόμενο διάκενο [35] [36].

Τα τυλίγματα των τριών φάσεων τροφοδοτούνται ως εξής:

$$I_a = I_{max}$$

$$I_b = -\frac{I_{max}}{2}$$

$$I_c = -\frac{I_{max}}{2}$$

Τα οποία μετασχηματιζόμενα κατά Park δίνουν:

$$i_d = I_{max}$$

$$i_q = 0$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την πεπλεγμένη ροή της φάσης A, με τον δρομέα να βρίσκεται στον d-άξονα, και η αυτεπαγωγή ευθέως άξονα δίνεται από τη σχέση:

$$L_d = \frac{\Lambda_a}{I_a} = \frac{\Lambda_d}{i_d} \quad (4-40)$$

Για τον υπολογισμό του εγκάρσιου άξονα μετακινούμε τον δρομέα κατά 90° ηλεκτρικές μοίρες δηλαδή μισό πολικό βήμα και η αυτεπαγωγή εγκάρσιου άξονα δίνεται από την σχέση:

$$L_q = \frac{\Lambda_a}{I_a} = \frac{\Lambda_q}{i_q} \quad (4-41)$$

4.3.7 Υπολογισμός λοιπών μεγεθών

Τέλος κατά την διάρκεια της επεξεργασίας, πέραν των μεγεθών που άπτονται της επίδοσης και της απόδοσης, υπολογίζονται και ένα σύνολο άλλων παραμέτρων που είτε συμμετέχουν σε υπολογισμούς, είτε χρησιμοποιούνται σε αντικειμενικές συναρτήσεις ή ως κριτήρια λήψης αποφάσεων. Τέλος πολλά από τα ακόλουθα μεγέθη είναι χρήσιμα για την σχεδίαση των συστημάτων ελέγχου και οδήγησης του κινητήρα.

Τέτοια μεγέθη, καθώς και μια σύντομη αναφορά στην χρησιμότητα τους ακολουθεί:

- Η ροπή αδράνειας.
Η ροπή αδράνειας είναι ένα πολύ χρήσιμο μέγεθος στον προσδιορισμό της γεωμετρίας της μηχανής. Καθώς η ροπή της μηχανής μπορεί να αυξηθεί είτε με αύξηση της ακτίνας διακένου, είτε με αύξηση του ενεργού μήκους, συχνά οι ανάγκες της εφαρμογής σε ροπή αδράνειας μπορούν να οδηγήσουν τον σχεδιασμό προς δισκοειδές ή κυλινδρική τοπολογία. Επίσης, η ροπή αδράνειας καθορίζει την απόκριση της μηχανής σε μεταβατικά φαινόμενα, καθώς ισχύει το ισοζύγιο ροπής:

$$T_m - T_{load} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (4-42)$$

Συνεπώς μηχανές με μεγάλη ροπή αδράνειας έχουν αργότερη απόκριση και τούμπαλιν. Τέλος προκύπτει επίσης, πως αυξημένη ροπή αδράνειας μειώνει την μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής λόγω της κυμάτωσης ροπής και επίσης συμβάλει στην μείωση των επιπτώσεων των αρμονικών ροπής.

- Ο όγκος και το βάρος των μαγνητών
Τα μεγέθη αυτά ταυτίζονται κυρίως με οικονομικά κριτήρια, και συχνά βλέπουμε να τίθενται ως περιορισμοί σε διερευνήσεις τοπολογιών. Επίσης, χρησιμοποιούνται ως περιορισμοί σε εφαρμογές όπου compact σχεδίαση και το χαμηλό βάρος είναι απαιτούμενα.
- Ο όγκος και το βάρος του δρομέα, του στάτη αλλά και της συνολικής διάταξης.
Όμοια με τους μαγνήτες, η γνώση αυτών των μεγεθών αφορά κυρίως οικονομικά κριτήρια και προδιαγραφές.
- Διάφορες επιφάνειες, όπως πχ. η επιφάνεια των αυλάκων
Αρκετές επιφάνειες παίζουν καθοριστικό ρόλο τόσο σε κατασκευαστικά ζητήματα, όσο και σε άλλα φαινόμενα όπως η αποβολή θερμότητας.

4.4 Θερμική ανάλυση

Η θερμική ανάλυση του κινητήρα, παρουσιάζει ιδιαίτερο κατασκευαστικό, αλλά και σχεδιαστικό ενδιαφέρον. Έχει ήδη διαφανεί από τα προηγούμενα πως η θερμοκρασία λειτουργίας επηρεάζει πολλές παραμέτρους όπως πχ. τις απώλειες χαλκού. Έχουμε ήδη αναφέρει τις καταστροφικές επιπτώσεις που μπορεί να έχει η υπερβολική θερμοκρασία στους μαγνήτες. Επιπλέον η αντοχή της μονωτικής ικανότητας των αγωγών τυλίγματος στο χρόνο, και κατ' επέκταση η ορθή (τουλάχιστον) λειτουργία του κινητήρα εξαρτάται από την θερμοκρασία λειτουργίας. Επιπρόσθετα, στα περισσότερα υλικά, υπάρχει θερμοκρασιακή εξάρτηση των χαρακτηριστικών τους και συνήθως η αύξηση της θερμοκρασίας έχει αρνητικές συνέπειες σε αυτά. Για όλα τα παραπάνω, καθίσταται σαφές, πως η θερμική ανάλυση είναι μια σημαντική διαδικασία που μπορεί να οδηγήσει είτε σε μεταβολές μεγεθών ή σε αλλαγή ή βελτίωση του τρόπου ψύξης. Αν και η θερμική ανάλυση, αφορά κατά κύριο λόγο την ονομαστική λειτουργία, ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να λάβει υπόψιν και άλλες καταστάσεις καθώς και σφάλματα. Τέλος

αξίζει να αναφερθεί πως, καθώς η σταθερά χρόνου των θερμικών φαινομένων είναι αρκετά μεγάλη (τάξης αρκετών λεπτών), οι μεταβατικές ηλεκτρικές καταστάσεις δεν έχουν ιδιαίτερη συνεισφορά στη θερμική ανάλυση και κατά κανόνα αγνοούνται [30], [36].

Η αύξηση της θερμοκρασίας οφείλεται στις απώλειες που λαμβάνουν χώρα στα διάφορα τμήματα της μηχανής. Έχοντας λοιπόν προσδιορίσει τις απώλειες, μπορούμε να καθορίσουμε τις ισοδύναμες πηγές θερμότητας. Όπως εύκολα γίνεται αντιληπτό οι κύριες πηγές θερμότητες είναι οι αύλακες καθώς και τα δόντια όπου έχουμε τις απώλειες χαλκού και υψηλές απώλειες πυρήνα αντίστοιχα. Φυσικά δεν πρέπει να αμελούμε τις απώλειες μαγνήτη, καθώς οι μαγνήτες διατρέχουν τον μεγαλύτερο κίνδυνο.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία της ανάλυσης, απαιτείται καλή γνώση των μηχανισμών ανταλλαγής θερμότητας, των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών (συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, θερμοχωρητικότητα, καθώς και των οριακών συνθηκών).

Καθώς τα προβλήματα αφορούν την μόνιμη κατάσταση, είναι δυνατή η μοντελοποίηση ενός τμήματος της τελικής γεωμετρίας, καθιστώντας την ανάλυση ιδιαίτερα γρήγορη.

Οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας είναι οι εξής [37]:

- Με θερμική αγωγή (conduction). Αφορά τη διάδοση θερμότητας από μόριο σε μόριο σε στερεά, υγρά ή αέρια σώματα. Διέπεται από την σχέση:

$$\nabla(k\nabla T) + q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4-43)$$

Όπου:

k : συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σε $\frac{W}{m \cdot K}$

q : χωρική πυκνότητα ενέργειας $\frac{W}{m^3}$

C_p : ειδική θερμότητα $\frac{J}{kg \cdot K}$

ρ : πυκνότητα σε $\frac{kg}{m^3}$

- Με συναγωγή ή συναγωγιμότητα (thermal convection).

Ορίζεται, ως ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και ενός γειτονικού κινούμενου ρευστού (υγρού ή αερίου) Διέπεται από την σχέση

$$q_s = -k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_0) = 0 \quad (4-44)$$

Η εναλλακτικά:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_0) = 0 \quad (4-45)$$

Όπου:

q_s : επιφανειακή πυκνότητα ενέργειας $\frac{W}{m^2}$

h : συντελεστής συναγωγιμότητας σε $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ που είναι χαρακτηριστικός του κάθε υλικού

T_0 : η θερμοκρασία του ρευστού (ψυκτικού μέσου)

Η συναγωγή χωρίζεται σε φυσικής ροής και εξαναγκασμένης ροής

- Μέσω ακτινοβολίας (radiation).

Ορίζεται ως η ανταλλαγή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας μεταξύ επιφανειών στερεών σωμάτων που βρίσκονται σε απόσταση. Διέπεται από την σχέση:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + \beta k_{sb}(T^4 - T_0^4) = 0 \quad (4-46)$$

Όπου:

β : συντελεστής ακτινοβολίας $0 < \beta < 1$

k_{sb} : η σταθερά του Boltzmann = $5.6 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$

T_0 : η θερμοκρασία του ρευστού (ψυκτικού μέσου)

Για $T < 273 K$ η μετάδοση μέσω ακτινοβολίας είναι πρακτικά αμελητέα.

Παραθέτουμε τυπικές τιμές του συντελεστή k για υλικά ενδιαφέροντος στις μηχανές [35], [37]

Υλικό	Τιμή k (W/m·K)
Αέρας	0.024-0.026
Χαλκός	385-400
Μαγνήτης	9
M235-35A	385
Ατσάλι	36-54

Πίνακας 4-2 Πίνακας τυπικών συντελεστών θερμικής αγωγιμότητας

Επίσης παραθέτουμε τυπικές τιμές για του συντελεστή συναγωγιμότητας ανάλογα με τον τύπο ψύξης.

Φυσική ροή αέρα: $5 - 25 \frac{W}{m^2K}$

Φυσική ροή νερού: $20 - 100 \frac{W}{m^2K}$

Εξαναγκασμένη ροή αέρα: $10 - 200 \frac{W}{m^2K}$

Εξαναγκασμένη ροή νερού: $50 - 10000 \frac{W}{m^2K}$

Έχοντας πλέον καθορίσει τις περισσότερες παραμέτρους μένει ο καθορισμός του προβλήματος. Αυτό γίνεται ως εξής:

- Πηγές θερμότητας. Βάσει των απωλειών που έχουν ήδη υπολογιστεί ορίζονται πηγές θερμότητας με συγκεκριμένη ειδική ισχύ εκφρασμένη σε $\frac{W}{m^3K}$
- Καθορισμός ιδιοτήτων υλικών. Σε αυτά καθορίζεται ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
- Καθορισμός οριακών συνθηκών. Εδώ ορίζεται ο τύπος μετάδοσης θερμότητας, η θερμοκρασία T_0 , καθώς και τυχούσες περιοδικές συνθήκες.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις αύλακες όπου καθώς πληρώνονται με αγωγούς χαλκού, οι οποίοι είναι μονωμένοι, η χρήση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του χαλκού οδηγεί σε λανθασμένα αποτελέσματα. Λαμβάνοντας υπόψιν, τόσο την

μόνωση των τυλιγμάτων, όσο τον συντελεστή πληρότητας, μια καλή προσέγγιση συνίσταται στη χρήση ενός συντελεστή αγωγιμότητας της τάξης του μονωτικού υλικού αυξημένο 4-5 φορές. [24]

Στην παραπάνω ανάλυση δεν λαμβάνεται υπόψιν η ανισοκατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος του ενεργού μήκους της μηχανής, η φυσική ψύξη στις δύο κάθετες επιφάνειες ως προς τον άξονα περιστροφής της μηχανής, καθώς και φαινόμενα όπως: μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος της μηχανής, σπηλαίωση κλπ. Σε κάθε περίπτωση όμως μπορεί να θεωρηθεί ως μια καλή προσέγγιση ενδεικτική της συμπεριφοράς στη μέση (περίπου) του αξονικού μήκους όπου αναμένεται και η υψηλότερη αύξηση της θερμοκρασίας.

Κεφάλαιο 5ο. Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση μέσω υβριδικού εξελικτικού αλγόριθμου ισχύος Pareto, (Strength Pareto Evolutionary Algorithm, SPEA)

Στο κεφάλαιο αυτό, αφού πρώτα αναφερθούμε σε κάποιες θεμελιώδεις έννοιες της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, απαραίτητες για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας, στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή της λειτουργίας του εξελικτικού αλγόριθμου Pareto ισχύος (strength Pareto evolutionary algorithm, SPEA). Επίσης γίνεται αναφορά, στην υλοποίηση του αλγορίθμου για την συγκεκριμένη εφαρμογή βελτιστοποίησης του κινητήρα.

5.1 Θεμελιώδεις έννοιες βελτιστοποίησης

Προκειμένου να καταστούν σαφέστερα, ο τρόπος λειτουργίας, οι στόχοι, τα δεδομένα εισόδου και τα αποτελέσματα, αλλά και προκειμένου να θεσπιστεί μια κοινή νομενκλατούρα γίνεται μια εκτενής αναφορά σε βασικές έννοιες και αρχές που διέπουν την βελτιστοποίηση.

5.1.1 Η έννοια του συστήματος

Η έννοια του συστήματος (system) είναι θεμελιώδης για την διατύπωση του ορισμού της βελτιστοποίησης σε πραγματικά προβλήματα, τα οποία καλείται να αντιμετωπίσει ένας μηχανικός. Ως σύστημα νοείται ένα σύνολο ανεξάρτητων μεταξύ τους στοιχείων που αλληλεπιδρούν, το οποίο χαρακτηρίζεται από: (α) ένα σύνορο που καθορίζει αν ένα στοιχείο ανήκει στο σύστημα ή στο περιβάλλον, (β) αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον (είσοδοι-έξοδοι), και (γ) σχέσεις μεταξύ των στοιχείων του και των εισόδων-εξόδων [38].

Από τον ορισμό προκύπτουν τρεις ακόμα θεμελιώδεις έννοιες που εξηγούνται παρακάτω:

- Είσοδος (input) ενός συστήματος καλείται κάθε σύνολο δράσεων που προέρχονται από το εξωτερικό περιβάλλον και επιφέρουν μεταβολές στην κατάσταση του συστήματος.
- Έξοδος (output) ή απόκριση (response) ενός συστήματος καλείται κάθε αντίδραση που παράγεται από το σύστημα και γίνεται αντιληπτή από το περιβάλλον.
- Μεταβλητές κατάστασης (state variables) καλούνται οι εσωτερικές ιδιότητες που περιγράφουν την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος και μεταβάλλονται ως συνέπεια των εισόδων.

Τα μαθηματικά μοντέλα συνιστούν και αυτά συστήματα, απλοποιημένα μεν, σε σχέση με τα φυσικά συστήματα που ερμηνεύουν, με επαρκή ακρίβεια όμως, δε. Συνεπώς και τα μαθηματικά μοντέλα, ως συνέπεια των εφαρμοζόμενων εισόδων, παράγουν εξόδους και μεταβάλλουν την κατάστασή τους.

5.1.2 Γενικός ορισμός της βελτιστοποίησης

Όποτε τίθεται κάποιο πρόβλημα προς επίλυση, η επίλυσή του βασίζεται σε ένα σύνολο εναλλακτικών αποφάσεων (decisions) και αποτιμήσεων (evaluations) των επιπτώσεων κάθε απόφασης. Αν κάθε μια από τις εναλλακτικές αποφάσεις, που ικανοποιούν τους περιορισμούς του προβλήματος, δύναται να περιγραφεί από ένα σύνολο (x_1, x_2, \dots, x_n) και αν για κάθε τέτοια περιγραφή μπορεί να αντιστοιχιστεί ένα πραγματικό μέτρο επίδοσης (performance measure), τότε ως βέλτιστη (optimal) θεωρείται η απόφαση που μεγιστοποιεί το μέτρο της επίδοσης. Σύμφωνα με τον ορισμό του Pierre:

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

5.1.3 Ορισμός ακρότατων

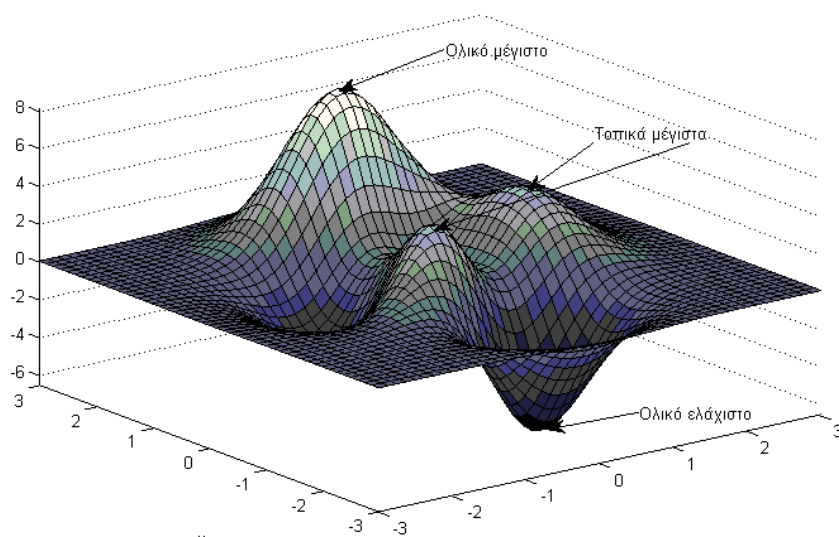
Μια πραγματική συνάρτηση $f(\mathbf{x})$ ορισμένη στο $D \subseteq R^n$ παρουσιάζει τοπικό ελάχιστο (local minimum) στο σημείο $\mathbf{x}^* \in D$ όταν υπάρχει περιοχή $D_0 \subset D$ του \mathbf{x}^* τέτοια ώστε για κάθε $\mathbf{x} \in D_0$ να ισχύει:

$$f(\mathbf{x}^*) \leq f(\mathbf{x})$$

Αντίστοιχα ορίζεται και το τοπικό μέγιστο (local maximum). Κάθε σημείο τοπικού ελαχίστου ή τοπικού μεγίστου καλείται τοπικό ακρότατο (local extreme), ενώ όταν επιπλέον ισχύει πως $D_0 \equiv D$ χαρακτηρίζεται ως απόλυτο ή, συνηθέστερα, ολικό (global) ακρότατο.

Κατά συνέπεια, το ολικό ελάχιστο (global minimum) μιας συνάρτησης, δεν είναι τίποτα άλλο παρά το μικρότερο από τα τοπικά της ελάχιστα που ανήκουν στο πεδίο ορισμού της, και αντίστοιχα το ολικό μέγιστο (global maximum) είναι το μεγαλύτερο από τα τοπικά της μέγιστα.

Στο ακόλουθο σχήμα παρουσιάζονται οι διαφοροποιήσεις στα ακρότατα:



Σχήμα 5-1 Παράδειγμα τοπικών και ολικών ακρότατων

5.1.4 Βελτιστοποίηση πραγματικών συναρτήσεων

Αφού προηγουμένως ορίσαμε τα ακρότατα, μπορούμε πλέον να προχωρήσουμε με ένα πιο συγκεκριμένο ορισμό της βελτιστοποίησης όσον αφορά σε πραγματικές συναρτήσεις.

$P = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ είναι το βαθμωτό μέτρο επίδοσης ενός συστήματος, όπου $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ είναι μια πραγματική συνάρτηση ορισμένη στο πεδίο $D \subseteq R^n$ και $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ το διάνυσμα στήλη των ανεξάρτητων μεταβλητών.

Το μέτρο f καλείται στοχική συνάρτηση (objective function), ενώ οι συνιστώσες του \mathbf{x} καλούνται μεταβλητές απόφασης (decision variables) ή παράμετροι (parameters) του συστήματος. Επίσης η στοχική συνάρτηση συχνά αναφέρεται ως, συνάρτηση κόστους (cost function) ή αντικειμενική συνάρτηση.

Το πεδίο ορισμού της συνάρτησης καλείται εφικτή περιοχή (feasible region) ή εφικτός χώρος (feasible space) ή χώρος αναζήτησης (search space), και συμβολίζεται με D .

Το πεδίο τιμών, ονομάζεται χώρος αποτίμησης (evaluation space), ή αντικειμενικός χώρος και συμβολίζεται με F .

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, θεωρούμε ότι το μέτρο επίδοσης είναι βαθμωτό μέγεθος. Ως απόρροια αυτού, σε κάθε διάνυσμα \mathbf{x} αντιστοιχεί μια πραγματική τιμή $P = f(\mathbf{x})$. Η τιμή αυτή αντιπροσωπεύει ένα κριτήριο του υπό μελέτη συστήματος, ως προς τις μεταβλητές εισόδου του. Το κριτήριο αυτό μπορεί να είναι ένα πραγματικό, μετρήσιμο μέγεθος, ή ένας συνδυασμός πραγματικών μεγεθών.

Με βάση τα παραπάνω, το πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται ως:

$$\min P := f(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in D. \quad (5-1)$$

Αντί του τελεστή ελαχιστοποίησης «min» θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ο δυικός του, δηλαδή ο τελεστής μεγιστοποίησης (maximization). Βέβαια, σε κάθε περίπτωση μπορούμε να οδηγηθούμε από την μία μορφή στην άλλη μέσω των κατάλληλων μετασχηματισμών. Οι συνηθέστεροι μετασχηματισμοί είναι:

$$f(\mathbf{x}) = -f(\mathbf{x}) \quad (5-2)$$

ή

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{f(\mathbf{x})} \quad (5-3)$$

Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιήσουμε καταχρηστικά μόνο την μορφή ελαχιστοποίησης. Συνεπώς, όποτε αναφερόμαστε πλέον, σε βελτιστοποίηση θα συνεπάγεται το πρόβλημα ελαχιστοποίησης

Τονίζεται επίσης, ότι ως στοχική συνάρτηση δεν νοείται κατ' ανάγκη μια αναλυτική έκφραση. Τόσο γενικά, όσο και ειδικά στην παρούσα εργασία, μπορεί να συνιστά μια πολύπλοκη διαδικασία που επιστρέφει μια μοναδική τιμή συναρτήσει των τιμών των μεταβλητών εισόδου.

Εν προκειμένω, η στοχική συνάρτηση αποτιμάται, μέσω της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων που υλοποιείται στο FEMM. Έπειτα από ένα σύνολο πολύπλοκων υπολογιστικών διαδικασιών, λαμβάνουμε τελικά το αποτέλεσμα της διαδικασίας, που είναι ένας πραγματικός αριθμητικός δείκτης, αποτίμησης της επίδοσης του συστήματος ως προς τις αντίστοιχες μεταβλητές απόφασης.

5.1.5 Χώροι αναζήτησης και αποτίμησης

5.1.5.1 Βελτιστοποίηση υπό ή άνευ περιορισμών

Στη γενικότερη περίπτωση, όπου $D \equiv R^n$, το πεδίο ορισμού, ή ισοδύναμα ο χώρος αναζήτησης, ταυτίζεται με τον n-διάστατο ευκλείδειο χώρο, και το πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται άνευ περιορισμών (unconstrained optimization).

Αντίθετα, η συνηθέστερη περίπτωση στις πραγματικές εφαρμογές, διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς (constrained optimization). Στις περιπτώσεις αυτές, το πεδίο D περιγράφεται από ένα σύνολο μαθηματικών περιορισμών (constraints) της μορφής:

$$c(x_1, x_2, \dots, x_n) := L, 0 \quad (5-4)$$

Όπου L κάποιος τελεστής ισότητας ή ανισότητας.

Συχνά όμως, οι περιορισμοί διατυπώνονται υπό την μορφή διπλής ανισότητας με ανώτερα και κατώτερα όρια. Έτσι διατυπώνονται στην ακόλουθη:

$$l_j \leq x_j \leq u_j \quad (5-5)$$

Οι περιορισμοί ορίου, αυτής της μορφής απαντώνται στην βιβλιογραφία και ως ρητοί (explicit).

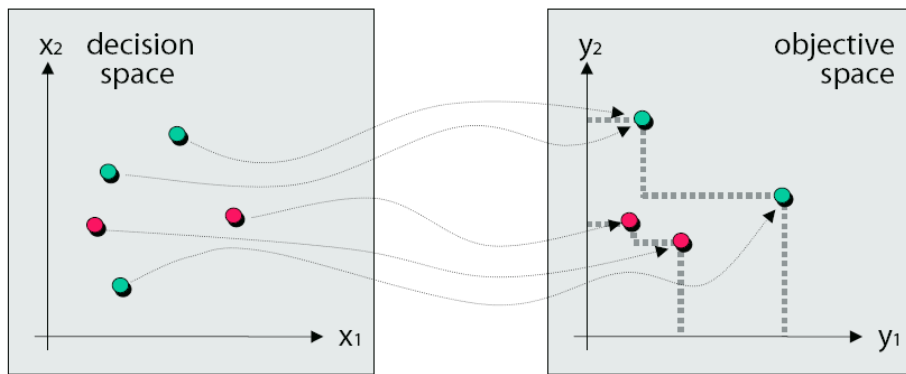
5.1.5.2 Η εφικτότητα στο χώρο αποτίμησης

Κάθε διάνυσμα μεταβλητών $\mathbf{x} \in R^n$ που δεν ικανοποιεί τους θεσπισμένους περιορισμούς του προβλήματος βελτιστοποίησης θεωρείται μη εφικτό (non-feasible). Οι περιορισμοί, δύνανται να δημιουργήσουν το εξής πρόβλημα [38]:

Ανν, το ολικό ακρότατο της στοχικής συνάρτησης βρεθεί να κείται εκτός ορίων του χώρου αναζήτησης, τότε αυτό εξαιρείται και αναζητείται κάποιο τοπικό ελάχιστο εντός του εφικτού χώρου, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει υπό συνθήκες ποινής εφικτότητας σε αλλοίωση της μορφολογίας του αντικειμενικού χώρου.

5.1.5.3 Μορφές πεδίων αναζήτησης και απόκρισης

Η γεωμετρική απεικόνιση του πεδίου αναζήτησης D , μέσω της στοχικής συνάρτησης $f(\mathbf{x})$, ονομάζεται επιφάνεια απόκρισης (response surface) ή χώρος απόκρισης ή αντικειμενικός χώρος. Αναφέρεται εδώ, πως σε περιπτώσεις πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, η απεικόνιση ξεπερνά τις 3 διαστάσεις και συνεπώς δεν μπορεί να αποτυπωθεί άμεσα, ενώ συνιστά πλέον έναν υπέρ-χώρο m -διαστάσεων, όπου m ο αριθμός των στοχικών συναρτήσεων. Στο Σχήμα 5-2 φαίνεται ένα παράδειγμα απεικόνισης.



Σχήμα 5-2 Αριστερά το πεδίο αναζήτησης και δεξιά η επιφάνεια απόκρισης

Τα ίδια ισχύουν και για τον χώρο αναζήτησης.

Στα προβλήματα βελτιστοποίησης, προκύπτουν οι ακόλουθες μορφές πεδίων, τόσο αναζήτησης όσο και απόκρισης:

- συνεχή και διακριτά·
- γραμμικά και μη γραμμικά·
- κυρτά και μη κυρτά.

5.2 Ορισμός πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης

Έχοντας θεμελιώσει, στα προηγούμενα όλες τις απαραίτητες έννοιες της βελτιστοποίησης, θα ορίσουμε ακολούθως το πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης και στη συνέχεια θα προχωρήσουμε στην εξειδίκευση για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

5.2.1 Ορισμός προβλήματος

Κατ' αναλογία με την μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση ορίζεται και το πρόβλημα πολυκριτηριακής Συνεπώς αν:

$$\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_m]^T = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (5-6)$$

όπου $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})]^T$ συνάρτηση-διάνυσμα στήλη ορισμένη στο $D \subseteq R^n$ και $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ το διάνυσμα ανεξάρτητων μεταβλητών. Οι συνιστώσες $P_i = f_i(\mathbf{x})$ της διανυσματικής συνάρτησης είναι οι αποτιμήσεις m κριτηρίων επίδοσης του συστήματος.

Έτσι το πρόβλημα πολυκριτηριακής (multicriteria) βελτιστοποίησης,(ή πολυστοχικής (multiobjective)), διατυπώνεται ως εξής:

$$\text{Min } f(x), x \in D \quad (5-7)$$

Υπό περιορισμούς:

$$l_i \leq x_i \leq u_i \quad (5-8)$$

Και συχνά

$$l_j \leq P_j \leq u_j \quad (5-9)$$

Αν κάθε κριτήριο δύναται να ελαχιστοποιηθεί ολικά και ανεξάρτητα, τότε το πρόβλημα μετασχηματίζεται σε επίλυση m-μονοκριτηριακών προβλημάτων. Όμως κάτι τέτοιο σπάνια ισχύει. Και γι' αυτό το λόγο το διάνυσμα που αποτελείται από τα ελάχιστα κάθε κριτηρίου συχνά καλείται και ουτοπικό, καθώς ανήκει συνήθως στον μη εφικτό χώρο λύσεων.

Ανν λοιπόν τα κριτήρια είναι αντικρουόμενα (που είναι και η συνηθέστερη περίπτωση), κάθε σημείο του πεδίου αποτίμησης είναι υποβέλτιστο για ένα τουλάχιστον κριτήριο, και συνεπώς δεν υφίσταται μονοσήμαντα ορισμένη λύση. Προκειμένου λοιπόν να ξεπερασθεί αυτή η δυσκολία ορίστηκε η έννοια της κυριαρχίας και των βέλτιστων κατά Pareto λύσεων.

5.2.2 Κυριαρχία

Καθώς στα πολυκριτηριακά προβλήματα αναφερόμαστε συνήθως σε διανύσματα και χώρους 2 και 3 διαστάσεων (συχνά και παραπάνω), η έννοια της διάταξης είναι συγκεχυμένη εν συγκρίσει με την απόλυτη διάταξη που προσφέρει η μια διάσταση και οι πραγματικοί αριθμοί, καθώς δεν μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα οι τελεστές σύγκρισης σε διανύσματα. Αυτό το πρόβλημα είναι και ο ακρογωνιαίος λίθος στις δυσκολίες λήψης αποφάσεων, καθώς άμεση συνέπεια του, είναι η αδυναμία απόλυτα αντικειμενικής αξιολόγησης των λύσεων, και αδυναμία ορισμού της έννοιας του βέλτιστου. Σε πρώτο βήμα ορίζεται η έννοια της *μερικής διάταξης* (partial ordering) των διανυσμάτων.

Για κάθε ζεύγος διανυσμάτων \mathbf{u} και \mathbf{v} , ορίζουμε τις ακόλουθες σχέσεις μερικής διάταξης, βάσει της σύγκρισης των συνιστωσών των διανυσμάτων:

- $\mathbf{u} = \mathbf{v}$ ανν $u_i = v_i$ για κάθε i
- $\mathbf{u} \leq \mathbf{v}$ ανν $u_i \leq v_i$ για κάθε i
- $\mathbf{u} < \mathbf{v}$ ανν $u_i \leq v_i$ για κάθε i και $u_i < v_i$ για ένα τουλάχιστον i
- $\mathbf{u} \sim \mathbf{v}$ αν δεν ισχύει τίποτα από τα παραπάνω

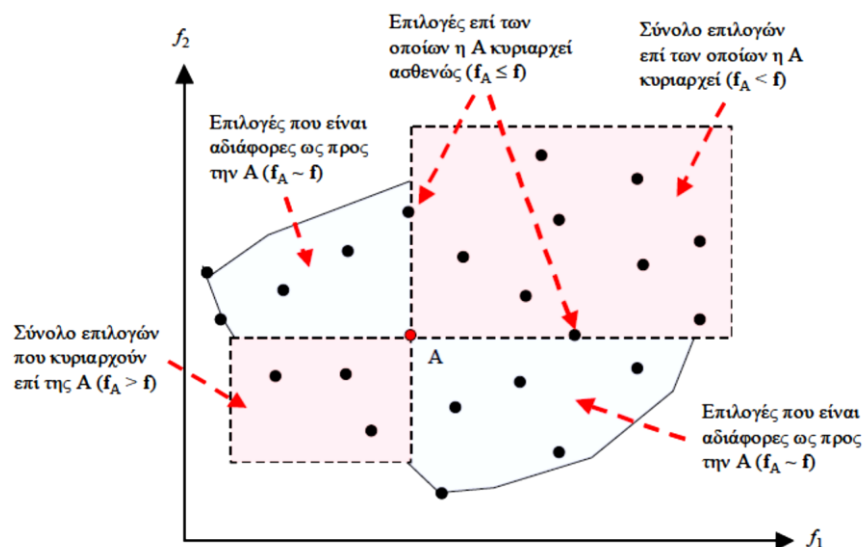
Η τελευταία περίπτωση εξηγείται εκτενέστερα καθώς παίζει σημαντικότατο ρόλο στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση. Αν δεν ικανοποιείται καμία από τις τρεις πρώτες συνθήκες, τότε τα διανύσματα \mathbf{u} και \mathbf{v} αναφέρονται ως αδιάφορα (indifferent). Η αδιαφορία, εκφράζει την ύπαρξη ανταγωνιστικής σχέσης μεταξύ των διανυσμάτων, καθώς από μαθηματικής σκοπιάς θεωρούνται ισοδύναμα μεταξύ τους.

Βασιζόμενοι στη μερική διάταξη, επεκτείνουμε λίγο και ορίζουμε τις σχέσεις κυριαρχίας (dominance) μεταξύ δύο εφικτών λύσεων \mathbf{a} , \mathbf{b} , ενός προβλήματος πολυκριτηριακής ελαχιστοποίησης. Οι σχέσεις κυριαρχίας είναι οι εξής και φαίνονται παραστατικά και στο Σχήμα 5-3.

Το \mathbf{a} κυριαρχεί ισχυρώς ως προς το \mathbf{b} αν $f(\mathbf{a}) < f(\mathbf{b})$ (5-10)

Το \mathbf{a} κυριαρχεί ασθενώς ως προς το \mathbf{b} αν $f(\mathbf{a}) \leq f(\mathbf{b})$ (5-11)

Το \mathbf{a} είναι αδιάφορο ως προς το \mathbf{b} αν $f(\mathbf{a}) \sim f(\mathbf{b})$ (5-12)



Σχήμα 5-3 Γραφική απεικόνιση των σχέσεων κυριαρχίας στο δισδιάστατο χώρο

5.2.3 Βέλτιστες λύσεις Pareto

5.2.3.1 Ορισμός βέλτιστου

Έχοντας ορίσει την κυριαρχία, μπορούμε να ξεπεράσουμε το πρόβλημα του ορισμού της βέλτιστης λύσης και στα πολυκριτηριακά προβλήματα. Έτσι ορίζουμε:

Ένα εφικτό σημείο $\mathbf{x}^ \in D$, καλείται βέλτιστο εφόσον δεν υπάρχει άλλο εφικτό σημείο $\mathbf{x} \in D$, τέτοιο ώστε $\mathbf{f}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{f}(\mathbf{x}^*)$, δηλαδή δεν υπάρχει εφικτό σημείο που κυριαρχεί επί του \mathbf{x}^* .*

Η ισοδύναμα και πιο εύληπτα:

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

5.2.3.2 Σύνολο και μέτωπο Pareto

Συχνά, παρατηρείται η σύγχυση πως η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, οδηγεί σε μοναδική λύση. Η λύση αυτή, αν ήταν υπήρχε θα ήταν το ουτοπικό διάνυσμα, που ορίστηκε προηγουμένως. Κάτι τέτοιο όμως δεν ισχύει, καθώς το ουτοπικό διάνυσμα ανήκει στον μη εφικτό χώρο. Αυτό που ισχύει, και γίνεται πιο εύκολα κατανοητό από τον δεύτερο ορισμό του βέλτιστου είναι το εξής: Οι ικανές και αναγκαίες συνθήκες περί βέλτιστου ισχύουν για περισσότερα του ενός εφικτά σημεία $\mathbf{x}^* \in D$, που καλούνται βέλτιστα Pareto ή μη-κατώτερα (non-inferior) ή μη-κυριαρχούμενα (non-dominated). Το σύνολο, των μη κυριαρχούμενων σημείων, που συμβολίζεται με \mathbf{X}^* , είναι γνωστό ως σύνολο Pareto (Pareto set).

Η απεικόνιση $\mathbf{f}(\mathbf{x}^*)$, των μη-κυριαρχούμενων σημείων $\mathbf{x}^* \in D$ στο m -διάστατο πεδίο αποτίμησης ορίζει ένα υποσύνολο του πεδίου, που ονομάζεται μέτωπο Pareto (Pareto

front). Κάθε τέτοιο σημείο του μετώπου, είτε κυριαρχεί, είτε είναι αδιάφορο, ως προς κάθε άλλο σημείο του εφικτού υπόχωρου αποτίμησης, ενώ είναι αυστηρά αδιάφορο σε σχέση με τα υπόλοιπα σημεία του μετώπου.

Όσον αφορά στην μορφή του μετώπου Pareto αυτή σε προβλήματα δύο κριτηρίων ($m = 2$), είναι μια καμπύλη, που είναι γνωστή από τις οικονομικές επιστήμες και ως *καμπύλη αντιστάθμισης* (tradeoff curve). Σε προβλήματα τριών κριτηρίων, είναι μια επιφάνεια, ενώ σε προβλήματα περισσότερων κριτηρίων (έστω m), μολονότι δεν μπορεί να αποτυπωθεί ώστε να γίνει αντιληπτό, εν γένει γενικεύεται και το μέτωπο συνιστά μια υπερ-επιφάνεια $(m - 1)$ -διαστάσεων.

5.3 Το πρόβλημα επιλογής της καλύτερης συμβιβαστικής λύσης

Με βάση τον ορισμό της κυριαρχίας και του βέλτιστου, αν και ξεπεράσαμε το πρόβλημα της ασάφειας όσον αφορά τον ορισμό του βέλτιστου στα πολυκριτηριακά προβλήματα, μοιραία ανακύπτει ένα νέο και τελικό πρόβλημα. Αυτό της επιλογής της καλύτερης λύσης, πρόβλημα που έχει πολύ μεγάλη σημασία σε οποιαδήποτε πρακτική εφαρμογή και επαφίεται στον σχεδιαστή καθιστώντας υποκειμενική την όλη διαδικασία.

Καθώς από το μέτωπο Pareto, έχουμε ένα σύνολο ισοδύναμων λύσεων, θα πρέπει να επιλεγεί μια, ως προτιμητέα λύση, για την συγκεκριμένη εφαρμογή/λήψη απόφασης. Προκειμένου να συμβεί αυτό πρέπει να εισαχθούν κάποια επιπλέον κριτήρια από τον αποφασίζων/σχεδιαστή, ώστε να βρεθεί η καλύτερα συμβιβαστική λύση (best compromise) του προβλήματος, όπως αναφέρεται στη θεωρία της βελτιστοποίησης. Δυστυχώς, με όποιο τρόπο και αν συμβεί αυτό (αυθαίρετο τελείως ή εντελώς μηχανιστικό και μαθηματικό τρόπο), συνιστά μια υποκειμενική απόφαση. Συνακόλουθα, μολονότι, επιλέγεται από ένα καθαρά αντικειμενικά προσδιορισμένο σύνολο εναλλακτικών επιλογών, δηλαδή το σύνολο Pareto, εν τέλει αποδίδει στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση έναν υποκειμενικό χαρακτήρα. Ο υποκειμενικός χαρακτήρας έγκειται στο γεγονός πως για την επιλογή της τελικής λύσης, θα υφίσταται παρέμβαση από τον λαμβάνοντα την απόφαση-σχεδιαστή, και έτσι χάνεται η απόλυτη αντικειμενικότητα και αμεροληψία της λύσης.

5.4 Εξελικτικοί αλγόριθμοι επίλυσης πολυκριτηριακών προβλημάτων

Για την επίλυση των πολυκριτηριακών προβλημάτων υφίστανται διάφορες μέθοδοι. Οι πιο γνωστές είναι [39] [40]:

- Αναλυτικές μέθοδοι, που βασίζονται συνήθως στον υπολογισμό της κλίσης του πεδίου αποτίμησης. Προϋποθέτει συνεχή και παραγωγίσιμη συνάρτηση κάτι που δεν ισχύει πάντα, ενώ φυσικά σε εφαρμογές όπως η παρούσα είναι πρακτικά ανέφικτο.
- Αριθμητικές μέθοδοι, οι οποίες αναζητούν το βέλτιστο μέσα από ένα πεπερασμένο σύνολο υποψηφίων λύσεων ή σε ένα άπειρο σύνολο διακριτών υποψηφίων λύσεων, υπολογίζοντας την τιμή της στοχικής συνάρτησης για κάθε υποψήφιο σημείο ξεχωριστά. Λόγω της απλότητας εφαρμόζονται σε αρκετές εφαρμογές όπου το υπολογιστικό κόστος είναι μικρό.
- Τυχαίες ή στοχαστικές μέθοδοι, οι οποίες επεκτείνονται και διαδίδονται ολοένα και περισσότερο καθώς δεν έχουν τους περιορισμούς των αναλυτικών και των αριθμητικών μεθόδων και έτσι προτιμώνται όλο και περισσότερο ειδικά σε κλάδους όπως των μηχανικών όπου ο χώρος αναζήτησης είναι πολύ μεγάλος, οι στοχικές συναρτήσεις υλοποιούνται μέσω πολύπλοκων διαδικασιών (προσομοιώσεις κλπ), και οι χώροι αποτιμήσεις έχουν απρόβλεπτες τοπολογίες, καθιστώντας τις στοχαστικές μεθόδους ιδιαίτερα θελκτικές. Οι γενετικοί και εξελικτικοί αλγόριθμοι ανήκουν σε αυτή την κατηγορία και θα γίνει εκτενής αναφορά στη συνέχεια.

Στην παρούσα εργασία θα γίνει χρήση του εξελικτικού αλγόριθμου Pareto ισχύος (strength Pareto evolutionary algorithm, SPEA). Για την ακρίβεια θα χρησιμοποιηθεί μια υβριδική μορφή που έχει στοιχεία τόσο από την αρχική SPEA όσο και από την SPEA2.

Για την καλύτερη κατανόηση αλλά και θέσπιση μια κοινής νομενκλατούρας, μέσω κάποιων βασικών ορισμών, ακολουθεί μια μικρή εισαγωγή περί γενετικών αλγόριθμων

βελτιστοποίησης (evolutionary algorithms). Ως τέτοιοι, νοούνται οι υπολογιστικές μέθοδοι που χρησιμοποιώντας ως πρότυπο εξελικτικές διεργασίες που απαντώνται στην φύση και στον άνθρωπο, επιχειρούν μέσω υπολογιστικά ανάλογων διαδικασιών να επιλύσουν σύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης.

Πιο συγκεκριμένα, βάση των περισσότερων αλγορίθμων είναι η παρατήρηση πως, η εξέλιξη οργανισμών ως φυσική διαδικασία οδηγεί τόσο στη διαιώνιση, όσο και στη βελτίωση του εκάστοτε είδους. Κατ' αναλογία λοιπόν, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι, προσομοιώνουν την εξέλιξη ενός πληθυσμού (population) εφικτών σημείων, P, μέσω υπολογιστικών διαδικασιών που είναι εμπνευσμένες από την φύση και αφορούν [39] [41]:

- Την φυσική διαλογή (selection), σύμφωνα με την οποία τα ισχυρότερα μέλη ενός είδους έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα επιβίωσης.
- Την αναπαραγωγή ή ανασυνδυασμό (recombination), σύμφωνα με την οποία κάποια γενετικά χαρακτηριστικά των γονέων μεταφέρονται στα παιδιά τους μέσω της διαδικασίας διασταύρωσης (crossover).
- Την μετάλλαξη (mutation), σύμφωνα με την οποία τυχαίες αλλαγές λαμβάνουν χώρα στο γονιδιακό υλικό των απόγονων οδηγώντας σε διαφοροποίηση των ειδών.

Η έννοια του πληθυσμού είναι θεμελιώδης στους εξελικτικούς αλγορίθμους, και τους διαφοροποιεί σε σχέση με κάθε άλλη μέθοδο που βασίζεται σε διαδοχικούς μετασχηματισμούς ενός αρχικού σημείου ή διάνυσματος. Ο πληθυσμός απαρτίζεται από ένα σύνολο ατόμων (individuals) όπου κάθε άτομο δεν είναι τίποτα άλλο, παρά ένα εφικτό διάνυσμα μεταβλητών

Για κάθε άτομο, η θέση του στον χώρο αναζήτησης, συνιστά τα γενετικά του χαρακτηριστικά. Με άλλα λόγια οι μεταβλητές απόφασης, είναι το μαθηματικό ανάλογο των γενετικών χαρακτηριστικών. Όπως στην πραγματικότητα, έτσι και στην βελτιστοποίηση έχουμε συχνά την ύπαρξη των διαδικασιών της μετάλλαξης και της διασταύρωσης. Η μετάλλαξη αφορά την τυχαία αλλοίωση-μεταβολή κάποιων

γενετικών χαρακτηριστικών, ενώ η διασταύρωση αφορά την αποκοπή αυτούσιων αλληλουχιών γενετικών χαρακτηριστικών των γονέων και την δημιουργία μέσω αυτών, των απογόνων όπου έχουν τμήματα γενετικού υλικού και από τους δύο γονείς.

Μετά την θεμελίωσή τους από τους Holland (1975) και De Jong (1975), οι εξελικτικοί αλγόριθμοι έχουν βρει ένα εξαιρετικά ευρύ πεδίο εφαρμογής, καθώς χρησιμοποιούνται με επιτυχία και σε προβλήματα γενετικού προγραμματισμού (genetic programming), αυτο-εκμάθησης μηχανών (machine learning) και νευρωνικών δικτύων (neural networks). Έως τώρα έχει αναπτυχθεί μια πολύ μεγάλη ποικιλία εξελικτικών αλγόριθμων, που βασίζονται σε κοινή λογική, παρόλο που διαφοροποιούνται σε επιμέρους λεπτομέρειες.

5.5 Ο εξελικτικός αλγόριθμος Pareto ισχύος (Strength Pareto Evolutionary Algorithm, SPEA)

Σε αυτό το σημείο θα αναφερθούμε σε μια από τις βασικότερες συνιστώσες της παρούσας εργασίας και τον θεμέλιο λίθο της βελτιστοποίησης, τον υβριδικό εξελικτικό αλγόριθμο ισχύος Pareto. Η αρχική μορφή αυτού του αλγόριθμου δημιουργήθηκε από τους Eckart Zitzler και Lothar Thiele το 1998 [41], οι οποίοι χρησιμοποίησαν ένα συνδυασμό υπάρχοντων και νέων τεχνικών, προκειμένου να δημιουργήσουν έναν αλγόριθμο, ο οποίος βρίσκει ταυτόχρονα πολλαπλά σημεία που ανήκουν στο μέτωπο Pareto. Τρία χρόνια αργότερα, το 2001, οι Eckart Zitzler, Marco Laumanns, and Lothar Thiele, βασιζόμενοι στις αδυναμίες του αρχικού αλγόριθμου, εισήγαγαν μια βελτιωμένη εκδοχή, του αρχικού αλγόριθμου που ονόμασαν SPEA2 [42]. Τέλος αργότερα οι Mifa Kim, Tomoyuki Hiroyasu, Mitsunori Miki και Shinya Watanabe βασιζόμενοι με τη σειρά τους στις αδυναμίες της SPEA2, πρότειναν έναν τροποποιημένο αλγόριθμο που ονόμασαν SPEA2+ [43]. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε μια υβριδική μορφή που είναι αρκετά κοντά στην SPEA2 με κάποιες προσθήκες από την SPEA2+, αλλά και γενικά για την καλύτερη προσαρμογή στις ανάγκες του συγκεκριμένου προβλήματος βελτιστοποίησης, εξ' ου και ο χαρακτηρισμός ως υβριδικός. Αναφέρουμε εδώ πως η SPEA θεωρείται ο πρώτος

εκλεκτικός (elitism) αλγόριθμος, δηλαδή τους πολυκριτηριακούς αλγόριθμους τρίτης γενιάς.

Η κεντρική ιδέα βασίζεται στην διατήρηση δύο εξωτερικών συνόλων που συμβολίζονται με P^O και P^V (αρχεία με μέγιστη διασπορά στον χώρο αποτίμησης και αναζήτησης αντίστοιχα), σταθερού μεγέθους, εν αντιθέσει με την αρχική SPEA, όπου τοποθετούνται οι μη-κατώτερες λύσεις του πληθυσμού και το μέγεθος μεταβάλλεται. Τα δύο σύνολα χρησιμοποιούνται, προς αύξηση της διασποράς των λύσεων, καθώς είχε παρατηρηθεί πρόωρη σύγκλιση των λύσεων και συσσώρευση των λύσεων σε μικρές περιοχές του χώρου αναζήτησης, μολονότι εμφανίζονταν αρκετά διεσπαρμένες στον χώρο αποτίμησης. Με τη χρήση δύο συνόλων, εξασφαλίζουμε πως θα έχουμε μέγιστη διασπορά τόσο στο πεδίο αναζήτησης, όσο και στο χώρο αποτίμησης. Το σταθερό μέγεθος δείχνει και τον αριθμό των εναλλακτικών λύσεων που θα πάρουμε στο τέλος της διεργασίας, αν και υπάρχει περίπτωση να μην είναι όλες μη-κατώτερες όπως θα εξηγήσουμε αργότερα. Για την απόφαση περί εισαγωγής της λύσης σε κάποιο από τα σύνολα ή όχι, χρησιμοποιείται η έννοια της ή καταλληλότητας ή ποιότητας (fitness). Εν προκειμένω η καταλληλότητα αποτελείται από δύο συνιστώσες την απόλυτη καταλληλότητα και την πυκνότητα ως εξής:

Αρχικά για κάθε άτομο του εξωτερικού αρχείου P^O και του πληθυσμού P απονέμεται μια τιμή ισχύς (strength value $S(i)$), η οποία εκφράζει το πλήθος των ατόμων της ένωσης του πληθυσμού και του αρχείου, επί των οποίων που κυριαρχεί το συγκεκριμένο άτομο. Δηλαδή:

$$S(i) = |\{j | j \in (P^O \cup P) \wedge i > j\}| \quad (5-13)$$

Όπου ο τελεστής $>$ αναφέρεται στην απόλυτη κυριαρχία.

Βάσει της ισχύς ορίζεται και η απόλυτη καταλληλότητα $R(i)$ [42]

$$R(i) = \sum_{j \in (P^O \cup P) \wedge i > j} S(j) \quad (5-14)$$

Με άλλα λόγια, η απόλυτη καταλληλότητα, κάθε ατόμου υπολογίζεται ως το άθροισμα των δυνάμεων των ατόμων που το κυριαρχούν, με τα άτομα αυτά να ανήκουν τόσο στα εξωτερικά σύνολα όσο και στον τρέχοντα πληθυσμό κάθε επανάληψης. Εν αντιθέσει με την αρχική SPEA, όπου η αντίστοιχη διαδικασία λάμβανε υπόψιν μόνο τα άτομα

του εξωτερικού συνόλου. Τονίζεται, πως όσο χαμηλότερη η τιμή καταλληλότητας, τόσο τείνουν προς τη μη κυριαρχία τα άτομα ($R(i) = 0$ αντιστοιχεί σε μη κυριαρχούμενο άτομο, ενώ υψηλή τιμή, υποδεικνύει ότι το συγκεκριμένο άτομο κυριαρχείται από πολλά άτομα.

Παρόλο που η αποτίμηση της απόλυτης καταλληλότητας, συνιστά ένα είδος διάταξης ή κατάταξης του πληθυσμού, βασισμένο στη κυριαρχία Pareto, παρ' όλ' αυτά όταν τα περισσότερα άτομα είναι αδιάφορα μεταξύ τους, μπορεί να αποτύχει. Για το λόγο αυτό, θεσπίστηκε η εισαγωγή της συνάρτησης πυκνότητας, προκειμένου να διαφοροποιούνται λύσεις με ίδια απόλυτη καταλληλότητα. Η συνάρτηση πυκνότητας υλοποιείται μέσω προσαρμογής της μεθόδου k-th nearest neighbor (k-οστός πλησιέστερος γείτονας). Η πυκνότητα ορίζεται ως μία φθίνουσα συνάρτηση της απόστασης μεταξύ ενός ατόμου από το k πλησιέστερο άτομο. Εν προκειμένω, για κάθε ένα από τα άτομα υπολογίζεται η απόστασή του από όλα τα υπόλοιπα άτομα (τόσο του πληθυσμού όσο και του εξωτερικού αρχείου) και τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε μια λίστα. Στη συνέχεια, ταξινομείται η λίστα σε αύξουσα σειρά, και το k στοιχείο αποτελεί την ζητούμενη απόσταση και η οποία συμβολίζεται με σ_i^k .

Ως k συνήθως θεωρείται $k = \sqrt{N + \bar{N}}$ όπου N το μέγεθος του πληθυσμού και \bar{N} το μέγεθος του συνόλου. Η πυκνότητα τελικά υπολογίζεται ως εξής:

$$D(i) = \frac{1}{\sigma_i^{k+2}} \quad (5-15)$$

Το δύο που προστίθεται στο παρονομαστή, εξασφαλίζει ότι η πυκνότητα θα έχει τιμή μικρότερη της μονάδας, προκειμένου να μην επηρεαστεί μια πιθανή μη-κατώτερη λύση.

Η καταλληλότητα κάθε ατόμου $F(i)$ προκύπτει:

$$F(i) = R(i) + D(i) \quad (5-16)$$

Ακριβώς η ίδια διαδικασία λαμβάνει χώρα παράλληλα και για το δεύτερο εξωτερικό αρχείο που περιέχει τις βέλτιστες λύσεις με την μέγιστη διασπορά στο πεδίο αναζήτησης.

Η πυκνότητα ως ένα μέτρο συσσώρευσης λύσεων, επηρεάζεται από την τιμή του k. Μικρό k μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια λύσης λόγω τυχαιότητας, ενώ μεγάλο k δεν

επηρεάζεται από ιδιάζουσες κατανομές, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια εύρους λύσεων. Συνεπώς χρειάζεται μια ορθολογική επιλογή του k και ει δυνατόν μετά από ανάλυση ευαισθησίας των λύσεων που προκύπτουν.

Η διαδικασία μείωσης του εξωτερικού αρχείου διαφέρει από την αντίστοιχη του SPEA σε δύο βασικά σημεία:

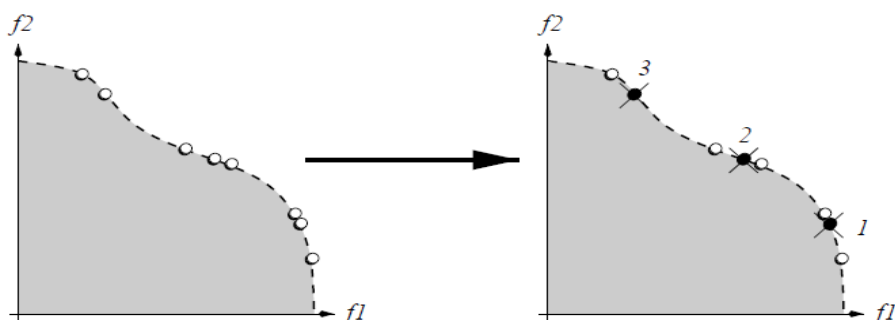
1. Το πλήθος των ατόμων που περιέχει το εξωτερικό αρχείο είναι σταθερό με το χρόνο
2. Η διαδικασία με την οποία γίνεται η συστοίχιση-μείωση (clustering) του εξωτερικού αρχείου (σε περίπτωση που τα μη κυριαρχούμενα άτομα ξεπερνούν το μέγεθος του εξωτερικού αρχείου), αποτρέπει απώλεια οριακών λύσεων

Η ανανέωση των αρχείων γίνεται ως εξής:

Αρχικά αντιγράφονται όλα τα μη κυριαρχούμενα άτομα (δηλαδή για όσα ισχύει $F(i) < 1$) από το εξωτερικό αρχείο και τον τρέχοντα πληθυσμό, στο εξωτερικό αρχείο της επόμενης γενιάς. Υπάρχουν τρεις πιθανές περιπτώσεις:

1. Το πλήθος των μη κυριαρχούμενων ατόμων να ισούται με το μέγεθος του εξωτερικού αρχείου. Στη περίπτωση αυτή, τα στοιχεία αντιγράφονται ως έχουν και η διαδικασία τελειώνει.
2. Το πλήθος των μη κυριαρχούμενων στοιχείων να είναι μικρότερο από το μέγεθος του εξωτερικού αρχείου. Στη περίπτωση αυτή, αντιγράφουμε τα μη κυριαρχούμενα άτομα ως έχουν και τοποθετούνται στο αρχείο τα καλύτερα κυριαρχούμενα άτομα (αυτά με την μικρότερη καταλληλότητα πάνω από τη μονάδα φυσικά) έως ότου συμπληρωθούν οι N λύσεις.
3. Το πλήθος των μη κυριαρχούμενων ατόμων ξεπερνά το επιτρεπόμενο μέγεθος του αρχείου. Στη περίπτωση αυτή, αφαιρούνται σταδιακά μη-κυριαρχούμενα άτομα, έως ότου προκύψει ένα σύνολο το μέγεθος του οποίου, ισούται με αυτό του εξωτερικού αρχείου \bar{N} . Με άλλα λόγια, σε κάθε επανάληψη αφαιρείται το άτομο που έχει τη μικρότερη σ_i^k απόσταση ως προς οποιαδήποτε άλλο. Σε περίπτωση που περισσότερα του ενός άτομα έχουν ίση μικρότερη απόσταση,

τότε επιλέγουμε αυτό που έχει τη δεύτερη μικρότερη απόσταση κ.ο.κ.. Η διαδικασία εξηγείται με το παράδειγμα του ακόλουθου σχήματος.



Σχήμα 5-4 Παράδειγμα clustering κατά SPEA2 για $k=1$. Αριστερά φαίνεται το αρχικό μέτωπο και στα δεξιά το μέτωπο μετά την εφαρμογή του clustering καθώς και η σειρά με την οποία αφαιρούνται τα άτομα από αυτό

Όσον αφορά στη διαδικασία εξέλιξης, αυτή υλοποιείται με την ακόλουθη λογική. Αρχικά επιλέγονται μέσω του δυαδικού διαγωνισμού τα υποψήφια ζευγάρια-γονείς. Η επιλογή υλοποιείται μέσω μιας στοχαστικής συνάρτησης, η οποία είναι εγγενώς ελιτιστική καθώς, τα άτομα με αυξημένη καταλληλότητα έχουν αυξημένη πιθανότητα να επιλεγθούν, χωρίς όμως να είναι δεσμευτικό, ώστε να έχουμε αυξημένη διασπορά λύσεων στο πεδίο αναζήτησης. Η πιθανότητα αυτή δύναται να μεταβληθεί, μέσω παραμέτρου ελέγχου του αλγόριθμου, που εκφράζει την πιθανότητα επιλογής κυριαρχούμενων λύσεων στην δεξαμενή ζευγαρώματος (F_D). Στη συνέχεια εφαρμόζεται η διαδικασία ανασυνδυασμού μέσω των διαδικασιών μετάλλαξης και διασταύρωσης.

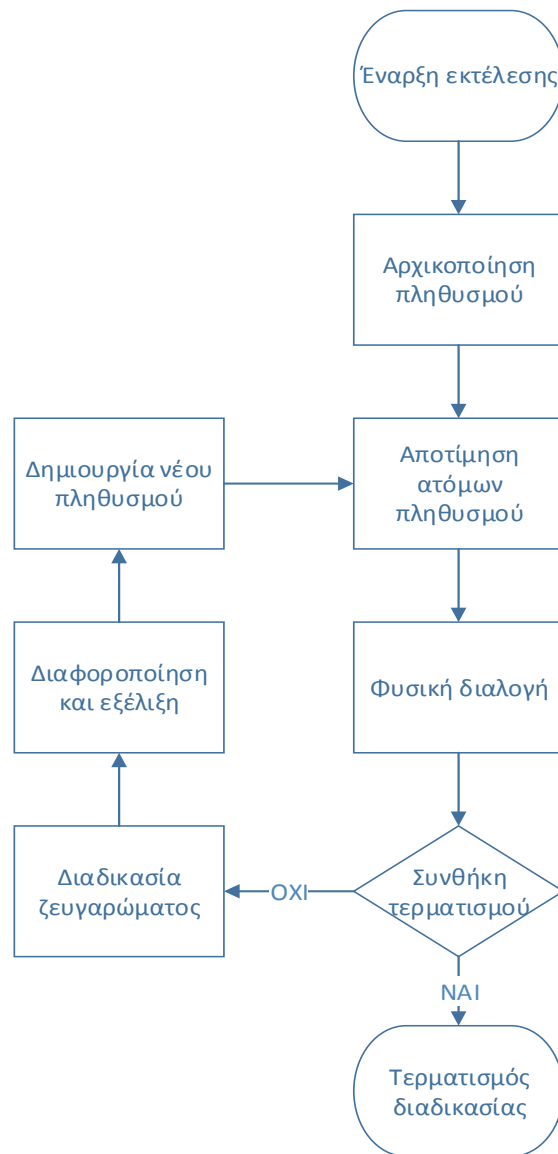
Η διαδικασία μετάλλαξης είναι απλή, καθώς στοχαστικά με κάποια πιθανότητα μεταβάλλονται κάποιες από τις παραμέτρους του ατόμου, σχηματίζοντας έτσι το νέο απόγονο. Αντίστοιχα η διασταύρωση, αφορά την σύντηξη αυτούσιων μεταβλητών των γονέων προς σχηματισμό των απογόνων. Σε κάθε περίπτωση, δεν αποκλείεται, ο σχηματισμός απογόνων με τη χρήση και των δύο μηχανισμών. Η επιλογή των πιθανοτήτων επιλογή, μετάλλαξης και διασταύρωσης έχει γενικά επίδραση τόσο στην διασπορά των λύσεων, όσο και στην ταχύτητα σύγκλισης. Σε αναλυτικές εφαρμογές ή εισαγωγή αυξημένου αριθμού κυριαρχούμενων λύσεων επιβραδύνει την σύγκλιση, ενώ και η αυξημένη διαδικασία μετάλλαξης μπορεί να επιδράσει αρνητικά. Συνεπώς σε εφαρμογές μικρού υπολογιστικού κόστους, συνίσταται η πραγματοποίηση ανάλυσης ευαισθησίας, για την επιλογή των παραμέτρων αυτών. Σε προβλήματα, όπως το παρόν

η ανάλυση ευαισθησίας λόγω του μεγάλου υπολογιστικού κόστους κρίνεται απαγορευτική. Συνεπώς χρησιμοποιούνται κάποιες εμπειρικές τιμές.

Παρατίθεται σε μορφή ψευδοκώδικα ο αλγόριθμος

- Βήμα 1: Αρχικοποίηση: Δημιουργία αρχικού πληθυσμού P_0 και δύο κενά εξωτερικά αρχεία $P_0^O = \emptyset$ και $P_0^V = \emptyset$. Θέτουμε $t = 0$ τον μετρητή γενιών.
- Βήμα 2: Αποτίμηση καταλληλότητας: Υπολογισμός της καταλληλότητας των ατόμων των P_t , P_t^O , και P_t^V
- Βήμα 3: Φυσική διαλογή: Αντέγραψε όλα τα μη κυριαρχούμενα άτομα του P_t και P_t^O στο $\overline{P_{t+1}^O}$, αν το μέγεθος του $\overline{P_{t+1}^O}$ υπερβαίνει το \overline{N} , τότε μείωσε τα στοιχεία όπως αναλύθηκε. Διαφορετικά, αν το μέγεθος του $\overline{P_{t+1}^O}$ είναι μικρότερο από το \overline{N} , συμπλήρωσε με κυριαρχούμενα άτομα. Ομοίως για το $\overline{P_{t+1}^V}$
- Βήμα 4: Συνθήκη τερματισμού: Αν το κριτήριο τερματισμού ικανοποιείται σταμάτα, αλλιώς πήγαινε στο επόμενο βήμα
- Βήμα 5: Διαδικασία ζευγαρώματος: Διεξαγωγή δυαδικού διαγωνισμού για την συμπλήρωση της δεξαμενής ζευγαριών.
- Βήμα 6: Διαφοροποίηση και εξέλιξη: Εφαρμόζοντας την διαδικασία ανασυνδυασμού μέσω μετάλλαξης και διασταύρωσης στη δεξαμενή ζευγαριών, δημιούργησε το νέο πληθυσμό, όρισέ τον ως P_{t+1} και θέσε τον μετρητή γενεών $t = t + 1$. Πήγαινε στο Βήμα 2

Τέλος παραθέτουμε τον αλγόριθμο σε μορφή διαγράμματος ροής



Σχήμα 5-5 Διάγραμμα ροής αλγόριθμου βελτιστοποίησης

5.6 Επίδοση αλγόριθμου

Προτού προβούμε στην τελική χρήση του αλγόριθμου στην παρούσα εφαρμογή, εξετάστηκε εκτενώς, ως προς την επίδοσή του. Τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά. Ο αναπτυχθέντας αλγόριθμος χαρακτηρίζεται ως:

Εύρωστος καθώς σε πληθώρα δοκιμαστικών συναρτήσεων με διαφορετικές τοπογραφικές ιδιότητες των χώρων απόκριση ανταποκρίθηκε πλήρως. Επίσης έχει

καλή ικανότητα αποφυγής εγκλωβισμού σε τοπικά ακρότατα και καλή διασπορά των λύσεων.

Αμερόληπτος καθώς δεν φάνηκε να επηρεάζεται από την αρχική επιλογή πληθυσμού.

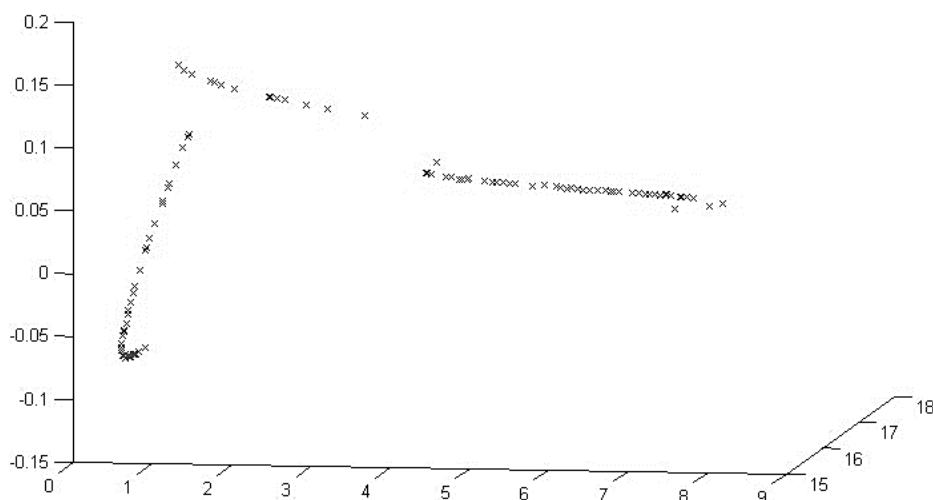
Αποδοτικός καθώς ο υπολογιστικός χρόνος για την εύρεση προκαθορισμένου αριθμού μη-κατώτερων λύσεων κρίνεται ικανοποιητικός. Μάλιστα διενεργήθηκαν και κάποιες συγκριτικές δοκιμές με άλλους αλγόριθμους βελτιστοποίησης, με καλά αποτελέσματα, ιδιαίτερα όσο αυξανόταν ο αριθμός των απαιτούμενων λύσεων.

Τέλος φαίνεται πως έχει καλή δυνατότητα σύγκλισης, που μολονότι δεν είναι δύναται να αποδειχθεί μαθηματικά, οι δοκιμές δείχνουν πως έχει καλή απόδοση και σε αυτό το μέτρο επίδοσης.

Παραθέτουμε ενδεικτικά το μέτωπο Pareto από τη δοκιμαστική συνάρτηση του Viennet [44] πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, όπου φαίνεται η ικανότητα σύγκλισης, η αποτελεσματικότητα και η διασπορά. Η συνάρτηση ορίζεται ως:

$$\text{minimize} = \begin{cases} f_1(x, y) = 0.5(x^2 + y^2) + \sin(x^2 + y^2) \\ f_2(x, y) = \frac{(3x - 2y + 4)^2}{8} + \frac{(x - y + 1)^2}{27} + 15 \\ f_3(x, y) = \frac{1}{x^2 + y^2 + 1} - 1.1\exp(-(x^2 + y^2)) \end{cases}$$

Υπό περιορισμούς $-3 \leq x, y \leq 3$



Σχήμα 5-6 Μέτωπο Pareto της δοκιμαστικής συνάρτησης Viennet για $N=110$ και 30 γενιές

Κεφάλαιο 6ο. Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κινητήρα μόνιμων μαγνητών

Στα προηγούμενα κεφάλαια ορίσαμε όλες τις απαραίτητες έννοιες καθώς και τις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Επίσης, μέσω της αυτοματοποιημένης παραμετρικής σχεδίασης και επεξεργασίας, δύναται η συνεργασία της υβριδικής SPEA με την αυτοματοποιημένη διαδικασία να υλοποιεί την στοχική συνάρτηση. Σε αυτό το τελικό στάδιο αφού καθορίσουμε το πολυκριτηριακό πρόβλημα, τις μεταβλητές απόφασης, τα όρια αυτών και την στοχική συνάρτηση, θα εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης στην εφαρμογή μας. Τελικά θα έχουμε την ολοκλήρωση ενός πολυκριτηριακού προβλήματος σχεδίασης και την τελική λήψη απόφασης.

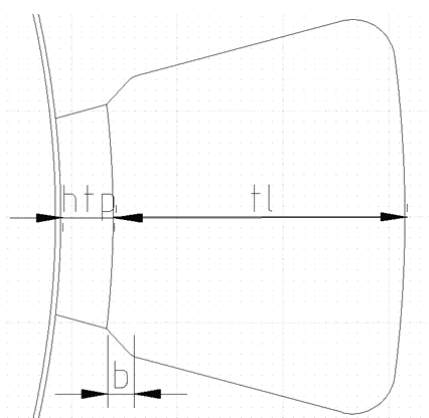
6.1 Καθορισμός πολυκριτηριακού προβλήματος βελτιστοποίησης

Πρώτα ορίζουμε τις μεταβλητές απόφασης του προβλήματος. Αυτές επιλέχθηκαν να είναι η γεωμετρία της αύλακας και το ποσοστό μαγνήτη και δοντιού. Όλες οι υπόλοιπες θεωρήθηκαν σταθερές. Φυσικά θα μπορούσαμε να έχουμε περισσότερες ή ακόμα και όλες τις παραμέτρους σχεδίασης ως μεταβλητές απόφασης. Λόγω των πολλών βαθμών ελευθερίας, πέραν του αυξημένου υπολογιστικού κόστους, κάτι τέτοιο θα δυσχέραινε σημαντικά και την σύγκλιση, αλλά το βασικότερο την τελική επιλογή οδηγώντας αναγκαστικά σε αναζήτηση πολλών κριτηρίων εφ' όσον αυτά υφίστανται.

6.1.1 Μεταβλητές σχεδίασης και καθορισμός ορίων

Συγκεκριμένα είχαμε τις ακόλουθες 6 μεταβλητές απόφασης:

1. Ποσοστό μαγνήτη επί πολικού βήματος, DCM
2. Το πλάτος σώματος δοντιού tw
3. Το ύψος σώματος δοντιού tl
4. Η ακτινική απόσταση μεταξύ αιχμής και σώματος δοντιού b
5. Το πάχος της αιχμής δοντιού htp
6. Και το ποσοστό δοντιού σε σχέση με το βήμα αύλακας DCT



Σχήμα 6-1 Βασικές παράμετροι βελτιστοποίησης

Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι σχεδίασης του κινητήρα ήταν σταθερές. Και προέκυψαν με την ακόλουθη διαδικασία. Μετά την περάτωση της προκαταρκτικής σχεδίασης, οι προκύπτουσες τιμές χρησιμοποιήθηκαν ως αρχική γεωμετρία. Κατόπιν αναλύσεων, προέκυψε πως οι τιμές της προκαταρκτικής σχεδίασης δεν έδιναν τα επιθυμητά αποτελέσματα, και μετά από αναλύσεις ευαισθησίας οδηγηθήκαμε σε ορισμένες τιμές που ικανοποιούσαν τις προδιαγραφές για μεγάλες μεταβολές παραμέτρων. Από αυτή τη γεωμετρία προέκυψαν οι λοιπές σταθερές του προβλήματος. Και συγκεκριμένα είχαμε:

Σταθερές σχεδίασης	Τιμή
L	80mm
R_{shaft}	15mm
R_{ro}	80mm
wsbt	14mm
mt	8mm
l_g	1mm
N	9σπείρες/αύλακα

Πίνακας 6-1 Πίνακας σταθερών παραμέτρων σχεδίασης

Στη συνέχεια παρατίθενται τα όρια διακύμανσης των παραμέτρων απόφασης

Όρια μεταβλητών απόφασης
$0.6 \leq DCM \leq 0.94$
$20 \leq tw \leq 40$
$25 \leq tl \leq 40$
$1.5 \leq b \leq 3$
$3 \leq htp \leq 6$
$0.48 \leq DCT \leq 0.90$

Πίνακας 6-2 Πίνακας ορίων μεταβλητών σχεδίασης

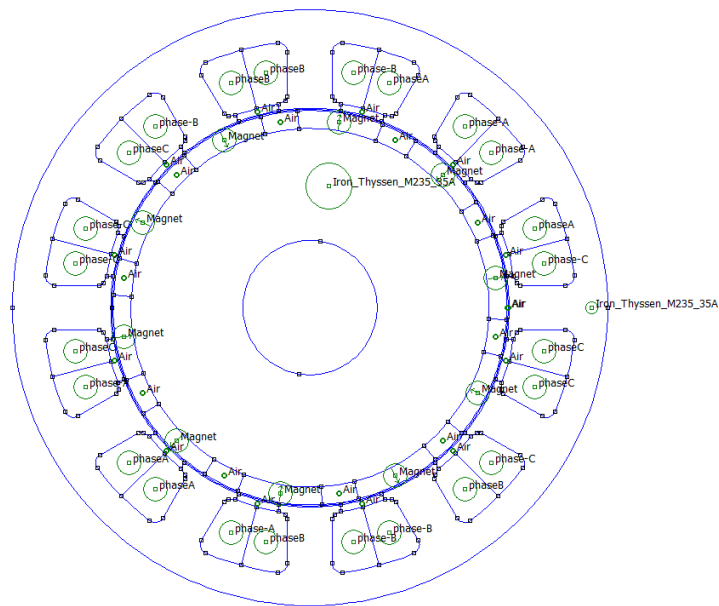
6.1.2 Αρχική προσέγγιση τοπολογίας κινητήρα

Με αφετηρία τα αποτελέσματα της προκαταρκτικής και εν συνεχεία ανάλυση εφικτότητας της σχεδίασης και αναλύσεων ευαισθησίας οδηγηθήκαμε σε μια αρχική σχεδίαση.

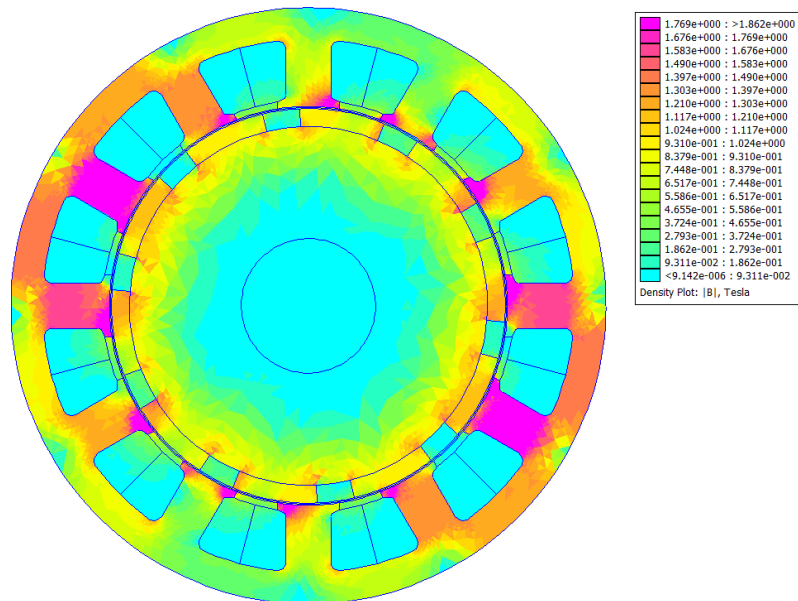
Στην αρχική αυτή σχεδίαση οι μεταβλητές απόφασης είχαν τις εξής τιμές:

$$x_{init} = \begin{cases} DCM = 70\% \\ tw = 20 \text{ mm} \\ tl = 30 \text{ mm} \\ b = 2 \text{ mm} \\ htp = 3 \text{ mm} \\ DCT = 60\% \end{cases}$$

Η αρχική γεωμετρία και η ανάλυσή της παρατίθενται στα ακόλουθα σχήματα.

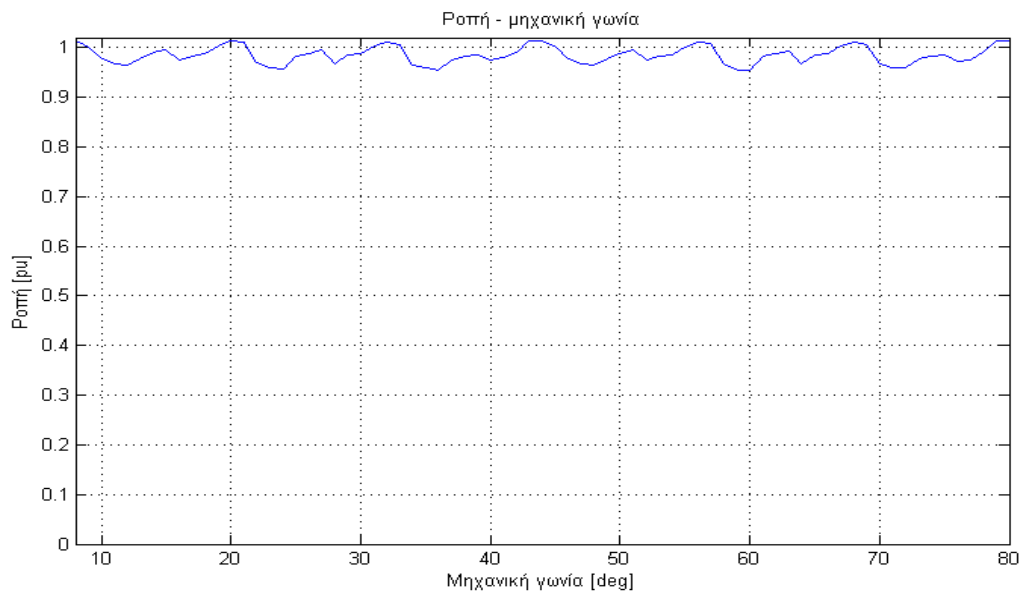


Σχήμα 6-2 Γεωμετρία αρχικής σχεδίασης



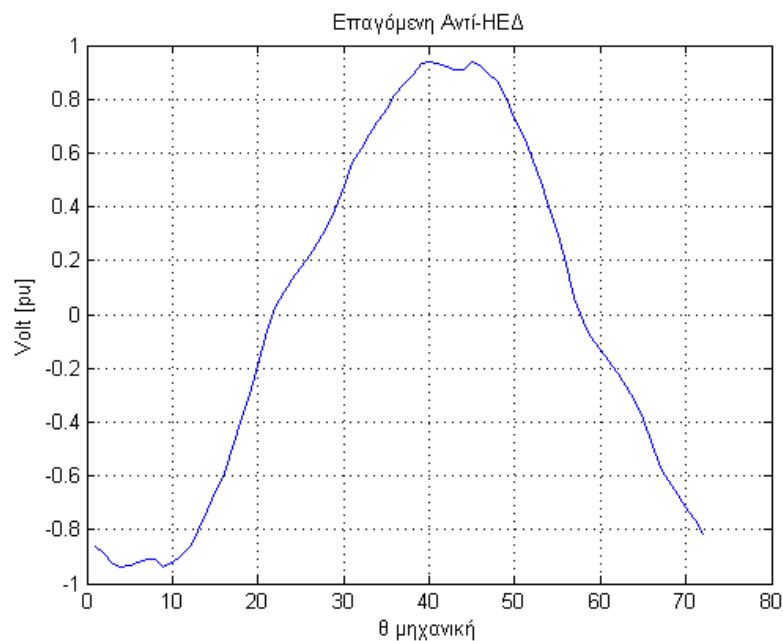
Σχήμα 6-3 Ανάλυση αρχικής γεωμετρίας

Η καμπύλη της αναπτυσσόμενης ροπής, όπου φαίνεται και η έντονη κυμάτωση που εκτιμήθηκε 8% με μέση ροπή 157,6Nm :



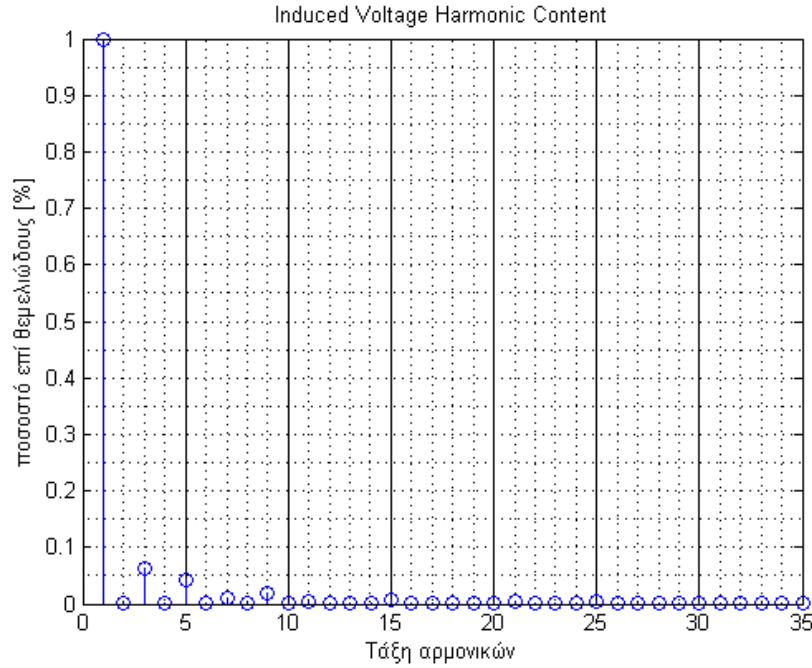
Σχήμα 6-4 Διάγραμμα ροπής αρχικής γεωμετρίας

Στη συνέχεια παρατίθεται η αναπτυσσόμενη αντι-HEΔ όπου φαίνεται η αρμονική παραμόρφωση που είναι περίπου 8%:



Σχήμα 6-5 Κυματομορφή επαγόμενης HEΔ αρχικής σχεδίασης

Προς επιβεβαίωση της αρμονικής παραμόρφωσης παραθέτουμε την φασματική ανάλυση της HEΔ:



Σχήμα 6-6 Φασματική ανάλυση ΗΕΔ αρχικής γεωμετρίας

Στην ανάλυση φαίνεται η ύπαρξη της 3^{ης}, 5^{ης} και 9^{ης} αρμονικής.

Τέλος παραθέτουμε τα στοιχεία επίδοσης της αρχικής γεωμετρίας:

Η μέση ροπή προέκυψε: $P_{mean} = 157.574 \text{ N} \cdot \text{m}$

Οι απώλειες χαλκού: $P_{Cu} = 420.46 \text{ Watt}$

Οι απώλειες πυρήνα: $P_{Fe} = 23.96 \text{ Watt}$

Οι απώλειες τριβών και ανεμισμού: $P_{fr} + P_{windage} = 21 \text{ Watt}$

Οι απώλειες μαγνήτη: $P_{magnet} = 11.84 \text{ Watt}$

Η μηχανική ισχύς: $P_{mech} = 8713 \text{ Watt}$

Βάσει των προηγούμενων η απόδοση εκτιμάται: $n = 94.8\%$

6.1.3 Καθορισμός στοιχικών συναρτήσεων

Προκειμένου να ορίσουμε τις στοιχικές συναρτήσεις, πρέπει πρώτα να καθοριστούν κάποιες τιμές που θα χρησιμοποιηθούν ως βάσεις για τον προσδιορισμό των στοιχικών

συναρτήσεων, αλλά και την εισαγωγή περιορισμών. Αρκετοί από αυτούς επιβάλλονται από τις προδιαγραφές του κινητήρα και τα όσα ήδη έχουν εξηγηθεί προηγουμένως, ενώ άλλοι πηγάζουν από την αρχική γεωμετρία.

Από τις προδιαγραφές της εφαρμογής έχει καθοριστεί η ροπή. Όμως στη διάρκεια αυτής της βελτιστοποίησης θέτουμε, ένα χαμηλότερο όριο:

$$T_{base} = 160 Nm$$

Η τιμή αυτή είναι ελαφρώς χαμηλότερη από την υπολογιζόμενη, αλλά αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα καθώς και μικρή είναι η διαφορά και τα υπολογιζόμενα μεγέθη είναι αρκετά υπερδιαστασιολογημένα, συνεπώς δεν τίθεται κάποιο ζήτημα. Επίσης εξ' ορισμού από το σύνολο Pareto θα πάρουμε λύσεις που θα έχουν ένα σεβαστό εύρος τιμών, και σε κάθε περίπτωση επαφίεται τελικά στον σχεδιαστή αν θα επιλέξει στο τέλος σχεδίαση με υψηλότερη ή χαμηλότερη ροπή καθώς τα κριτήρια είναι εν γένει αντικρουόμενα.

Στη συνέχεια ορίζεται η τιμή βάσης της κυμάτωσης ροπής. Μετά από πολλές αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε ως βάση της κυμάτωσης ροπής:

$$ripple_{base} = 6\%$$

Η τιμή αυτή είναι χαμηλότερη από αυτήν της αρχικής σχεδίασης

Αντίστοιχα ως βάση της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης επιλέχθηκε:

$$THD_{base} = 6\%$$

Μετά από πολλές δοκιμές αρχικών γεωμετριών κινητήρα και υπολογισμούς τέθηκαν επίσης ως βάσεις των απωλειών πυρήνα και χαλκού οι ακόλουθες:

$$P_{Cu,base} = 420 Watt$$

Και

$$P_{Fe,base} = 24 Watt$$

Οι τιμές αυτές συμπίπτουν με αυτές τις αρχικής προσέγγισης.

Τονίζουμε εδώ πως, όσο αυστηρές ή χαλαρές και να επιλέγονται οι τιμές βάσεις δεν θα είχε καμία επίπτωση στο τελικό αποτέλεσμα. Οι τιμές βάσης επηρεάζουν μόνο τις τιμές των στοχικών συναρτήσεων. Δηλαδή αυτό που θα συνέβαινε αν για παράδειγμα επιλέγαμε αυστηρές τιμές, θα ήταν οι αποτιμήσεις των στοχικών συναρτήσεων όπως θα οριστούν αμέσως μετά, να βρίσκονταν κοντά στην μονάδα ή και πάνω από αυτήν.

Έτσι λοιπόν με βάση τις παραπάνω τιμές καθορίζουμε και τις ακόλουθες στοχικές συναρτήσεις. Επιλέχθηκαν τρεις συναρτήσεις ώστε να έχουμε άμεση εποπτεία του αποτελέσματος. Στις δύο από τις τρεις, γίνεται χρήση βαρών ώστε να έχουμε συνάθροιση των στόχων διαφορετικών μεταβλητών απόφασης προς μείωση του αριθμού των στοχικών συναρτήσεων. Υπενθυμίζουμε πως έχουμε πρόβλημα ελαχιστοποίησης.

Εν προκειμένω έχουμε:

1. $F_{O,1} = \frac{T_{base}}{T_{mean}}$ προφανώς όσο αυξάνεται η μέση ροπή, φθίνει η $F_{O,1}$
2. $F_{O,2} = \frac{P_{Cu+PFe}}{P_{Cu,base}+P_{Fe,base}}$ καθώς επιθυμούμε την μέγιστη δυνατή απόδοση, όσο μειώνεται η στοχική συνάρτηση τόσο πιο αποδοτική είναι η λύση, πάντα βέβαια για κοντινές αποδιδόμενες ισχύες.
3. $F_{O,3} = 0.5 \frac{ripple}{ripple_{base}} + 0.5 \frac{THD}{THD_{base}}$ καθώς επιθυμούμε να έχουμε όσο το δυνατόν μικρότερη κυμάτωση ροπής αλλά και αρμονικής παραμόρφωσης εισάγουμε τους δύο όρους με ίσα βάρη. Τα βάρη συνιστούν επίδραση του μελετητή στο πρόβλημα. Τα ίσα βάρη εκφράζουν την αδιαφορία του σχεδιαστή ως προς ποιο από τα δύο μεγέθη είναι πιο επιθυμητό να βελτιώσει.

Τέλος έχουν εισαχθεί κάποιοι περιορισμοί στη σχεδίαση, όπως για παράδειγμα αν η προκύπτουσα ισχύς βρεθεί πολύ μεγαλύτερη από την ονομαστική, ή αν η επαγόμενη τάση δεν κείται κοντά στην αναμενόμενη τιμή (συνεπώς θα έχουμε υποβέλτιστη οδήγηση ή και αδυναμία). Αυτές οι λύσεις απορρίπτονται κατ' ουσίαν μέσω συνάρτησης ποινής (penalty), όπου ορίζονται άμεσα οι τιμές των στοχικών συναρτήσεων πολύ μεγάλες συνεπώς κυριαρχημένες από οποιαδήποτε άλλη εφικτή λύση.

Αξίζει να αναφερθεί πως και σε περίπτωση μια εφικτής σχεδίασης επειδή προκύπτουν μη εφαρμοζόμενες γεωμετρίες λόγω περιορισμών πάχους, γεωμετρίας κλπ πάλι εφαρμόζεται penalty.

Τέλος, αναφέρουμε πως καθώς το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι υπολογιστικά δαπανηρό, χρησιμοποιήθηκε η δυνατότητα παράλληλης επεξεργασίας που προσφέρουν τα σημερινά υπολογιστικά συστήματα, βελτιώνοντας σημαντικά τον χρόνο εκτέλεσης.

Έτσι το πρόβλημα βελτιστοποίησης ορίζεται ως:

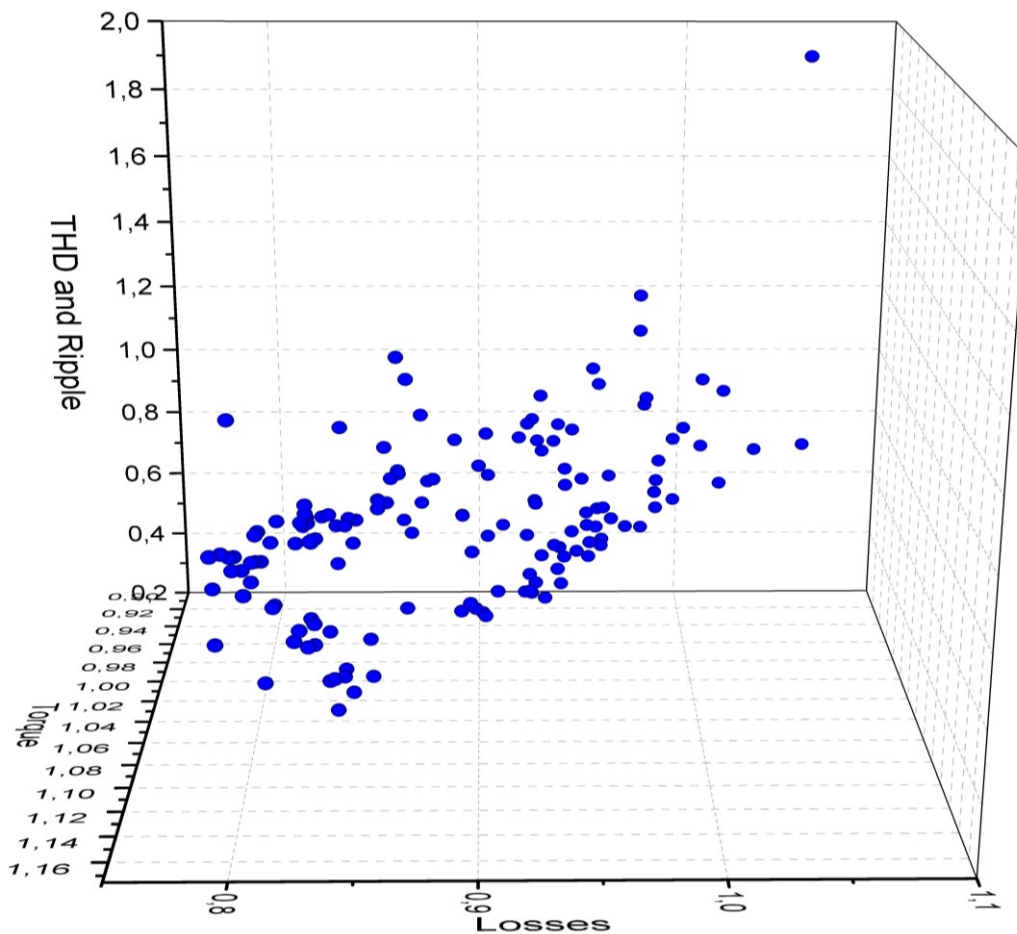
$$\min(\overline{F_o(x)}), \overline{F_o} = [F_{o,1}, F_{o,2}, F_{o,3}] \quad (6-1)$$

$$x = [DCM, tw, tl, b, htp, DCT] \quad (6-2)$$

Υπό περιορισμούς που έχουν τεθεί για το x.

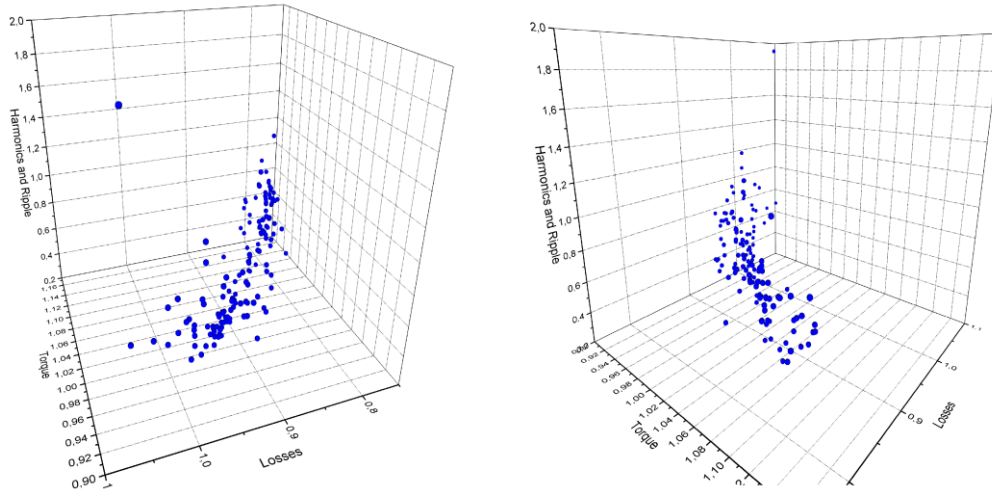
6.2 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης

Εφαρμόζοντας την βελτιστοποίηση ύστερα προέκυψε το ακόλουθο μέτωπο Pareto:

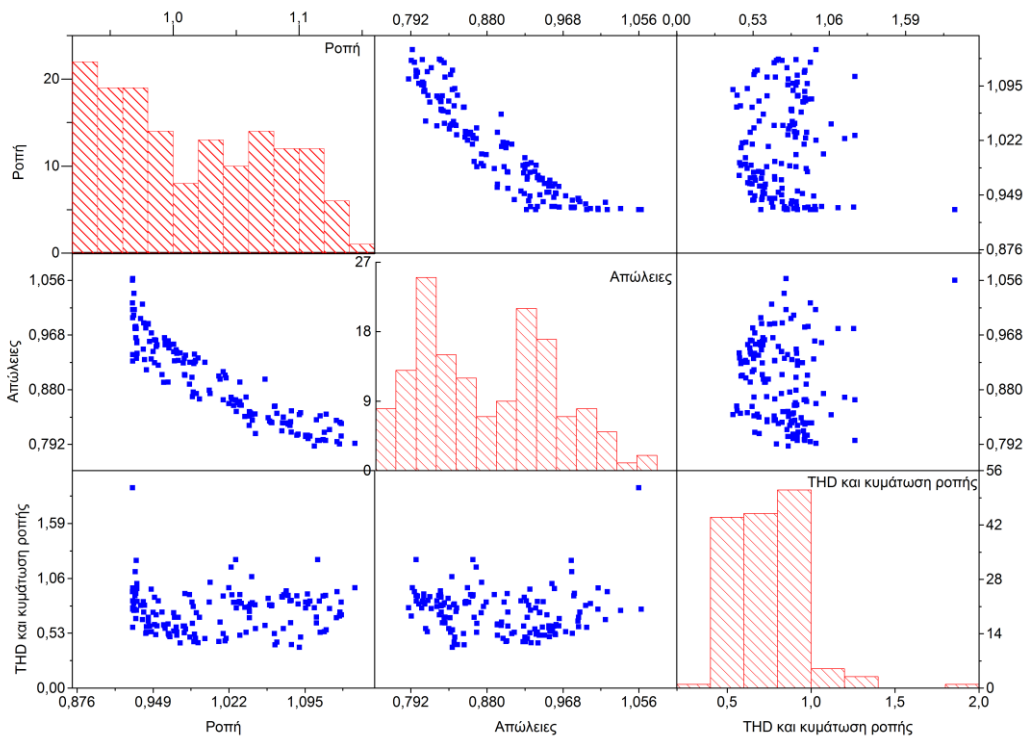


Σχήμα 6-7 Μέτωπο Pareto και προβολή των σημείων

Όπως φαίνεται το μέτωπο Pareto έχει την αναμενόμενη μορφή επιφάνειας, και είναι κοντά στο σύνορο των ελάχιστων τιμών όπως φαίνεται και από την προβολή στον άξονα xy. Στη συνέχεια παρατίθεται το μέτωπο Pareto υπό διαφορετικές οπτικές γωνίες για την καλύτερη κατανόηση της μορφής του, καθώς και τα ιστογράμματα και οι δισδιάστατες παραστάσεις μεταξύ των μεταβλητών.



Σχήμα 6-8 Μέτωπο Pareto υπό διαφορετικές οπτικές γωνίες



Σχήμα 6-9 Ιστογράμματα και δισδιάστατες παραστάσεις των αντικειμενικών συναρτήσεων

Από τα παραπάνω και ιδιαίτερα από τα ιστογράμματα, παρατηρούμε πως η τιμή βάσης της ροπής ήταν καλά επιλεγμένη, αφού οι τιμές του μετώπου Pareto έχουν πολύ μικρό εύρος διακύμανσης. Αντίθετα βλέπουμε πως οι βασικές τιμές της THD και της κυμάτωσης ροπής είχαν οριστεί «χαλαρά», αφού βλέπουμε πως έχουν προκύψει λύσεις με πολύ χαμηλότερη τιμή. Βέβαια το μεγάλο εύρος διακύμανσης των τιμών δείχνει πως είναι ευμετάβλητη η στοχική τους συνάρτηση. Τέλος παρατηρούμε πως όσον αφορά στις απώλειες, ήταν ελαφρώς χαλαρή η τιμή βάσης. Επίσης γίνεται εμφανής και η αντίφαση των κριτηρίων καθώς αυξάνοντας την επίδοση σε ένα κριτήριο, μειώνεται σε κάποιο άλλο και τούμπαλιν.

6.2.1 Επιλογή της καλύτερα συμβιβαστικής λύσης

Έχοντας το μέτωπο Pareto στη διάθεσή μας, επαφίεται στον σχεδιαστή, η λήψη της καλύτερα συμβιβαστικής λύσης. Βέβαια, σε κάθε περίπτωση έχουν προκύψει λύσεις με σαφέστατα ανώτερα χαρακτηριστικά από τα αρχικώς υπολογιζόμενα. Όμως, όπως σε κάθε πραγματικό και πρακτικό πρόβλημα, θα πρέπει να προκύψει μια μοναδική λύση. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει να εισαχθούν περισσότερα κριτήρια λήψης απόφασης.

Για τον λόγο αυτό, ανατρέχουμε στην εφαρμογή και τις απαιτήσεις που εκπορεύονται αυτής.

Όπως σε όλες τις αυτόνομες εφαρμογές ηλεκτρικής κίνησης, έτσι και στην ηλεκτροπρόωση δεδομένου πως η ενέργεια προέρχεται από μπαταρίες και ως εκ τούτου θεωρείται περιορισμένη. Ακόμα όμως και σε υβριδικά συστήματα, η απόδοση του κινητήρα πρέπει να είναι υψηλή, συνακόλουθα θα πρέπει οι απώλειες να είναι χαμηλές.

Όσον αφορά τις αρμονικές, καθώς τα ηλεκτρικά δίκτυα σε τέτοιες εφαρμογές είναι μικρά, και πιθανώς να μην υπάρχει διαχωρισμός ανάμεσα στον κινητήρα και τις υπόλοιπες συσκευές είναι θεμιτό οι αρμονικές της επαγόμενης αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης να παραμείνουν μικρές. Επιπλέον όσο αυξάνονται οι αρμονικές τόσο θα μειώνεται η απόδοση (λόγω υστέρησης και δινορρευμάτων), καθώς η συνεισφορά των αρμονικών και διάφορων φαινομένων που προκαλεί, έχει σε μεγάλο ποσοστό αμεληθεί.

Επίσης και η κυμάτωση της ροπής θα πρέπει να παραμείνει μικρή, προκειμένου να μην έχουμε πέρα από κοπωτικά φαινόμενα, και προβλήματα ακουστικής όχλησης, αλλά και όχλησης από δονήσεις (NVH).

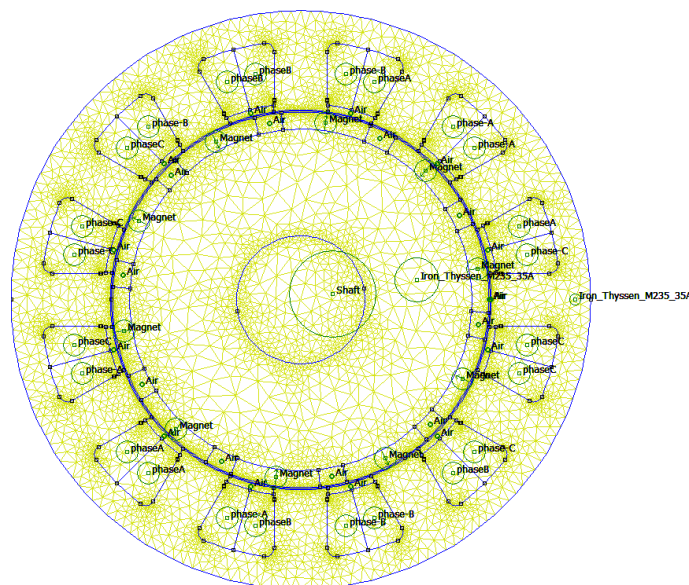
Τέλος πολύ σημαντική παράμετρος, όπως έχουμε ήδη τονίσει, είναι η τιμή της θεμελιώδους συνιστώσας της αντί-HEΔ. Όσο εγγύτερα κείται στη τιμή που υπολογίστηκε στις προδιαγραφές τόσο καλύτερη οδήγηση θα έχουμε, και συνακόλουθα βελτίωση της απόδοσης και της συμπεριφοράς του κινητήρα.

Τελικά, καθώς η ροπή παρουσιάζει μικρή διακύμανση, θα επιλεχτούν τοπολογίες με χαμηλότερες αρμονικές, χαμηλότερες απώλειες και τιμή αντι-HEΔ όσο το δυνατόν πλησιέστερα στα 30,6V.

Κατόπιν ανάλυσης των υποψήφιων λύσεων, με βάση τα παραπάνω κριτήρια, επιλέχθηκε για την τελική διαμόρφωση του κινητήρα η ακόλουθη καλύτερα συμβιβαστική λύση, από το μέτωπο Pareto:

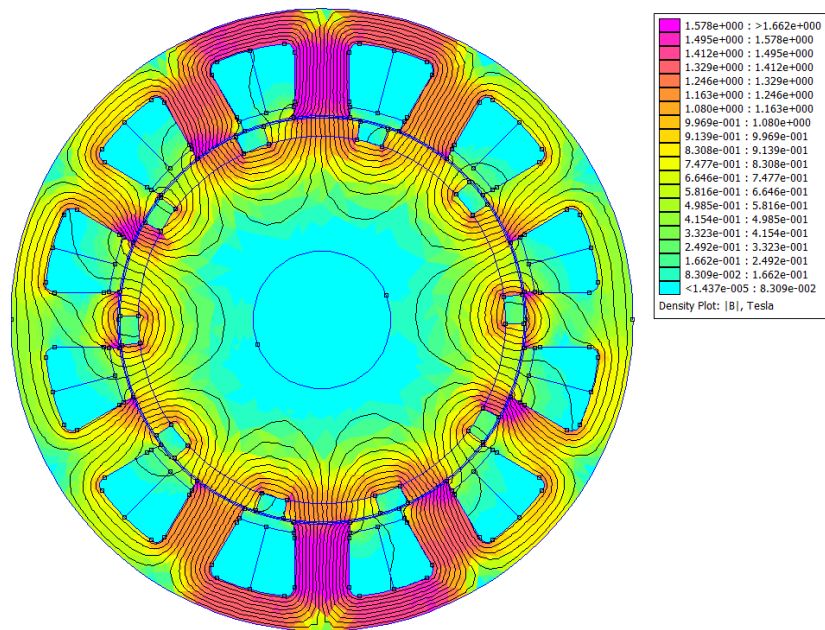
$$x^* = \begin{cases} DCM = 77\% \\ tw = 24 \text{ mm} \\ tl = 32.5 \text{ mm} \\ b = 2.23 \text{ mm} \\ htp = 4.5 \text{ mm} \\ DCT = 52\% \end{cases}$$

Η γεωμετρία που αντιστοιχεί σε αυτήν την λύση παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.



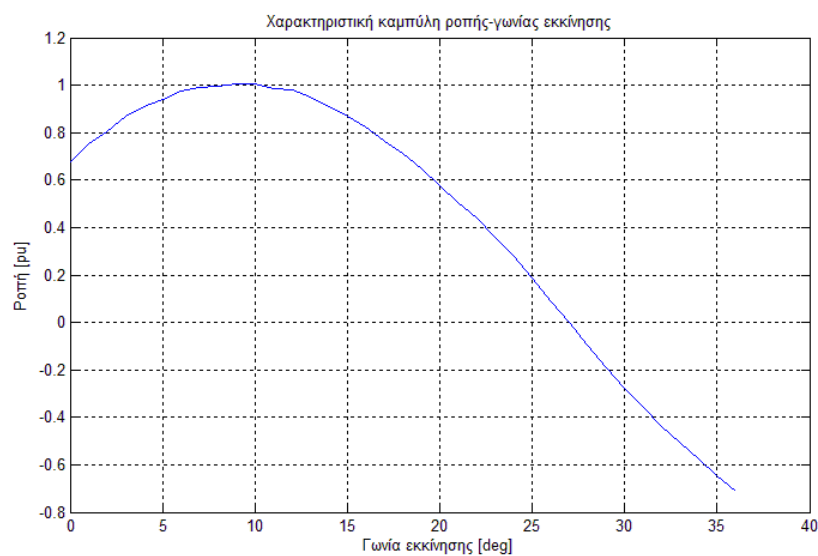
Σχήμα 6-10 Τελική διαμόρφωση κινητήρα

Παρουσιάζεται επίσης στιγμιότυπο του αποτελέσματος της ανάλυσης του κινητήρα:



Σχήμα 6-11 Στιγμιότυπο ανάλυσης τελικής γεωμετρίας κινητήρα

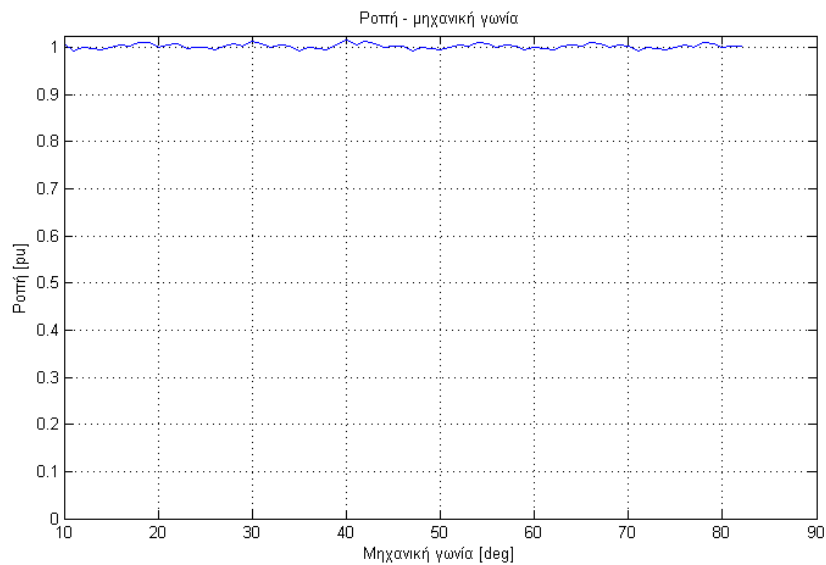
Στο ακόλουθο διάγραμμα, παρουσιάζεται η καμπύλη ροπής συναρτήσει της γωνίας εκκίνησης, κατά το στάδιο του προσδιορισμού της γωνίας εκκίνησης.



Σχήμα 6-12 Καμπύλη ροπής συναρτήσει γωνίας εκκίνησης τελικής γεωμετρίας

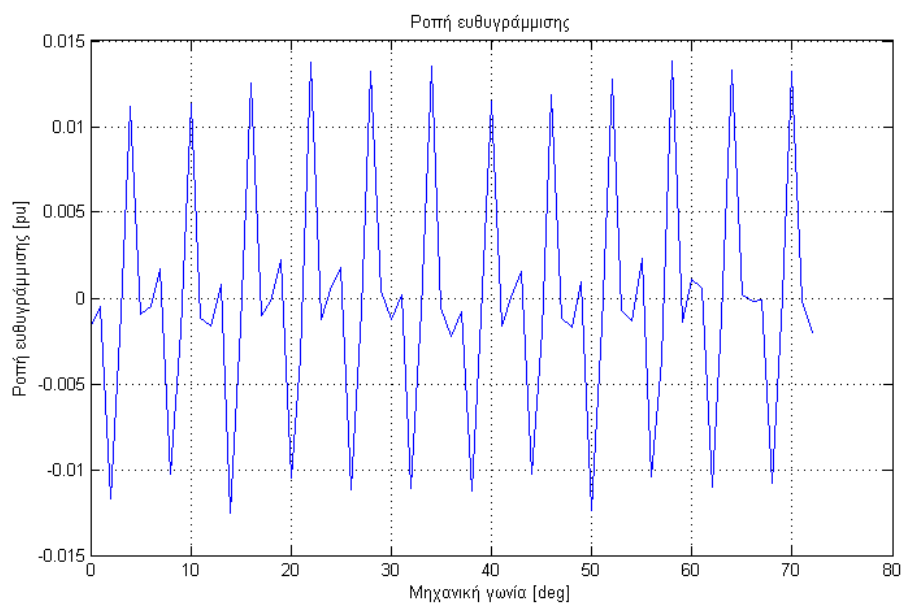
Όπως αναμενόταν η ροπή εκκίνησης μεγιστοποιείται για μια τιμή της γωνίας του δρομέα, και αυτή καθορίζεται ως γωνία εκκίνησης.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η καμπύλη ροπής συναρτήσει της μηχανικής γωνίας περιστροφής



Σχήμα 6-13 Διάγραμμα μηχανικής ροπής τελικής γεωμετρίας

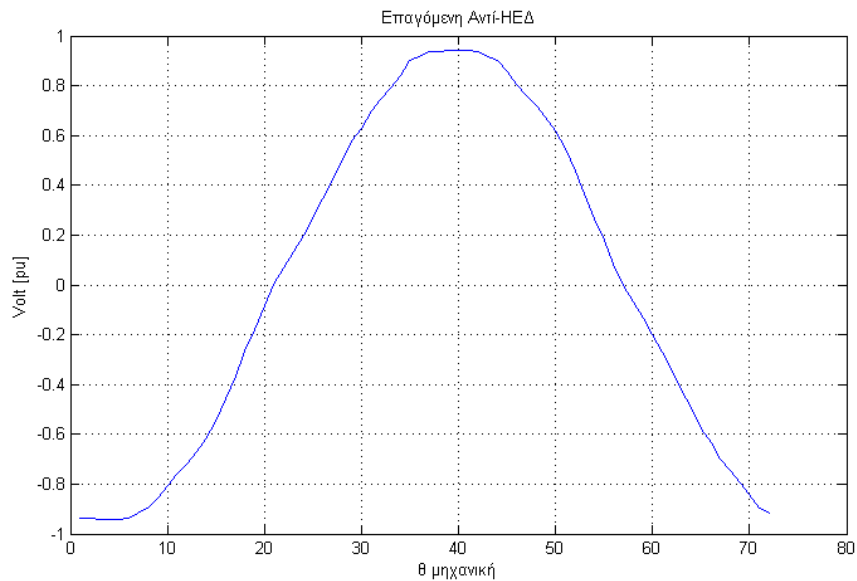
Όπως φαίνεται στο διάγραμμα η ροπή είναι σχεδόν σταθερή, με πολύ μικρή κυμάτωση. Συγκεκριμένα η κυμάτωση είναι μόλις 2.47%. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε την ροπή ευθυγράμμισης



Σχήμα 6-14 Ροπή ευθυγράμμισης τελικής γεωμετρίας

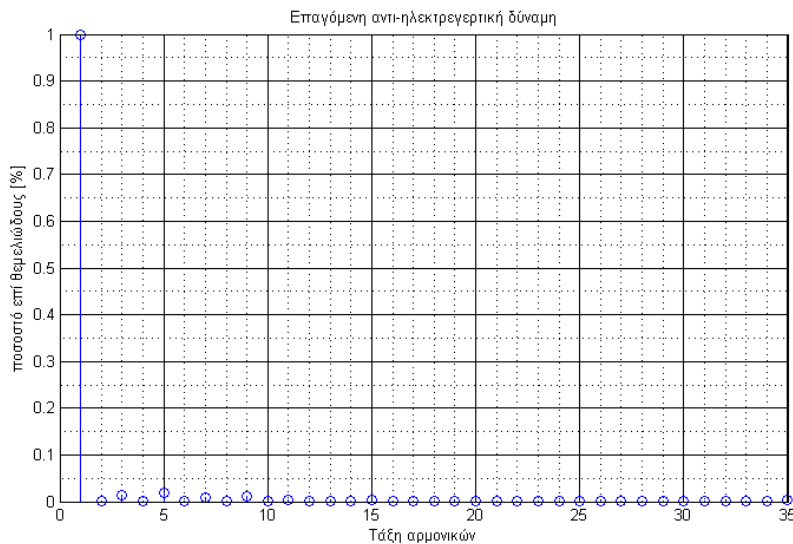
Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, η ροπή ευθυγράμμισης είναι πολύ μικρή με μέγιστη τιμή 1,38% της βασικής ροπής (160Nm), ή 2,2Nm.

Στη συνέχεια παρατίθεται η κυματομορφή της επαγόμενης αντι-ηλεκτρεγερτικής δύναμης του κινητήρα.



Σχήμα 6-15 Επαγόμενη HEΔ κινητήρα τελικής γεωμετρίας

Όπως φαίνεται και από την καμπύλη η HEΔ έχει καλή ημιτονική συμπεριφορά. Και η τιμή της είναι πολύ κοντά στο επιπρόσθετο κριτήριο που θεσπίστηκε και συγκεκριμένα $V_{pp} = 29.24 V$. Προς επαλήθευση της μικρής συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης, παραθέτουμε το φασματικό περιεχόμενο της επαγόμενης τάσης.



Σχήμα 6-16 Φασματική ανάλυση HEΔ τελικής γεωμετρίας

Η συνολική αρμονική παραμόρφωση που εμφανίζει η αναπτυσσόμενη αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι:

$$THD = 2.74\%$$

Καθώς η τιμή της συνολικής αρμονικής παραμόρφωσης είναι μικρή τα αποτελέσματα είναι αναμενόμενα. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούμε πως η κυρίαρχη συνιστώσα είναι η θεμελιώδης, ενώ οι ανώτερες είναι πολύ μικρότερες. Επίσης όπως αναμενόταν, οι ζυγές αρμονικές απουσιάζουν. Βλέπουμε λοιπόν, πως η αρμονική παραμόρφωση οφείλεται στις περιττές αρμονικές και κυρίως στην 3^η και 5^η. Αυτό ήταν αναμενόμενο λόγω των αρμονικών χώρου, που οφείλονται στο τύλιγμα και εμφανίζουν κυρίαρχη συνιστώσα $\frac{p}{2}$ τάξης, δηλαδή εν προκειμένω 5^{ης} τάξης. Συνεπώς εξηγείται το γεγονός πως η κυρίαρχη ανώτερη συνιστώσα είναι η 5^η. αρμονική.

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στα μεγέθη απόδοσης και επίδοσης της μηχανής.

Η μέση ροπή προέκυψε: $P_{mean} = 160.4 \text{ N} \cdot \text{m}$

Οι απώλειες χαλκού: $P_{Cu} = 384.71 \text{ Watt}$

Οι απώλειες πυρήνα: $P_{Fe} = 24.22 \text{ Watt}$

Οι απώλειες τριβών και ανεμισμού: $P_{fr} + P_{windage} = 20.68 \text{ Watt}$

Οι απώλειες μαγνήτη: $P_{magnet} = 10.98 \text{ Watt}$

Η μηχανική ισχύς: $P_{mech} = 8869 \text{ Watt}$

Βάσει των προηγούμενων η απόδοση εκτιμάται $n = 95\%$

Η απόδοση αυτή έχει προκύψει αμελώντας τις επιπλέον απώλειες που προκαλούνται λόγω των αρμονικών χρόνου του ρεύματος, λόγω του αντιστροφέα, καθώς και αρκετά άλλα φαινόμενα όπως έχουν αναφερθεί εκτενέστερα στα αντίστοιχα εδάφια περί απωλειών.

Σε κάθε περίπτωση η απόδοση όπως υπολογίζεται στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ως ένα μέτρο, βελτίωσης της σχεδίασης του κινητήρα και σε καμία περίπτωση ως η αναμενόμενη απόδοση του κινητήρα. Αυτό συμβαίνει γιατί όλες οι

σχεδιάσεις λαμβάνουν χώρα υπό καθεστώς *ceteris paribus*, συνακόλουθα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ακόμα, εν γένει αντικειμενικό, κριτήριο βελτιστοποίησης.

Ακολούθως αναφέρουμε τις υπολογιζόμενες τιμές της αυτεπαγωγής ευθέως και εγκάρσιου άξονα:

$$L_d = 0.1838 \text{ mH}$$

$$L_q = 0.1838 \text{ mH}$$

Όπως ήταν αναμενόμενο οι τιμές είναι ίσες, καθώς δεν εμφανίζει εκτυπότητα η τοπολογία.

Επίσης η υπολογιζόμενη αντίσταση ανά φάση όπως υπολογίστηκε είναι:

$$R_s = 0.0058 \text{ Ohm}$$

Τέλος αναφερόμαστε και σε κάποια άλλα στοιχεία:

Συνολικό βάρος μηχανής: $M_{motor} = 29.63 \text{ kg}$

Βάρος στάτη: $M_{stator} = 12.817 \text{ kg}$

Βάρος δρομέα: $M_{rotor} = 12.38 \text{ kg}$

Βάρος χαλκού: $M_{copper} = 3.831 \text{ kg}$

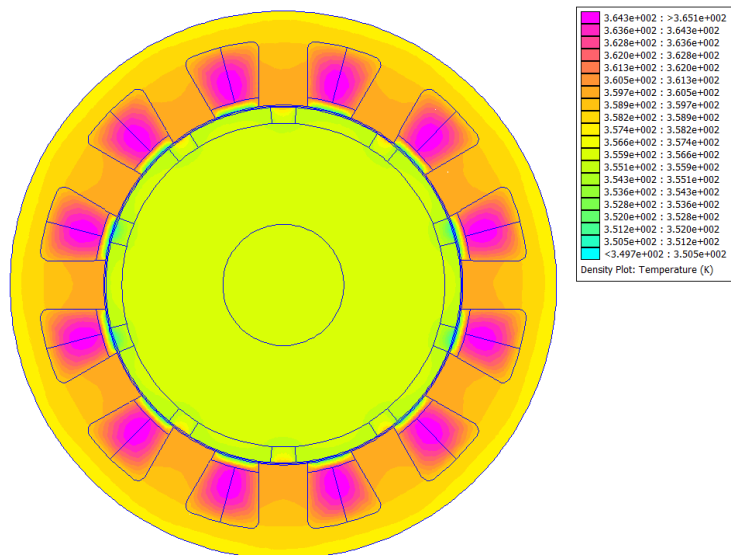
Συνολικό βάρος μαγνητών: $M_{magnet} = 598 \text{ gr}$

Συνολικός όγκος μηχανής: $Vol_{motor} = 0.0046142 \text{ m}^3$

Αδράνεια δρομέα: $Inertia = 337.4894 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Επιφάνεια αύλακας: $A_{slot} = 893.75 \text{ mm}^2$

Στο Σχήμα 6-17 φαίνεται η θερμική ανάλυση του κινητήρα:

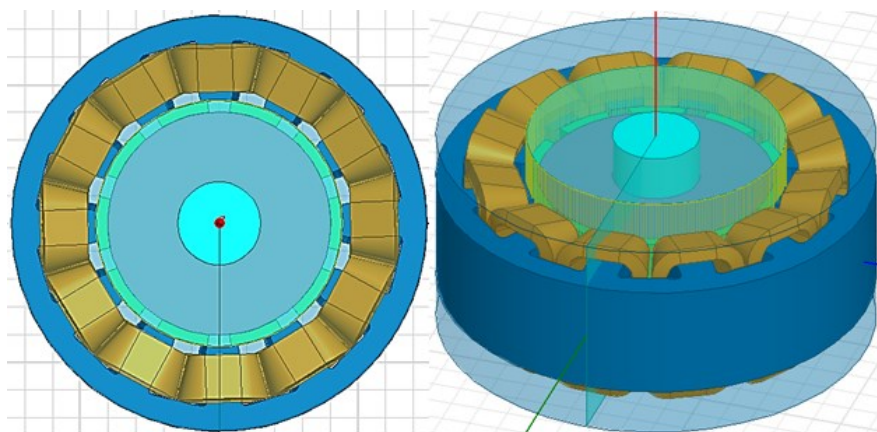


Σχήμα 6-17 Θερμική ανάλυση τελικής γεωμετρία κινητήρα

Από τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης μπορούμε να συμπεράνουμε τα ακόλουθα:

- Ο κινητήρας λειτουργεί σε αποδεκτά επίπεδα θερμοκρασίας. Έχουμε μέση θερμοκρασία τυλίγματος περί τους 90°C και μέση θερμοκρασία μαγνητών περί τους 80°C.
- Οι μαγνήτες λειτουργούν αρκετά μακριά από την κρίσιμη τιμή τους ($T_{cr} \approx 150^\circ\text{C}$). Συνεπώς ακόμα και αρκετά να έχουν υποεκτιμηθεί οι συνολικές απώλειες δύσκολα θα προσεγγίσει την κρίσιμη περιοχή, ακόμα και σε φορτίο πάνω από το ονομαστικό.
- Το απαιτούμενο σύστημα ψύξης κείται στα όρια μεταξύ φυσικής ψύξης με αέρα και εξαναγκασμένης. Λαμβάνοντας υπόψιν τα φαινόμενα που έχουν αμεληθεί και την αναπόφευκτη αύξηση των απωλειών, προτιμητέο σύστημα ψύξης είναι η εξαναγκασμένη ροή αέρα που μας δίνει και περαιτέρω δυνατότητες υπερφόρτισης και γενικά αυξημένη αξιοπιστία. Αυτό ήταν εν μέρει αναμενόμενο λόγω της αυξημένης ειδικής φόρτισης και λόγω της αυξημένης πυκνότητας ρεύματος.
- Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι υψηλότερη από την αναμενόμενη, συνεπώς θα πρέπει να αναθεωρήσουμε τις απώλειες χαλκού συνυπολογίζοντας την αύξηση της θερμοκρασία που αυξάνει την αντίσταση τυλίγματος. Αυτό με την σειρά του οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση της αναμενόμενης θερμοκρασίας. Εναλλακτικά θα πρέπει να βελτιώσουμε το σύστημα ψύξης.

Παρατίθεται επίσης η τρισδιάστατη αναπαράσταση της τελικής γεωμετρίας στο πρόγραμμα MAXWELL:



Σχήμα 6-18 Τρισδιάστατη αναπαράσταση τελικής γεωμετρίας από διαφορετικές όψεις

6.3 Σύγκριση αρχικής και τελικής γεωμετρίας

Όπως έχει ήδη γίνει φανερό η τελική γεωμετρία διαφέρει από την αρχική προσέγγιση, και εν γένει έχει καλύτερα χαρακτηριστικά. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζεται η σύγκριση αρχικής και τελικής γεωμετρίας καθώς και η βελτίωση ή όχι του εκάστοτε μεγέθους:

Κριτήριο	Αρχική	Τελική	Βελτίωση
Μέση ροπή	157.6 Nm	160,4Nm	ΝΑΙ
Κυμάτωση ροπής	6.16%	2.47%	ΝΑΙ
THD	8%	2.74%	ΝΑΙ
Απώλειες χαλκού	420.45 Watt	384.71 Watt	ΝΑΙ
Απώλειες πυρήνα	23.96 Watt	24.22 Watt	ΟΧΙ
Πλάτος θεμελιώδης συνιστώσας τάσης	28,73 V	29.24 V	ΝΑΙ
Απώλειες τριβών και ανεμισμού	21 Watt	20.68 Watt	ΝΑΙ
Απώλειες μαγνήτη	11.84 Watt	10,98 Watt	ΟΧΙ
Απόδοση	94.8%	95%	ΝΑΙ

Πίνακας 6-3 Σύγκριση αρχικής και τελικής γεωμετρίας

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω πίνακα, η προκύπτουσα γεωμετρία υπερτερεί στα περισσότερα κριτήρια, αν και σε κάποια οριακά, ενώ υπολείπεται σε λίγα οριακά όμως. Ο σκοπός του πίνακα δεν είναι να αναδείξει την υπεροχή της τελικής γεωμετρίας όσο να αναδείξει την αντικρουόμενη φύση των κριτηρίων.

Βέβαια αυτό γίνεται και εποπτικά από το σύνολο Pareto, αλλά εδώ μπορεί να φανούν κάποια στοιχεία παραπάνω. Προκειμένου να γίνει πιο εύληπτο θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της τελικής επιλεγείσας γεωμετρίας, με αυτά μιας άλλης από το μέτωπο Pareto που όμως δεν προτιμήθηκε στον Πίνακα 6-4.

Κριτήριο	Υποψήφια από το μέτωπο Pareto	Τελική	Βελτίωση
Μέση ροπή	161.6 Nm	160,4Nm	OXI
Κυμάτωση ροπής	3.5%	2.47%	NAI
THD	3.43%	2.74%	NAI
Απώλειες χαλκού	388.7 Watt	384.71 Watt	NAI
Απώλειες πυρήνα	25.0 Watt	24.22 Watt	NAI
Πλάτος θεμελιώδης συνιστώσας τάσης	30.17 V	29.24 V	OXI
Απώλειες τριβών και ανεμισμού	20.73 Watt	20.68 Watt	NAI
Απώλειες μαγνήτη	11.23 Watt	10,98 Watt	NAI
Απόδοση	95.25%	95%	OXI

Πίνακας 6-4 Σύγκριση τελικής γεωμετρίας με άλλη μη-κυρίαρχη από το μέτωπο Pareto

Βλέπουμε λοιπόν πως στα βασικά κριτήρια, υπάρχει μια έντονη αντίφαση. Έτσι αυξήθηκε η ροπή, αλλά είχαμε χειρότερη κυμάτωση και αρμονική παραμόρφωση, καθώς και απώλειες. Σε κάθε περίπτωση αυτό επεξηγεί την λογική που διέπει το σύνολο Pareto, με άλλα λόγια γίνεται άμεσα αντιληπτός ο ορισμός των σημείων που ανήκουν στο μέτωπο Pareto ως τα σημεία που βελτιώνοντας μια στοχική συνάρτηση οδηγεί σε μείωση σε τουλάχιστον μια εκ των υπόλοιπων.

6.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων ως προς την εφαρμογή

Έχοντας καταλήξει στην σχεδίαση αξίζει να γίνει μια σύγκριση μεταξύ θερμικού και ηλεκτρικού κινητήρα.

Δεδομένου πως ο ηλεκτρικός κινητήρας θα αντικαταστήσει θερμικούς μεταξύ 20-30 hp ένα ενδεικτικό βάρος και όγκος τέτοιων είναι: 150kg και 200 λίτρα αντίστοιχα. Για τον κινητήρα εκτιμάται πως ο τελικός απαιτούμενος όγκος και βάρος με το σύστημα ψύξης, το προστατευτικό κέλυφος, τις εδράσεις κτλ θα είναι περίπου 40kg και 20λίτρα.

Άμεσο συμπέρασμα είναι πως η μείωση βάρους και όγκου του κινητήρα είναι θεαματική. Βέβαια στην πράξη καθώς τροφοδοτείται είτε από μπαταρίες είτε από γεννήτρια, προκειμένου να υπερτερεί και σε αυτό τον τομέα θα πρέπει το σύστημα οδήγησης, οι μπαταρίες με τα καλώδια και τα συστήματα προστασίας και τροφοδοσίας να έχουν συγκρίσιμο όγκο και μάζα με τη διαφορά όγκου και μάζας των κινητήρων. Κάτι τέτοιο με τις υπάρχουσες πυκνότητες ενέργειας των μπαταριών δεν είναι εφικτό. Παρ' όλα αυτά, δεδομένης της προόδου που συντελείται σε αυτό τον τομέα καθώς και της προόδου των μαγνητών και υλικών των κινητήρων, είναι αρκετά πιθανό πως στο μέλλον η ηλεκτρική τοπολογία θα υπερτερεί και σε αυτό τον τομέα.

Σε κάθε περίπτωση η χρήση της ηλεκτρικής πρόωσης παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον καθώς αν συνυπολογιστεί η δυνατότητα αύξησης των υδροδυναμικών αποδόσεων, καθώς και η ικανότητα ανάκτησης ενέργειας που σε ορισμένες εφαρμογές μπορεί να είναι συγκρίσιμη με την καταναλισκόμενη, η ηλεκτρική πρόωση δύναται να καταστεί μια βιώσιμη, οικονομικά συμφέρουσα μακροπρόθεσμα και περιβαλλοντικά φιλική λύση.

Κεφάλαιο 7ο. Συμπεράσματα

7.1 Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η σχεδίαση και βελτιστοποίηση ηλεκτροκινητήρα ισχύος 9kW, για εφαρμογή ηλεκτρικής πρόωσης σκάφους και συγκεκριμένα ιστιοφόρου. Σε πρώτο βήμα έπρεπε να γίνει μια εκτενής μελέτη που αφορούσε τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του σκάφους και της πρόωσης προκειμένου να καθοριστούν οι βασικές προδιαγραφές του κινητήρα. Αφού λήφθηκαν οι βασικές προδιαγραφές μέσω προγράμματος υδροδυναμικής ανάλυσης και μελέτης του συστήματος πρόωσης, σχεδιάστηκε ένας 10πολικός κινητήρας επιφανειακών μόνιμων μαγνητών με συγκεντρωμένο τύλιγμα κλασματικού βήματος, ταχύτητας 530 στροφών ανά λεπτό. Εν συνεχεία αναπτύχθηκε ρουτίνα παραμετροποιημένης προκαταρκτικής μελέτης και παραμετροποιημένης σχεδίασης και επεξεργασίας που θα χρησιμοποιούνταν στη βελτιστοποίηση. Εν συνεχεία κατόπιν ενδελεχούς μελέτης της θεωρίας βελτιστοποίησης επιλέχθηκε ο εξελικτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης SPEA2 και υλοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB. Αφού επιλέχθηκαν μέσω αναλύσεων ευαισθησίας οι σταθερές και οι παράμετροι σχεδίασης (DCM, tw, tl, b, hp, DCT) και ορίστηκαν οι στοχικές συναρτήσεις, εφαρμόσαμε τον αλγόριθμο στο πρόβλημα ελαχιστοποίησης και πήραμε το μέτωπο Pareto. Τέλος, από το μέτωπο Pareto, εισάγοντας μερικά επιπρόσθετα κριτήρια προέκυψε η τελική σχεδίαση ως η καλύτερα συμβιβαστική λύση του προβλήματος. Τέλος αναφέραμε τα βασικά ηλεκτρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, ενώ καθορίσαμε και το σύστημα ψύξης από την θερμική ανάλυση. Αναφέρουμε κατηγοριοποιημένα τα συμπεράσματα εκπορεύονται.

Όσον αφορά την ανάλυση και σχεδίαση του κινητήρα:

- Η προκαταρκτική σχεδίαση, μολονότι έχει αποκλίσεις συνιστά ένα καλό σημείο εκκίνησης σχεδιασμού, ιδιαίτερα όσον αφορά στις γεωμετρικές διαστάσεις. Επιπρόσθετα η χρήση πιο σύνθετων σχέσεων υπολογισμού θα βελτιώσει περαιτέρω την ακρίβεια.

- Το συγκεντρωμένο τύλιγμα κλασματικού βήματος αποδίδει καλή αρμονική συμπεριφορά στους κινητήρες εφόσον γίνει σωστή επιλογή του αριθμού πόλων και αυλάκων.
- Η γεωμετρία δοντιών-αύλακας έχει μεγάλη επίπτωση στις αρμονικές και στην κυμάτωση ροπής.
- Η απόδοση των κινητήρων μόνιμων μαγνητών είναι υψηλή, ακόμα και αν συνυπολογίσουμε τις επιπλέον απώλειες που αναμένονται.
- Η θερμική ανάλυση μπορεί να καθορίσει το σύστημα ψύξης καθώς και να επιβεβαιώσει την αρχική σχεδίαση ή να οδηγήσει σε τροποποιήσεις και σε αναπροσαρμογές των μεγεθών.
- Η παραμετροποιημένη σχεδίαση και η αυτοματοποιημένη μετεπεξεργασία διευκολύνει και επιταχύνει σημαντικά την ανάλυση, ενώ δημιουργούνται και νέες δυνατότητες ανάλυσης.

Όσον αφορά στο κομμάτι της βελτιστοποίησης

- Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι δίνουν καλά αποτελέσματα και ταιριάζουν με τις εφαρμογές βελτιστοποίησης ηλεκτρικών μηχανών.
- Το υπολογιστικό κόστος και ο χρόνος της βελτιστοποίησης είναι ακόμα υψηλό, όμως η δυνατότητα παράλληλης επεξεργασίας βελτιώνει σημαντικά αυτή την παράμετρο.
- Η υβριδική SPEA συνιστά έναν εύρωστο, αμερόληπτο, ευπροσάρμοστο αλγόριθμο με καλή ταχύτητα και ικανότητα σύγκλισης.
- Η χρήση ουσιωδών περιορισμών βελτιώνει το υπολογιστικό κόστος της βελτιστοποίησης.
- Η βελτιστοποίηση ως διαδικασία δεν δίνεται να αποφανθεί απόλυτα αντικειμενικά και μηχανιστικά καθώς η τελική απόφαση επαφίεται στον μελετητή και σε πρόσθετα κριτήρια που εισάγουν υποκειμενικότητα στην λήψη απόφασης. Άλλωστε, οι στοχικές συναρτήσεις είναι εγγενώς υποκειμενικές αφού καθορίζεται από τον μελετητή.
- Η λήψη της τελικής απόφασης πρέπει να βασίζεται σε όσο το δυνατόν πιο ισχυρά και αντικειμενικά κριτήρια.

Τέλος όσον αφορά τη σχεδίαση του συστήματος πρόωσης προκύπτει πως:

- Οι κινητήρες μόνιμων μαγνητών προσφέροντας υψηλή πυκνότητα ισχύος και ροπής, συνιστούν μια εναλλακτική λύση σε εφαρμογές όπου ως τώρα γίνονταν σχεδόν αποκλειστική χρήση θερμικών κινητήρων.
- Οι ηλεκτρικοί κινητήρες έχουν χαρακτηριστικά που συνάδουν με βελτιστοποίηση των υδροδυναμικών μεγεθών που είναι και τα πιο σημαντικά στη συνολική απόδοση.
- Αν υπάρξει μείωση του κόστους αποθήκευσης ενέργειας, καθώς και του απαιτούμενου όγκου, η ηλεκτρική πρόωση θα συνιστά μια ανώτερη σχεδόν από κάθε κριτήριο εναλλακτική πρόταση πρόωσης.
- Για την ορθή σχεδίαση και βελτιστοποίηση της συνολικής τοπολογίας απαιτείται μια σφαιρική προσέγγιση, με στοιχεία από πολλές επιστήμες (multidisciplinary approach), ώστε το αποτέλεσμα να είναι βέλτιστο ολικά και να μην περιορίζεται στα πλαίσια της ηλεκτρικής σκοπιάς.

7.2 Σημεία προαγωγής της επιστήμης

Η συνεισφορά της παρούσας εργασίας στην προαγωγή της επιστήμης έγκειται στα παρακάτω σημεία:

- ❖ Ανάπτυξη μεθοδολογίας, διεπιστημονικής προσέγγισης στην σχεδίαση ηλεκτρικών κινητήρων για εφαρμογές ηλεκτρικής πρόωσης, με χρήση εργαλείων υδροδυναμικής ανάλυσης και εφαρμογή της σε ηλεκτρικό κινητήρα.
- ❖ Ολοκληρωμένη διαδικασία σχεδίασης, βελτιστοποίησης με βάση ηλεκτρικές, μηχανικές και θερμικές αναλύσεις και κριτήρια.
- ❖ Δημιουργία ρουτίνας παραμετροποιημένης σχεδίασης και πλήρως αυτοματοποιημένης επεξεργασίας και ανάλυσης των αποτελεσμάτων ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.
- ❖ Ανάπτυξη εξελικτικού αλγορίθμου τρίτης γενιάς, βασισμένο στον εξελικτικό αλγόριθμο ισχύος SPEA2 για επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης, με

δυνατότητα παράλληλης επεξεργασίας. Σημειώνεται πως ο αλγόριθμος έχει γενική εφαρμογή και δε περιορίζεται στη παρούσα εφαρμογή.

- ❖ Πρόταση τοπολογίας συστήματος πρόωσης, με αξονικό κινητήρα μόνιμων επιφανειακών μαγνητών, με κλασματικό τύλιγμα και είτε χρήση μετάδοσης κίνησης μέσω saildrive ώστε να υπάρχει η δυνατότητα χρήσης ελίκων υψηλότερης διαμέτρου και μεγαλύτερου βήματος αυξάνοντας την απόδοση, είτε τροποποίησης των γαστρών των ιστιοφόρων ώστε να μπορούν να αξιοποιήσουν την ικανότητα παραγωγής υψηλής ροπής σε χαμηλές στροφές που έχουν οι ηλεκτρικοί κινητήρες. Επιπλέον οι ηλεκτρικοί κινητήρες προσφέρουν καλύτερη ελικτικότητα, και χαμηλότερα επίπεδα θορύβου και κραδασμών. Η τροφοδοσία θα γίνεται μέσω συστοιχίας μπαταριών και τριφασικού αντιστροφέα.

7.3 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Με την περάτωση της παρούσας εργασίας αναδείχθηκαν τα παρακάτω θέματα που είναι σκόπιμο να διερευνηθούν περαιτέρω μελλοντικά.

Όσον αφορά την σχεδίαση του κινητήρα:

- Προσδιορισμός των παραμέτρων του δυναμικού μοντέλου του κινητήρα ή και όλης της τοπολογίας για μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς, της επίδρασης στο ηλεκτρικό δίκτυο του σκάφους και της συμπεριφοράς σε σφάλματα.
- Θερμική ανάλυση προκύπτουσας τοπολογίας.
- Συνδυασμένη ανάλυση αντιστροφέα και κινητήρα, για ρεαλιστική προσομοίωση της συμπεριφοράς του κινητήρα υπό πραγματικές συνθήκες.
- Κατασκευή και πειραματική επιβεβαίωση των χαρακτηριστικών του κινητήρα.

Για την εφαρμογή της ηλεκτροπρόωσης συνολικά:

- Διεπιστημονική προσέγγιση για την βέλτιστη επιλογή της επιλογής της προπέλας, που είναι μαζί με τη γάστρα η μεγαλύτερη συνιστώσα μείωσης της απόδοσης.

- Μελέτη της ικανότητας ανάκτησης ενέργειας, μέσω λειτουργίας της μηχανής ως γεννήτρια, και διερεύνηση δυνατότητας αυτόνομης πρόωσης.
- Διενέργεια συγκριτικής οικονομοτεχνικής μελέτης με τα θερμικά αντίστοιχα συστήματα, βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης.
- Σύγκριση της περιβαλλοντικής επίπτωσης της ηλεκτρικής πρόωσης, συγκρινόμενη με τη συμβατική θερμική (π.χ. εκπομπές NO_x , CO_2 , ενεργειακό αποτύπωμα κλπ)
- Διερεύνηση της δυνατότητας τροποποίησης του σχεδιασμού των προπελών αυξάνοντας την διάμετρο και το βήμα, και εισάγοντας τεχνολογίες μεταβολής βήματος και αναδίπλωσης ώστε αξιοποιηθούν στο μέγιστο οι δυνατότητες ανάκτησης ενέργειας και η ικανότητα των ηλεκτρικών κινητήρων να παράγουν υψηλή ροπή σε χαμηλές στροφές.
- Διερεύνηση της απόδοσης αυτόνομου συστήματος, με κινητήρα μόνιμων μαγνητών, μετάδοση τύπου saildrive και χρήση αναδιπλούμενης προπέλας μεταβλητού βήματος, μεγάλης διαμέτρου.

Τέλος όσον αφορά στη διαδικασία βελτιστοποίησης ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ακόλουθα:

- Θεώρηση επιπλέον κριτηρίων κατά τη βελτιστοποίηση των μηχανών καθώς και επιπλέον περιορισμών ιδιαίτερα μηχανικών και κατασκευαστικών που προηγούνται της χρονοβόρας ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων με στόχο την μείωση του υπολογιστικού κόστους και φυσικά την σχεδίαση υλοποιήσιμων μηχανών. Επιπλέον η εύρεση πρακτικών καλής σχεδίασης, θα μειώσει περαιτέρω το κόστος.
- Πλήρης εκμετάλλευση της ικανότητας παράλληλης επεξεργασίας που εισάχθηκε στην παρούσα εργασία, με στόχο όχι τόσο την μείωση του χρόνου επεξεργασίας, όσο την αύξηση της πολυπλοκότητας της ανάλυσης, πχ. ανάλυση και βελτιστοποίηση περισσότερων λειτουργικών καταστάσεων, αρμονική ανάλυση κοκ.
- Διερεύνηση χρήσης νευρωνικών δικτύων για προσέγγιση του πεδίου απόκρισης με λίγα σημεία.

- Διερεύνηση της χρήσης καμπυλών και επιφανειών αδιαφορίας, για την καλύτερη διάταξη και διασπορά των λύσεων.
- Μελέτη των μηχανισμών μετάλλαξης και διασταύρωσης και δυνατότητα εμφύσησης σ αυτούς μηχανισμών βασισμένων στην εκάστοτε τοπολογία, ώστε οι προκύπτοντες απόγονοι να έχουν αυξημένες πιθανότητες προσέγγισης του βέλτιστου, καθώς και βελτίωση της διασποράς.
- Διερεύνηση δυνατότητας χρήσης προσαρμοστικής συμπεριφοράς αλγορίθμου
- Διερεύνηση ικανότητας αυτόματης επιλογής βέλτιστης λύσης, με εισαγωγή δευτερευόντων κριτηρίων απόφασης.

Αναφορές

- [1] Ι. Χατζηγιάου, Ι. Προυσαλίδης, Γ. Αντωνόπουλος, Ι. Κ. Γύπαρης και Π. Βαλλιανάτος, «ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΡΩΣΗ ΠΛΟΙΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΖΗΤΗΜΑΤΩΝ,» σε *Ηλεκτροκίνητα μέσα μεταφοράς στην Ελλάδα – Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές*, ΤΕΕ, Αθήνα, 2006.
- [2] J. Lamden, «Hybrid Propulsion,» *The Reference Point*, pp. 6-11, 2012.
- [3] Α.-Δ. Πιτταράς, *Σχεδιασμός και μελέτη ηλεκτρογεννήτριας συνδεδεμένης στο αξονικό σύστημα πλοίου*, ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ, 2012.
- [4] B. A. Bassham, *AN EVALUATION OF ELECTRIC MOTORS FOR SHIP PROPULSION*, NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL Monterey, California, 2003.
- [5] R. Lateb, N. Takorabet, F. Meibody-Tabar, A. Mirzaian, J. Enon και Α. Sarribouette, *Performances comparison of induction motors and surface mounted PM motor for POD marine propulsion*, 2005.
- [6] Anders, M., 2009. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.hydronship.net/projects/id/65>.
- [7] J. Lambden, 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://electricboatdesign.com/>.
- [8] M. v. Engeland, *FREE!ship manual Version 2.6*, 2006.
- [9] C. Barry, *Propeller Selection For Boats and Small Ships*, 2005.
- [10] Wikipedia contributors, «Propeller (marine),» 10 September 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Propeller_\(marine\)&oldid=572390456](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Propeller_(marine)&oldid=572390456).
- [11] Ν. Σ. Μανιάς, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ, Αθήνα: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΕΩΝ, 2007.
- [12] M. H. RASHID, *POWER ELECTRONICS HANDBOOK*, ACADEMIC PRESS, 2001.
- [13] Γ. Σ. ΔΗΜΗΤΡΑΚΑΚΗΣ, *ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΔΙΑΡΡΕΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΥΨΙΣΥΧΝΑ ΡΕΥΜΑΤΑ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ*, Πάτρα: ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ, 2009.

- [14] F. Libert, *Design, Optimization and Comparison of Permanent Magnet Motors for a Low-Speed Direct-Driven Mixer*, Stockholm: Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering Electrical Machines and Power Electronics, 2004.
- [15] F. Meier, *Permanent-Magnet Synchronous Machines with Non-Overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications.*, Stockholm: Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering Electrical Machines and Power Electronics, 2008.
- [16] ThyssenKrupp, *Non grain oriented electrical steel Power Core®*, ThyssenKrupp Steel AG, 2013.
- [17] MAGCRAFT®, «PERMANENT MAGNET SELECTION AND DESIGN HANDBOOK,» National Imports LLC, 2007.
- [18] *NdFeB / Neodymium Data Sheet*, UK™, e-Magnets.
- [19] Α. Βήχος, *Σχεδίαση και βελτιστοποίηση κινητήρα μονίμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης*, Αθήνα, 2009.
- [20] J. Pyrhonen, T. Jokinen και V. Hrabovcova, *Design Of Rotating Electrical Machines*, John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- [21] R. Krishnan, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*, CRC Press, 2010.
- [22] D. Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, MAGNA PHYSICS PUBLISHING, 2003.
- [23] E. Sandra και B. Hans, *Loss evaluation and design optimization for direct driven permanent magnet synchronous generators for wind power*, ELSEVIER, 2011.
- [24] N. Bianchi, M. Barcaro και S. Bolognani, «Electromagnetic and Thermal Analysis of Permanent Magnet Synchronous Machines,» σε *Finite Element Analysis - From Biomedical Applications to Industrial Developments*, InTech, 2012, pp. 407-438.
- [25] D. Zarko, *A SYSTEMATIC APPROACH TO OPTIMIZED DESIGN OF PERMANENT MAGNET MOTORS WITH REDUCED TORQUE PULSATIONS*, UNIVERSITY OF WISCONSIN–MADISON, 2004.
- [26] R. Deeb, «Calculation of Eddy Current Losses in Permanent Magnets of Servo Motor,» σε *Electroscope EEICT 2011*, 2011.
- [27] J. F. Gieras, *Permanent magnet motor technology : design and applications*, CRC Press, 2010.

- [28] K. Krishna Murty, *EQUATION FOR WINDAGE LOSS OF AXIAL FLUX, A.C. 3 PHASE SYNCHRONOUS MOTOR*, University of Central Florida.
- [29] A. M. EL-Refaie, *Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges*, (IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2010.
- [30] N. B. Hadj, J. K. Kammoun, M. A. Fakhfakh, M. Chaieb και R. Neji, «A Comparative Thermal Study of Two Permanent Magnets Motors Structures with Interior and Exterior Rotor,» σε *Electric Vehicles - Modelling and Simulations*, InTech, 2011, pp. 333-346.
- [31] O. Wallmark, *Analysis of Electrical Machines FEM-Based Analysis of Induction Machines*, Stockholm: Laboratory of Electrical Energy Conversion Royal Institute of Technology, 2012.
- [32] D. Meeker, *Finite Element Method Magnetics: OctaveFEMM version 1.2*, 2009.
- [33] D. Meeker, «Iron Loss Calculation in PM synchronous machines,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.femm.info/wiki/CoreLossCalculation>.
- [34] Α. Δούκας, *Σύγκριση Απωλειών Πυρήνα Αμορφου Σιδήρου και Μαγνητικής Λαμαρίνας για Εφαρμογές Μηχανών Μονίμων Μαγνητών*, Αθήνα: ΕΜΠ, 2012.
- [35] R. Bargallo, J. Llaverias, A. De Blas, H. Martín και R. Piqué, «Main inductance determination in rotating machines. Analytical and Numerical calculation: A didactical approach».
- [36] L. Alberti, N. Bianchi και S. Bolognani, *A Modern Approach to the Analysis of Induction Motors*, Padova: Electric Drive Laboratory Department of Electrical Engineering University of Padova, 2009.
- [37] Κ.-Σ. Π. ΝΙΚΑΣ, *ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ*, ΝΙΚΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ-ΣΤΕΦΑΝΟΣ, 2010.
- [38] Α. Ευστρατιάδης, *Μη γραμμικές μέθοδοι σε πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης υδατικών πόρων, με έμφαση στη βαθμονόμηση υδρολογικών μοντέλων*, Αθήνα: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, 2008.
- [39] C. A. Coello Coello, G. B. Lamont και D. A. Van Veldhuizen, *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*, 2nd επιμ., Springer, 2007.
- [40] Γ. Κουμούσης, *ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ*, Αθήνα: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ, ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ, 2012.

- [41] E. Zitzler και L. Thiele, «An Evolutionary Algorithm for Multiobjective Optimization: The Strength Pareto Approach,» Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, 1998.
- [42] E. Zitzler, M. Laumanns και L. Thiele, «SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm,» Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, 2001.
- [43] M. Kim, T. Hiroyasu, M. Miki και S. Watanabe, «SPEA2+: Improving the Performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2,» σε *Parallel Problem Solving from Nature - PPSN VIII*, Birmingham, UK, 2004.
- [44] Wikipedia contributors , «Test functions for optimization,» 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Test_functions_for_optimization&ol did=543991631.
- [45] M. Yanmar, *Yanmar 3YM20 Series*, Yanmar Marine, 2013.
- [46] A. Reinap, *Design of Powder Core Motors*, Lund: Doctoral Dissertation in Industrial Electrical Engineering, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation. Lund University, 2004.
- [47] Mastervolt, 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.mastervolt.com/marine/>.
- [48] P. Marine, «Electric Drives for Boats: Electroprop up to 18 kW,» 2011. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.propulsionmarine.com/>.
- [49] HyMar, 2010. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.hymar.org/index.html>.
- [50] C. Dillow, «New Nanocomposite Magnets Could Reduce the Demand for Rare Earth Elements,» 21 January 2011. [Ηλεκτρονικό]. Available: <http://www.popsci.com/science/article/2011-01/new-nanocomposite-magnets-could-reduce-demand-rare-earth-elements>.
- [51] L. Bergh και U. Helldén, *Electrical systems in pod propulsion*, Göteborg: Department of Energy and Environment Division of Electric Power Engineering CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2007.
- [52] R. Bargallo, *FINITE ELEMENTS FOR ELECTRICAL ENGINEERING*, ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT EUTIB-UPC, 2006.
- [53] Wikipedia contributors, «Ferromagnetic material properties,» Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ferromagnetic_material_properties&oldid=544337081.