



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

**Σχεδιασμός και Μελέτη Εναλλακτικών Τοπολογιών
Σύγχρονου Κινητήρα Μαγνητικής Αντίστασης με
Εσωτερικούς Μόνιμους Μαγνήτες για Ηλεκτρικό Όχημα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Απόστολος Πιτσαρής

Επιβλέπων: Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2013



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

**Σχεδιασμός και Μελέτη Εναλλακτικών Τοπολογιών
Σύγχρονου Κινητήρα Μαγνητικής Αντίστασης με
Εσωτερικούς Μόνιμους Μαγνήτες για Ηλεκτρικό Όχημα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Απόστολος Πιτσαρής

Επιβλέπων: Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Α. Κλαδάς

.....
Σ. Μανιάς

.....
Σ. Παπαθανασίου

.....

Απόστολος Πιτσαρής

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

Copyright © Απόστολος Πιτσαρής, 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 ερμηνεύονται ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσοι με βοήθησαν κατά την εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή μου κ. Αντώνιο Κλαδά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την εργασία αυτή, για την καθοδήση που μου παρείχε κατά τη διαδικασία εκπόνησής της και κυρίως για τις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Μίνωα Μπενιακάρ που πρόθυμα με στήριξε σε όλα τα βήματα της σχεδίασης, όπως και στον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Αθανάσιο Σαρηγιαννίδη για τις πολύτιμες συμβουλές του.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω την εργασία αυτή στην οικογένειά μου, η οποία με στηρίζει όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο τη σχεδίαση ηλεκτρικού κινητήρα για εφαρμογή σε ηλεκτροκίνητο όχημα. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιείται μια διερεύνηση σε τέσσερις διαφορετικές γεωμετρίες δρομέα ενός σύγχρονου κινητήρα μαγνητικής αντίστασης με εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες. Τα κριτήρια με τα οποία συγκρίνονται οι τέσσερις γεωμετρίες είναι η επίδοση, η απόδοση και το κόστος των μονίμων μαγνητών του ηλεκτρικού κινητήρα.

Το πρώτο στάδιο της εργασίας περιλαμβάνει τη βιβλιογραφική διερεύνηση των ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων. Γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των υποσυστημάτων που αποτελούν το ηλεκτροκίνητο σύστημα ενός ηλεκτρικού οχήματος και των λειτουργιών τους. Παρουσιάζονται οι τύποι κινητήρων που χρησιμοποιούνται σε σημερινές εφαρμογές ηλεκτροκίνητων οχημάτων και αναλύεται η λειτουργία των σύγχρονων κινητήρων μαγνητικής αντίστασης.

Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιείται η προκαταρκτική σχεδίαση με αναλυτικές μεθόδους για τη βασική διαστασιολόγηση του συστήματος. Στο στάδιο αυτό προκύπτουν οι βασικές παράμετροι της τελικής σχεδίασης.

Στο τρίτο στάδιο περιγράφονται τα εργαλεία και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την πεδιακή ανάλυση της κάθε μηχανής. Χρησιμοποιώντας τα λογισμικά Matlab και FEMM επιτυγχάνεται η παραμετροποίηση της σχεδίασης και πραγματοποιείται η ανάλυση των μηχανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τέλος, γίνεται η παρουσίαση και η σύγκριση των αποτελεσμάτων και καταγράφονται τα τελικά συμπεράσματα από τη διαδικασία σχεδίασης.

Λέξεις Κλειδιά: Ηλεκτρικό όχημα, σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης, σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης με μόνιμους μαγνήτες, σύγχρονη μηχανή εσωτερικών μόνιμων μαγνητών, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.

Abstract

This thesis undertakes a comparative study on the design of electric vehicle motors concerning PM-assisted SynRM technologies. In the analysis undertaken, four different rotor topologies are considered. The criteria to compare the four geometries are the cost of the permanent magnets and the performance of the electric motor.

The first section of this thesis includes the literature investigation of electric drive systems. The subsystems which constitute the electric system of an electric vehicle and their functions are introduced. The types of engines used in current applications of electric vehicles are presented and the operating characteristics of synchronous reluctance machines are analyzed.

In the second section, the preliminary design with analytical methods is performed, taking into consideration typical electric and magnetic loadings. This initial geometrical configuration is further elaborated by using 2D finite element analysis.

In the third section, the tools and the methods used for the analysis of the electric field of the machine are described in detail. Four parametric designs (one model for each different rotor geometry) are developed using Matlab and FEMM, in order to perform a sensitivity analysis. Finally, there is the presentation and the comparison of the results and the final conclusions of the design process are recorded.

Key-words: Electric vehicle, synchronous reluctance machine, permanent magnet assisted synchronous reluctance machine, interior permanent magnet synchronous machine, finite element method

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	9
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	11
ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	15
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	23
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	23
1.1. Σκοπός της εργασίας	23
1.2. Δομή της εργασίας.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	25
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΌΧΗΜΑ.....	25
2.1. Ηλεκτρικό όχημα και αστικό περιβάλλον	25
2.2. Ιστορικό	27
2.3. Σύστημα κίνησης ηλεκτρικού οχήματος.....	29
2.4. Τύποι ηλεκτρικών κινητήρων για ηλεκτρικά οχήματα	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	35
ΒΑΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ	35
3.1. Αρχή λειτουργίας σύγχρονης μηχανής μαγνητικής αντίστασης	35
3.2. Τύποι γεωμετριών δρομέα.....	36
3.3. Μαθηματικό μοντέλο.....	39
3.3.1. Οι d και q εξισώσεις της σύγχρονης μηχανής μαγνητικής αντίστασης.....	39
3.3.2. Οι εξισώσεις μόνιμης κατάστασης για τον σύγχρονο κινητήρα μαγνητικής αντίστασης.....	40
3.3.3. Μιγαδικές εξισώσεις για τη σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης.....	41
3.3.4. Η εξίσωση της ροπής για λειτουργία με σταθερό V/f και σταθερό ρεύμα.....	41
3.3.5. Μέγιστος συντελεστής ισχύος	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	47
ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ.....	47
4.1. Διαδικασία σχεδίασης	47
4.2. Κατασκευαστικά υλικά ηλεκτρικών μηχανών.....	49
4.3. Προδιαγραφές συστήματος κίνησης.....	51
4.4. Θεμελιώδεις σχέσεις προκαταρκτικής σχεδίασης	53
4.4.1. Ειδική μαγνητική φόρτιση	53
4.4.2. Ειδική ηλεκτρική φόρτιση	53
4.4.3. Οριακή τάση διακένου	55

4.4.4. Πυκνότητα ρεύματος τυλίγματος.....	55
4.4.5. Προσδιορισμός ηλεκτρομαγνητικής ροπής	55
4.4.6. Αναλογία διαστάσεων D και L	56
4.4.7. Πάχος διακένου	57
4.5. Τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών.....	57
4.5.1. Διανεμημένο τύλιγμα.....	58
4.5.2. Συγκεντρωμένο τύλιγμα	58
4.5.3. Κλασματικό βήμα	59
4.5.4. Διπλή στρώση	59
4.6. Προσδιορισμός χαρακτηριστικών μηχανής	60
4.6.1. Διαστασιολόγηση διακένου.....	60
4.6.2. Συχνότητα λειτουργίας και αριθμός πόλων.....	62
4.6.3. Προσδιορισμός μεγεθών στάτη	62
4.6.4. Διατομή αυλακιού.....	63
4.6.5. Υπολογισμός ειδικών φορτίσεων.....	63
4.7. Προτεινόμενες γεωμετρίες δρομέα	64
4.7.1. Γεωμετρία δρομέα Α.....	64
4.7.2. Γεωμετρία δρομέα Β.....	65
4.7.3. Γεωμετρία δρομέα Γ	65
4.7.4. Γεωμετρία δρομέα Δ.....	66

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....69

ΟΡΙΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ

ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	69
5.1. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	69
5.1.1. Ενεργειακή συνάρτηση	70
5.1.2. Η διατύπωση των πεπερασμένων στοιχείων	71
5.1.3. Οριακές συνθήκες.....	74
5.1.4. Τεχνικές επίλυσης.....	75
5.1.5. Παράμετροι από το πεδίο	75
5.2. Παραμετροποίηση στάτη	77
5.2.1. Πλήθος αυλάκων στάτη	77
5.2.2. Γεωμετρικές παράμετροι των δοντιών και του σώματος του στάτη	78
5.3. Παραμετροποίηση δρομέα.....	80
5.3.1. Πλήθος φραγμάτων μαγνητικής ροής	80
5.3.2. Γεωμετρικές παράμετροι των φραγμάτων μαγνητικής ροής και των μονίμων μαγνητών.....	80
5.4. Απώλειες χαλκού.....	85
5.4.1. Εκτίμηση ωμικής αντίστασης τυλίγματος.....	85
5.5. Απώλειες πυρήνα.....	86
5.5.1. Απώλειες υστέρησης.....	87
5.5.2. Απώλειες δινορρευμάτων	88
5.5.3. Απώλειες δινορρευμάτων στους μαγνήτες	88
5.6. Υλικά.....	89
5.6.1. Σιδηρομαγνητική λαμαρίνα.....	89
5.6.2. Μόνιμοι μαγνήτες.....	91
5.7. Πεδιακή ανάλυση.....	93

5.7.1. Προτεινόμενη γεωμετρία δρομέα Α (Μηχανή Α)	95
5.7.2. Προτεινόμενη γεωμετρία δρομέα Β (Μηχανή Β)	103
5.7.3. Προτεινόμενη γεωμετρία δρομέα Γ (Μηχανή Γ)	108
5.7.4. Προτεινόμενη γεωμετρία δρομέα Δ (Μηχανή Δ)	113
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	119
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	119
6.1. Σύγκριση αποτελεσμάτων	119
6.1.1. Επίδοση	119
6.1.2. Κυμάτωση ροπής	120
6.1.3. Ημιτονικότητα ΗΕΔ	121
6.1.5. Απώλειες	123
6.1.6. Ποσότητα μαγνήτη	124
6.2. Συμπεράσματα	126
6.3. Σημεία προαγωγής της επιστήμης	128
6.4. Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση	128
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	129
ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΗΧΑΝΩΝ	129
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	131
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΒΑΣΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ	131
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	133

Λίστα Σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 2.1. ΔΙΑΦΗΜΙΣΗ ΤΟΥ 1920 ΕΝΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ ΤΗΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ DETROIT ELECTRIC.....	27
ΣΧΗΜΑ 2.2. ΤΟ EV1 (1996) ΤΗΣ GENERAL MOTORS ΜΕ ΙΣΧΥ ΕΞΟΔΟΥ 137 ΗΡ ΣΤΙΣ 7000 RPM.....	28
ΣΧΗΜΑ 2.3. ΣΗΜΕΡΙΝΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ (2011) ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ ΑΠΟ ΤΗΝ AUDI. ΈΧΕΙ ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ (ΕΝΑΣ ΣΕ ΚΑΘΕ ΤΡΟΧΟ) ΟΙ ΟΠΟΙΟΙ ΠΑΡΑΓΟΥΝ 4500 Νm ΡΟΠΗ ΚΑΙ ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΔΙΑΝΥΣΕΙ 240 ΚΜ ΜΕ ΜΙΑ ΠΛΗΡΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.	28
ΣΧΗΜΑ 2.4. Η ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ NISSAN LEAF (2012).....	29
ΣΧΗΜΑ 2.5. ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΙΝΗΣΗΣ.	29
ΣΧΗΜΑ 2.6. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ.	30
ΣΧΗΜΑ 2.7. ΕΝΤΥΠΩΣΙΑΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΗΣ ΠΟΡΕΙΑΣ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ.	30
ΣΧΗΜΑ 2.8. ΤΟΜΗ ΜΙΑΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ.....	31
ΣΧΗΜΑ 2.9. ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ 182 ΗΡ ΤΟΥ BUICK LACROSSE.....	32
ΣΧΗΜΑ 2.10. ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΚΟΛΛΗΣΗ ΕΝΑ ΠΡΟΣ ΕΝΑ ΤΩΝ 400 ΚΟΜΜΑΤΙΩΝ ΜΟΝΙΜΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ (CHEVROLET SPARK 2013).....	32
ΣΧΗΜΑ 2.11. ΑΡΙΣΤΕΡΑ ΔΥΟ ΒΑΣΙΚΑ ΚΟΜΜΑΤΙΑ ΕΝΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ (SWITCHED RELUCTANCE MACHINE) ΚΑΙ ΔΕΞΙΑ Ο ΔΡΟΜΕΑΣ ΕΝΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ (SYNCHRONOUS RELUCTANCE MACHINE).....	33
ΣΧΗΜΑ 2.12. ΑΡΑΧΝΟΕΙΔΕΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ.....	34
ΣΧΗΜΑ 3.1. ΈΝΑ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΕ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ (ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ Α) ΚΑΙ ΕΝΑ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΜΕ ΙΣΟΤΡΟΠΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ (ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ Β) ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ Ψ.	35
ΣΧΗΜΑ 3.2. ΠΙΘΑΝΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΕΙΣ ΔΡΟΜΕΑ ΓΙΑ ΜΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ: Α) ΑΠΛΟΣ ΔΡΟΜΕΑΣ ΕΚΤΥΠΩΝ ΠΟΛΩΝ. Β) ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΚΟΣ ΔΡΟΜΕΑΣ ΑΞΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ. Γ) ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΚΟΣ ΔΡΟΜΕΑΣ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ.	36
ΣΧΗΜΑ 3.3. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΩΝ ΔΡΟΜΕΑ.	38
ΣΧΗΜΑ 3.4. Α) ΜΙΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΠΡΩΤΕΣ ΔΟΜΕΣ ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΚΟΥ ΔΡΟΜΕΑ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΩΝ. Β) Η ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΕΚΔΟΧΗ ΤΗΣ.	38
ΣΧΗΜΑ 3.5. ΔΙΠΟΛΙΚΟΣ ΣΥΓΧΡΟΝΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.....	39
ΣΧΗΜΑ 3.6. ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.....	40
ΣΧΗΜΑ 3.7. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ ΕΚΤΥΠΙΟΤΗΤΑΣ (Κ) ΕΝΟΣ ΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ.	44

ΣΧΗΜΑ 4.1. ΒΡΟΧΟΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ.	50
ΣΧΗΜΑ 4.2. MINI-BAN FORD TRANSIT.....	52
ΣΧΗΜΑ 4.3. ΒΑΣΙΚΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ.	53
ΣΧΗΜΑ 4.4. ΤΥΠΙΚΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΣΤΑΤΗ. Α) 24 ΑΥΛΑΚΙΑ, ΕΠΙΚΑΛΥΠΤΟΜΕΝΟ, ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΟ. Β) 12 ΑΥΛΑΚΙΑ, ΕΠΙΚΑΛΥΠΤΟΜΕΝΟ. Γ) 6 ΑΥΛΑΚΙΑ, ΜΗ ΕΠΙΚΑΛΥΠΤΟΜΕΝΟ, ΟΛΑ ΤΑ ΔΟΝΤΙΑ ΜΕ ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ. Δ) 6 ΑΥΛΑΚΙΑ, ΜΗ ΕΠΙΚΑΛΥΠΤΟΜΕΝΟ, ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ ΣΤΑ ΜΙΣΑ ΔΟΝΤΙΑ.....	58
ΣΧΗΜΑ 4.5. Α) ΠΛΗΡΕΣ ΒΗΜΑ. Β) ΚΛΑΣΜΑΤΙΚΟ ΒΗΜΑ.....	59
ΣΧΗΜΑ 4.6. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΡΟΜΕΑ Α.....	64
ΣΧΗΜΑ 4.7. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΡΟΜΕΑ Β.....	65
ΣΧΗΜΑ 4.8. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΡΟΜΕΑ Γ.....	66
ΣΧΗΜΑ 4.9. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΔΡΟΜΕΑ Δ.....	66
ΣΧΗΜΑ 5.1. ΈΝΑ ΤΡΙΓΩΝΙΚΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΜΕ ΑΛΛΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	72
ΣΧΗΜΑ 5.2. ΠΛΕΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΑΣΑΧΟΥΣΣΕΤΗΣ ΣΤΟ FEMM.....	73
ΣΧΗΜΑ 5.3. ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΣΤΑΤΗ ΜΕ 24 ΑΥΛΑΚΕΣ.....	78
ΣΧΗΜΑ 5.4. ΟΙ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΣΤΑΤΗ.....	78
ΣΧΗΜΑ 5.5. Α) ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΑΥΛΑΚΑΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ. Β) ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ ΑΥΛΑΚΑΣ ΟΠΩΣ ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΘΑ ΓΙΝΟΤΑΝ.....	80
ΣΧΗΜΑ 5.6. ΟΙ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ Α.....	81
ΣΧΗΜΑ 5.7. ΟΙ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ Β.....	81
ΣΧΗΜΑ 5.8. ΟΙ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ Γ.....	83
ΣΧΗΜΑ 5.9. ΟΙ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ Δ.....	83
ΣΧΗΜΑ 5.10. Α) ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΗ ΡΑΒΔΩΣΗ. Β) ΑΚΤΙΝΙΚΗ ΡΑΒΔΩΣΗ.....	84
ΣΧΗΜΑ 5.11. ΒΡΟΧΟΣ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ.....	87
ΣΧΗΜΑ 5.12. Β-Η ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΗΣ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΛΑΜΑΡΙΝΑΣ M235-35A ΣΤΑ 50 Hz.....	90
ΣΧΗΜΑ 5.13. ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΤΗΣ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΛΑΜΑΡΙΝΑΣ M235-35A ΣΤΙΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz, 1000 Hz ΚΑΙ 2500 Hz. Η ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΤΟΥ ΒΕΛΟΥΣ ΥΠΟΔΕΙΚΝΥΕΙ ΤΗΝ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΑΥΞΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ.....	90
ΣΧΗΜΑ 5.14. ΚΑΜΠΥΛΗ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ ΤΟΥ NdFeB 35SH.....	91
ΣΧΗΜΑ 5.15. ΚΑΜΠΥΛΗ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ FERRITE Y30.....	92
ΣΧΗΜΑ 5.16. ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	94
ΣΧΗΜΑ 5.17. ΠΛΕΓΜΑ ΑΠΟΤΕΛΟΥΜΕΝΟ ΑΠΟ 38441 ΚΟΜΒΟΥΣ Η 76520 ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	95
ΣΧΗΜΑ 5.18. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Α ΥΠΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.....	95
ΣΧΗΜΑ 5.19. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΡΟΠΗΣ-ΓΩΝΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ (ΠΡΑΣΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ), ΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΜΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΜΟΝΙΜΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ (ΚΙΤΡΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ) ΚΑΙ ΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΜΟΝΙΜΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ (ΜΠΛΕ ΓΡΑΜΜΗ). Η ΜΕΓΙΣΤΗ ΡΟΠΗ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ	

ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΜΟΝΙΜΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ ΕΙΝΑΙ 128 Νm ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΕΤΑΙ ΣΕ ΓΩΝΙΑ 19° ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ Η ΣΕ 38° ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ.....	96
ΣΧΗΜΑ 5.20. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ ΗΕΔ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Α ΣΕ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.....	97
ΣΧΗΜΑ 5.21. ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΕΔ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Α ΣΕ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.	98
ΣΧΗΜΑ 5.22. ΡΟΠΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΚΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Α ΣΕ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.	98
ΣΧΗΜΑ 5.23. ΡΟΠΗ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Α.	99
ΣΧΗΜΑ 5.24. ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΕΣ ΕΥΘΕΩΣ (ΠΡΑΣΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ) ΚΑΙ ΚΑΘΕΤΟΥ (ΜΠΛΕ ΓΡΑΜΜΗ) ΑΞΟΝΑ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Α.....	101
ΣΧΗΜΑ 5.25. ΔΙΑΦΟΡΑ ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΩΝ ΕΥΘΕΩΣ ΚΑΙ ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ (L_D - L_Q) ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Α.	101
ΣΧΗΜΑ 5.26. ΛΟΓΟΣ ΕΚΤΥΠΟΤΗΤΑΣ L_D/L_Q ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Α.	102
ΣΧΗΜΑ 5.27. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Β ΥΠΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.....	103
ΣΧΗΜΑ 5.28. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΡΟΠΗΣ-ΓΩΝΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ (ΠΡΑΣΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ), ΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΜΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΜΟΝΙΜΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ (ΚΙΤΡΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ) ΚΑΙ ΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΜΟΝΙΜΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ (ΜΠΛΕ ΓΡΑΜΜΗ). Η ΜΕΓΙΣΤΗ ΡΟΠΗ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΜΟΝΙΜΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ ΕΙΝΑΙ 132Νm ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΕΤΑΙ ΣΕ ΓΩΝΙΑ 19° ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ Η ΣΕ 38° ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ.....	103
ΣΧΗΜΑ 5.29. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ ΗΕΔ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Β ΣΕ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.	104
ΣΧΗΜΑ 5.30. ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΕΔ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Β ΣΕ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.	104
ΣΧΗΜΑ 5.31. ΡΟΠΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΚΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Β ΣΕ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.	105
ΣΧΗΜΑ 5.32. ΡΟΠΗ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Β.....	105
ΣΧΗΜΑ 5.33. ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΕΣ ΕΥΘΕΩΣ (ΠΡΑΣΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ) ΚΑΙ ΚΑΘΕΤΟΥ (ΜΠΛΕ ΓΡΑΜΜΗ) ΑΞΟΝΑ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Β.	106
ΣΧΗΜΑ 5.34. ΔΙΑΦΟΡΑ ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΩΝ ΕΥΘΕΩΣ ΚΑΙ ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ (L_D - L_Q) ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Β.....	107
ΣΧΗΜΑ 5.35. ΛΟΓΟΣ ΕΚΤΥΠΟΤΗΤΑΣ L_D/L_Q ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Β.....	107
ΣΧΗΜΑ 5.36. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Γ ΥΠΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.....	108
ΣΧΗΜΑ 5.37. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΡΟΠΗΣ-ΓΩΝΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ (ΠΡΑΣΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ), ΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΜΕ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥΣ ΜΟΝΙΜΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ (ΚΙΤΡΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ) ΚΑΙ ΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΜΟΝΙΜΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ (ΜΠΛΕ ΓΡΑΜΜΗ). Η ΜΕΓΙΣΤΗ ΡΟΠΗ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΜΟΝΙΜΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ ΕΙΝΑΙ 129Νm ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΕΤΑΙ ΣΕ ΓΩΝΙΑ 24° ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ Η ΣΕ 48° ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ.....	108
ΣΧΗΜΑ 5.38. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ ΗΕΔ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Γ ΣΕ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.	109

ΣΧΗΜΑ 5.39. ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΕΔ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Γ ΣΕ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.	109
ΣΧΗΜΑ 5.40. ΡΟΠΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΚΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Γ ΣΕ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.	110
ΣΧΗΜΑ 5.41. ΡΟΠΗ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Γ.	110
ΣΧΗΜΑ 5.42. ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΕΣ ΕΥΘΕΩΣ (ΠΡΑΣΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ) ΚΑΙ ΚΑΘΕΤΟΥ (ΜΠΛΕ ΓΡΑΜΜΗ) ΑΞΟΝΑ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Γ.	111
ΣΧΗΜΑ 5.43. ΔΙΑΦΟΡΑ ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΩΝ ΕΥΘΕΩΣ ΚΑΙ ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ (L_D-L_Q) ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Γ.	112
ΣΧΗΜΑ 5.44. ΛΟΓΟΣ ΕΚΤΥΠΟΤΗΤΑΣ L_D/L_Q ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Γ.	112
ΣΧΗΜΑ 5.45. ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Δ ΥΠΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.	113
ΣΧΗΜΑ 5.46. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΡΟΠΗΣ-ΓΩΝΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ (ΠΡΑΣΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ) ΚΑΙ ΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΜΟΝΙΜΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ (ΜΠΛΕ ΓΡΑΜΜΗ). Η ΜΕΓΙΣΤΗ ΡΟΠΗ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΜΟΝΙΜΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ ΕΙΝΑΙ 134Nm ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΕΤΑΙ ΣΕ ΓΩΝΙΑ 17° ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ Η ΣΕ 34° ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ.	113
ΣΧΗΜΑ 5.47. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗ ΗΕΔ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Δ ΣΕ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.	114
ΣΧΗΜΑ 5.48. ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΕΔ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Δ ΣΕ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.	114
ΣΧΗΜΑ 5.49. ΡΟΠΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΚΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Δ ΣΕ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.	115
ΣΧΗΜΑ 5.50. ΡΟΠΗ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Δ.	115
ΣΧΗΜΑ 5.51. ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΕΣ ΕΥΘΕΩΣ (ΠΡΑΣΙΝΗ ΓΡΑΜΜΗ) ΚΑΙ ΚΑΘΕΤΟΥ (ΜΠΛΕ ΓΡΑΜΜΗ) ΑΞΟΝΑ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Δ.	116
ΣΧΗΜΑ 5.52. ΔΙΑΦΟΡΑ ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΩΝ ΕΥΘΕΩΣ ΚΑΙ ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ (L_D-L_Q) ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Δ.	117
ΣΧΗΜΑ 5.53. ΛΟΓΟΣ ΕΚΤΥΠΟΤΗΤΑΣ L_D/L_Q ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ Δ.	117
ΣΧΗΜΑ 6.1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΡΟΠΗΣ-ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ.	119
ΣΧΗΜΑ 6.2. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΠΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΚΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ.	120
ΣΧΗΜΑ 6.3. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΚΥΜΑΤΩΣΗΣ ΡΟΠΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ.	121
ΣΧΗΜΑ 6.4. ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΕΣ ΗΕΔ ΤΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΣΕ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ.	121
ΣΧΗΜΑ 6.5. ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΕΔ ΣΤΗ ΜΟΝΙΜΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ.	122
ΣΧΗΜΑ 6.6. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ T_{HD} ΓΙΑ ΤΙΣ ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ.	122
ΣΧΗΜΑ 6.7. ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΠΗΣ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΚΗΣ ΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ.	123
ΣΧΗΜΑ 6.8. ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΧΑΛΚΟΥ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΠΥΡΗΝΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ.	123
ΣΧΗΜΑ 6.9. Η ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΜΑΖΑ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ ΠΟΥ ΤΟΠΟΘΕΤΕΙΤΑΙ ΣΤΟΝ ΔΡΟΜΕΑ ΤΗΣ ΚΑΘΕ ΜΗΧΑΝΗΣ.	124

ΣΧΗΜΑ 6.10. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΓΙΑ ΤΑ ΚΟΣΤΗ ΤΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΤΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ.....	125
ΣΧΗΜΑ 6.11. ΠΟΙΟΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΕΩΝ.....	126
ΣΧΗΜΑ Β.1. ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΟΙ ΟΠΟΙΕΣ ΕΠΕΝΕΡΓΟΥΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΡΩΨΗ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ.....	132

Λίστα Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1. ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.	33
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1. ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.	52
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2. ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΙΜΩΝ ΛΟΓΟΥ D/L	57
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ-ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΟΥ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ. ...	59
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΜΟΝΗΣ ΚΑΙ ΔΙΠΛΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ.	60
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5. ΖΕΥΓΗ ΔΥΝΑΤΩΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΩΝ D ΚΑΙ L	61
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΙΔΗΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΛΑΜΑΡΙΝΑΣ M235-35A.	90
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ NdFeB 35SH.....	92
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ FERRITE Y30.....	92
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ THD ΓΙΑ ΤΙΣ ΤΕΣΣΕΡΙΣ ΜΗΧΑΝΕΣ.	122
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2. ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΤΩΝ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΕΩΝ...	125

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1. Σκοπός της εργασίας

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται μια διερεύνηση τεσσάρων γεωμετριών του δρομέα ενός σύγχρονου κινητήρα μαγνητικής αντίστασης με εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες. Σκοπός μας είναι η σύγκριση των τεσσάρων γεωμετριών με κριτήρια το κόστος των μόνιμων μαγνητών και τη ροπή εξόδου. Η τελική επιλογή της γεωμετρίας του δρομέα θα πρέπει να ικανοποιεί πέρα από τα δυο παραπάνω κριτήρια και τις προϋποθέσεις για την εφαρμογή της μηχανής σε ένα ηλεκτρικό όχημα.

1.2. Δομή της εργασίας

Η δομή της εργασίας αποτυπώνει πλήρως τη διαδικασία σχεδίασης που ακολουθήθηκε.

Στο κεφάλαιο 2 εκτιμώνται οι λόγοι για τους οποίους σήμερα η χρήση ηλεκτρικών οχημάτων εντός πόλης αποτελεί ανάγκη και επιβάλλεται η κατασκευή οικονομικότερων και λιγότερο ρυπογόνων οχημάτων. Γίνεται μια ιστορική αναδρομή από τη γέννηση της ιδέας του ηλεκτρικού οχήματος μέχρι σήμερα. Επιπλέον, παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των τύπων των μηχανών που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα.

Στο κεφάλαιο 3 μελετώνται οι βασικές αρχές λειτουργίας των μηχανών μαγνητικής αντίστασης. Περιγράφονται οι τύποι γεωμετριών του δρομέα της σύγχρονης μηχανής μαγνητικής αντίστασης και αναλύεται το μαθηματικό μοντέλο της.

Το κεφάλαιο 4 αποτελεί την προκαταρκτική σχεδίαση της απαιτούμενης μηχανής. Πρώτα, περιγράφονται τα βήματα που θα ακολουθηθούν ώστε να προκύψει η τελική σχεδίαση. Έπειτα, αναφέρονται οι προδιαγραφές του συστήματος κίνησης με βάση τις οποίες θα εφαρμοστούν οι αναλυτικές σχέσεις για να προκύψουν οι βασικές

παράμετροι του προβλήματος. Επίσης, γίνεται η παρουσίαση των υπό διερεύνηση γεωμετριών του δρομέα της σύγχρονης μηχανής μαγνητικής αντίστασης με μόνιμους μαγνήτες.

Στο κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται η οριστική σχεδίαση. Αφού περιγραφεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και εξηγηθεί η παραμετροποίηση που προτείνεται, πραγματοποιείται η πεδιακή ανάλυση της σχεδίασης. Η σχεδίαση βελτιώνεται μέσω επαναληπτικών υπολογισμών των βασικών χαρακτηριστικών της μηχανής. Τα αποτελέσματα των τεσσάρων σχεδιάσεων παρουσιάζονται και ερμηνεύονται.

Στο κεφάλαιο 6 γίνεται η σύνοψη και η σύγκριση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης των τεσσάρων μηχανών. Τέλος, καταγράφονται τα τελικά συμπεράσματα και προτείνονται μερικά θέματα για περαιτέρω μελλοντική διερεύνηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ηλεκτρικό Όχημα

Ορισμός

Ως όχημα (εκ του αρχαίου ελληνικού όρου *ὄχος* = *άρμα*, *άμαξα* και του ρήματος *ὄχῶ* = *κινούμαι με άμαξα*) χαρακτηρίζεται κάθε αυτοκινούμενη, ή όχι, κατασκευή, η οποία έχει σκοπό τη μεταφορά ανθρώπων ή αντικειμένων. Τα λεγόμενα επίγεια οχήματα που κινούνται δια τροχών είναι, μεταξύ άλλων, το ποδήλατο, το αυτοκίνητο, η μοτοσυκλέτα, το τρένο. Άλλα οχήματα στην έννοια της μεταφοράς είναι κάθε πλωτό, εναέριο και διαστημικό μέσο π.χ. το πλοίο, το αεροσκάφος, το διαστημόπλοιο και συναφή αυτών. Σήμερα στον ίδιο όρο περιλαμβάνονται και τα κατευθυνόμενα ή τηλεκατευθυνόμενα μέσα μεταφοράς, ανεξάρτητα αν είναι επανδρωμένα ή όχι.

Τα περισσότερα επίγεια οχήματα έχουν τροχούς, ενώ παράδειγμα μη τροχοφόρων επίγειων οχημάτων είναι τα ερπυστριοφόρα οχήματα και τα ειδικά τρένα επί μαγνητικού φορέα.

2.1. Ηλεκτρικό όχημα και αστικό περιβάλλον

Πολλές από τις πιο δυσάρεστες καταστάσεις σε μια πόλη προκαλούνται άμεσα ή έμμεσα από τα οχήματα. Πέρα από τα οδικά ατυχήματα, η ατμοσφαιρική ρύπανση και η ηχορύπανση είναι από τα εντονότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι κάτοικοι των πόλεων εξαιτίας της μηχανοκίνησης. Όσον αφορά τα οδικά ατυχήματα, οι λόγοι στους οποίους οφείλεται δεν αποτελεί αντικείμενο αυτής της εργασίας. Από την άλλη μεριά, η ατμοσφαιρική ρύπανση και η ηχορύπανση αποτελούν την αφορμή από την οποία απλοί πολίτες και μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες στρέφουν το ενδιαφέρον τους σε «καθαρές» μεταφορικές λύσεις, όπως το ηλεκτρικό όχημα.

Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στην προστασία και στη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος. Τα πλεονεκτήματα τους σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα είναι αρκετά και σημαντικά ώστε μια πιθανή αντικατάσταση των

συμβατικών οχημάτων από ηλεκτρικά θα μπορούσε να αποτελέσει έναν τρόπο άμεσης αναβάθμισης της ποιότητας ζωής στα αστικά κέντρα.

Τα βασικά πλεονεκτήματα του ηλεκτρικού οχήματος είναι:

- Τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν μηδενικές εκπομπές ρύπων.
- Τα ηλεκτρικά οχήματα προκαλούν ελάχιστη θερμική επιβάρυνση στο περιβάλλον, λόγω του εξαιρετικά υψηλού βαθμού απόδοσης του ηλεκτρικού κινητήρα.
- Τα ηλεκτρικά οχήματα προκαλούν ελάχιστη ηχορύπανση.
- Οι ενεργειακές απαιτήσεις των ηλεκτρικών οχημάτων μπορούν να καλυφθούν από ΑΠΕ αποτελώντας με τον τρόπο αυτό και κίνητρο για την ανάπτυξη συστημάτων παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.
- Στην περίπτωση που η ενέργεια τους παράγεται με συμβατικές μεθόδους (λιγνίτης), ο βαθμός απόδοσης είναι σχετικά μεγαλύτερος με την επιτόπου καύση των συμβατικών κινητήρων και η δυνατότητα μείωσης της ρύπανσης γίνεται ευκολότερη.

Για αυτούς τους λόγους οι μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες στρέφονται στη μελέτη και τη βελτίωση των κλασικών τύπων ηλεκτρικών κινητήρων. Σκοπός τους είναι να βελτιώσουν τις προδιαγραφές, τις επιδόσεις και την αξιοπιστία των ηλεκτρικών οχημάτων σε τέτοιο βαθμό ώστε το ηλεκτρικό όχημα να μην αποτελεί ειδική περίπτωση μεταφορικού μέσου. Σήμερα, οι επιλογές στην αγορά είναι πολλές και περιλαμβάνουν οχήματα συμβατικά, υβριδικά, ηλεκτρικά, υδρογονοκίνητα, υγραεριοκίνητα, κá. Προς το παρόν, τα συμβατικά οχήματα αποτελούν την πιο αξιόπιστη και οικονομική επιλογή. Όμως, η εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος, των ημιαγωγικών στοιχείων, αλλά και των μπαταριών προμηνύει αισιόδοξο μέλλον σε ότι αφορά την αξιοπιστία των ηλεκτρικών οχημάτων. Όσον αφορά το κόστος, η συνάρτηση του κόστους, εκτός από το κόστος αγοράς, θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη και άλλες παραμέτρους, όπως η τιμή του καυσίμου, το κόστος των ανταλλακτικών, η φορολογία, κá. Σε αυτήν την περίπτωση, πολλοί είναι εκείνοι οι οποίοι βρίσκουν το ηλεκτρικό αυτοκίνητο ως μια δελεαστική πρόταση.

Αξίζει ακόμη να σημειωθεί ότι η επιταχυνόμενη επέκταση των μονάδων παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ θα μπορούσε να αποτελέσει κίνητρο για την ταυτόχρονη ανάπτυξη της «πράσινης» μετακίνησης, δηλαδή με ηλεκτρικά οχήματα μηδενικών εκπομπών ρύπων. Οι δύο αυτοί τομείς, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και το ηλεκτρικό όχημα μπορούν να αλληλοσυμπληρώνονται και για τον λόγο αυτό θα πρέπει ο ένας τομέας να επηρεάζει τον άλλον για την ταχύτερη ανάπτυξή τους.

2.2. Ιστορικό

Η ιδέα του ηλεκτρικού οχήματος άρχισε να δημιουργείται από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα. Η εφεύρεση του ηλεκτρικού οχήματος αποδίδεται σε διάφορους εφευρέτες. Το 1828, ο Ούγγρος εφευρέτης Άνιος Γέντλικ, δημιουργός ενός πρωτότυπου ηλεκτρικού κινητήρα, δημιούργησε ένα πολύ μικρό μοντέλο οχήματος χρησιμοποιώντας τον κινητήρα που είχε κατασκευάσει. Το 1834, ο αμερικάνος εφευρέτης Τόμας Ντέιβενπορτ κατασκεύασε έναν ηλεκτρικό κινητήρα συνεχούς ρεύματος ο οποίος τροφοδοτούνταν από μπαταρία και τον χρησιμοποίησε για να δώσει κίνηση σε ένα μικρό μοντέλο αυτοκινήτου. Αργότερα, το 1838, ο Σκωτσέζος εφευρέτης Ρόμπερτ Ντέιβιντσον κατασκεύασε ένα ηλεκτροκίνητο τρένο το οποίο μπορούσε να κινηθεί με ταχύτητα 6 km/h . Ακολούθησαν πολλές ακόμη εφευρέσεις και κατασκευές μέχρι οι μεταφορές με ηλεκτρικά οχήματα να γίνουν σύνηθες φαινόμενο.

Η Γαλλία και το Ηνωμένο Βασίλειο ήταν τα πρώτα κράτη τα οποία κατασκεύασαν μαζικά ηλεκτρικά οχήματα στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Το αμερικάνικο ενδιαφέρον ξεκίνησε λίγο αργότερα περίπου το 1895. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, τα εμπορικά ηλεκτρικά αυτοκίνητα κατείχαν την πλειοψηφία της αγοράς. Το Ηνωμένο Βασίλειο αποτελεί τον μεγαλύτερο χρήστη ηλεκτρικών οχημάτων παγκοσμίως, ενώ και στις Η.Π.Α. υπολογίζεται ότι το 28% των οχημάτων που κυκλοφορούσαν τότε ήταν ηλεκτρικά. Τα ηλεκτρικά οχήματα είχαν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των συναγωνιστών τους. Ήταν αθόρυβα και χωρίς τις οσμές και τις δονήσεις των αυτοκινήτων με γκαζολίνη. Επίσης, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα ήταν η πρώτη επιλογή πολλών καταναλωτών επειδή δεν απαιτούνταν χειροκίνητη εκκίνηση ούτε πάλη με τον λεβιέ ταχυτήτων. Οι Baker Electrics, Columbia Automotive Company, Detroit Electric και English Electric είναι μερικές από τις μεγαλύτερες βιομηχανίες ηλεκτρικών οχημάτων της εποχής. Το κόστος ενός απλού ηλεκτρικού αυτοκινήτου κυμαινόταν στα χίλια αμερικάνικα δολάρια. Ωστόσο, υπήρχαν περισσότερο εντυπωσιακά ηλεκτρικά αυτοκίνητα με δυνατότητα μαζικής μεταφοράς και φανταχτερό εσωτερικό με ακριβά υλικά τα οποία προορίζονταν για την ανώτερη κοινωνική τάξη και το κόστος αυτών ξεπερνούσε τις τρεις χιλιάδες αμερικάνικα δολάρια. Η παραγωγή ηλεκτρικών αυτοκινήτων κορυφώθηκε το 1912. Τα ηλεκτρικά οχήματα ήταν τόσο δημοφιλή στις αρχές του 20^{ου} αιώνα που ακόμα και ο Πρόεδρος των Η.Π.Α. Γούντροου Ουίλσον και οι «μυστικοί» πράκτορες του τα χρησιμοποιούσαν για τις μετακινήσεις τους.

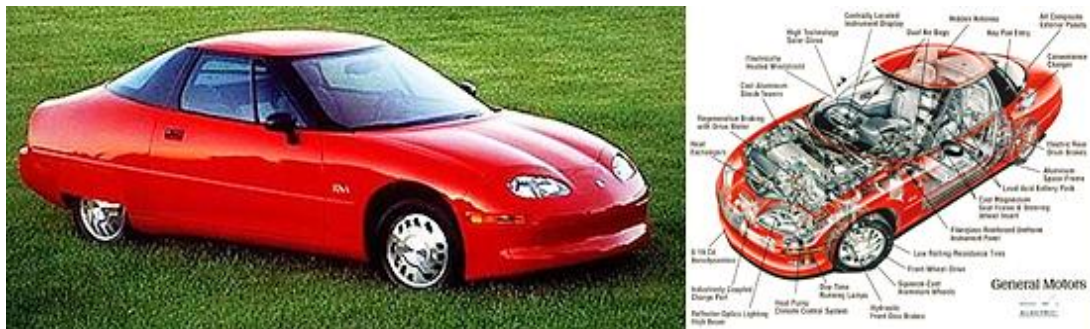
Με την πάροδο του χρόνου, όμως, τα πλεονεκτήματα των οχημάτων εσωτερικής καύσης έναντι των ηλεκτρικών αρχίζουν να πληθαίνουν και οι κατασκευαστές αυτού του είδους οχημάτων κυριαρχούν στην αγορά. Οι ηλεκτρικοί κινητήρες περιορίζονται



Σχήμα 2.1. Διαφήμιση του 1920 ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου της εταιρείας Detroit Electric. [28]

σε ειδικού σκοπού οχήματα, όπως τραμ, τρένα, οχήματα αστικών μεταφορών, ασθενοφόρα, γερανοί, κτλ.

Στο τέλος του 20^{ου} αιώνα, η ιδέα του ηλεκτρικού αυτοκινήτου επανέρχεται. Τον Ιανουάριο του 1990, η General Motors παρουσιάζει το πρώτο της ηλεκτρικό αυτοκίνητο, το EV1. Το EV1 ήταν ένα διθέσιο спор αυτοκίνητο με υδρόψυκτο τριφασικό εναλλασσόμενο κινητήρα επαγωγής με IGBT αντιστροφέα και μπαταρία μολύβδου-οξέος. Το 1996, η General Motors αρχίζει την παραγωγή περιορισμένου αριθμού ηλεκτρικών αυτοκινήτων για τους κατοίκους της Καλιφόρνιας. Το σχέδιο της General Motors ακολουθούν και άλλες παραδοσιακά μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες, όπως οι Ford, Chrysler, Nissan, Honda, Toyota, Volkswagen, BMW, Citroën, Renault, κά, καθώς και νεοσύστατες εταιρείες οι οποίες επενδύουν στην ανάπτυξη και τη βελτίωση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, όπως οι Tesla Motors, Tazzari, Mia Electric, CODA, κά.



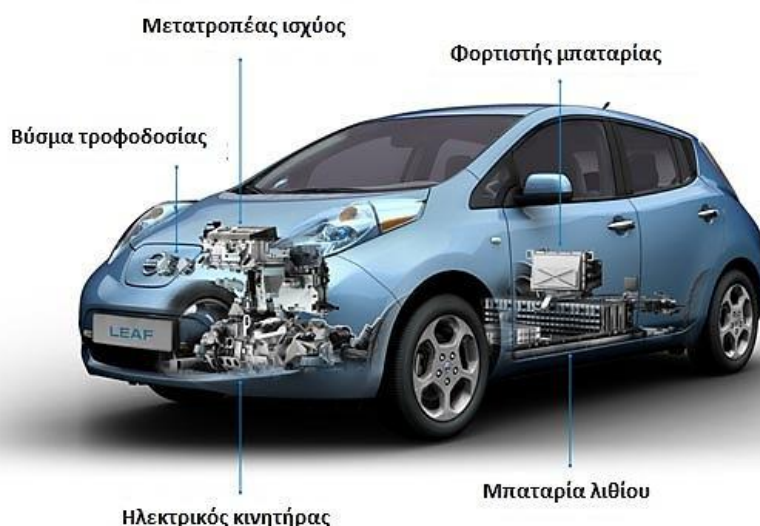
Σχήμα 2.2. Το EV1 (1996) της General Motors με ισχύ εξόδου 137 hp στις 7000 RPM. [29]



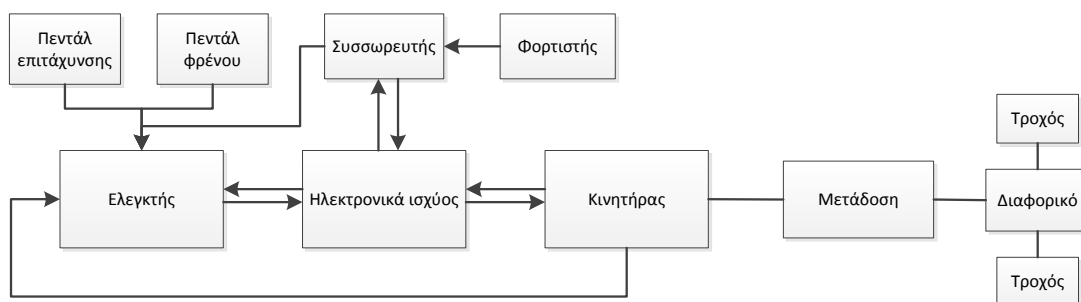
Σχήμα 2.3. Σημερινής τεχνολογίας (2011) ηλεκτρικό αυτοκίνητο από την Audi. Έχει τεσσερις ηλεκτρικούς κινητήρες (ένας σε κάθε τροχό) οι οποίοι παράγουν 4500 Nm ροπή και μπορεί να διανύσει 240 km με μια πλήρη φόρτιση. [30]

2.3. Σύστημα κίνησης ηλεκτρικού οχήματος

Τα υποσυστήματα του συστήματος κίνησης ενός σημερινού ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι ο ηλεκτρικός κινητήρας, ο μετατροπέας ισχύος (ελεγκτής), η πηγή ενέργειας και το σύστημα μετάδοσης της κίνησης. Στο Σχήμα 2.4 απεικονίζεται το σύστημα κίνησης και η χωροθέτηση των υποσυστημάτων ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου τεχνολογίας του 2012 το οποίο τροφοδοτείται από μπαταρία.



Σχήμα 2.4. Η χωροθέτηση των υποσυστημάτων στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο Nissan Leaf (2012). [31]



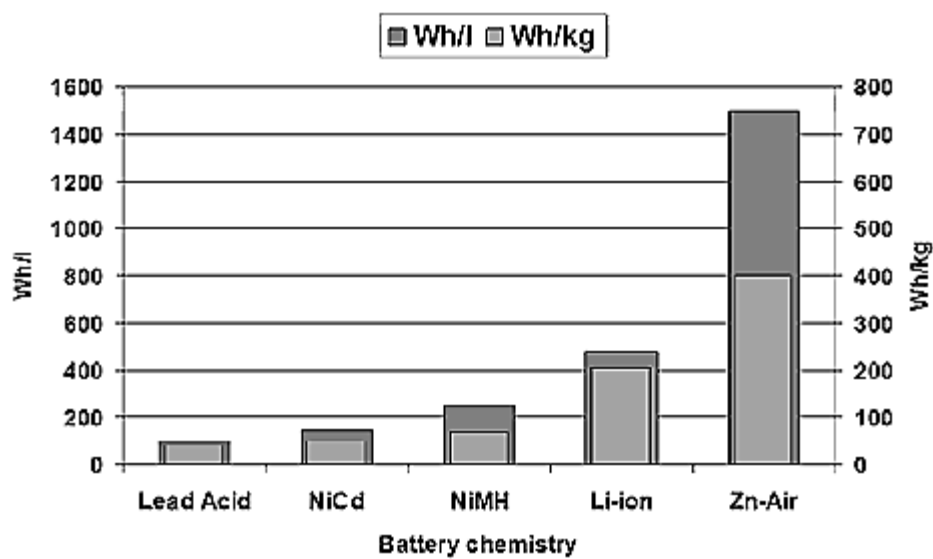
Σχήμα 2.5. Απλοποιημένο ηλεκτρικό σύστημα κίνησης.

Ο κινητήρας του ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι σημαντικό υποσύστημα του συστήματος κίνησης και απαιτείται να πληροί αυστηρές προδιαγραφές μεγέθους, βάρους, κόστους, ακουστικού θορύβου, θερμοκρασιακής και μηχανικής αντοχής. Συνήθως χρησιμοποιούνται κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC), ασύγχρονοι κινητήρες και κινητήρες μονίμων μαγνητών.

Ο ηλεκτρικός κινητήρας οδηγείται από μια μονάδα ηλεκτρονικών ισχύος ελεγχόμενων από ψηφιακό επεξεργαστή σήματος (DSP). Ο ρόλος αυτής της μονάδας είναι η μετατροπή της συνεχούς τάσης της πηγής ενέργειας σε μεταβαλλόμενη τάση επιθυμητής συχνότητας αναλόγως του σημείου λειτουργίας του οχήματος. Τα

ηλεκτρονικά ισχύος και το κύκλωμα ελέγχου τείνουν να γίνονται ταχύτερα, αποδοτικότερα και μικρότερα σε μέγεθος. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην εξέλιξη των συστημάτων κίνησης υψηλής επίδοσης.

Η παραδοσιακή πηγή ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων ήταν οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές με βασικό τύπο αυτό των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος λόγω του χαμηλού κόστους και της ώριμης τεχνολογίας. Η ανάγκη για βελτιωμένα χαρακτηριστικά οδήγησε στην ανάπτυξη εναλλακτικών ειδών συσσωρευτών με υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας, δυνατότητα παροχής μεγαλύτερης ισχύος και μεγαλύτερο αριθμό κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης.



Σχήμα 2.6. Συγκριτικό διάγραμμα ως προς την πυκνότητα ισχύος διάφορων τύπων μπαταριών. [32]



Σχήμα 2.7. Εντυπωσιακή παρουσίαση της εξελικτικής πορείας των μπαταριών. [2]

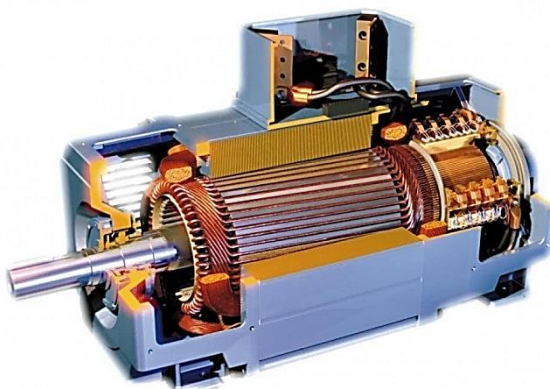
2.4. Τύποι ηλεκτρικών κινητήρων για ηλεκτρικά οχήματα

Ο κάθε τύπος κινητήρα κρίνεται ως προς την καταλληλότητα του για χρήση σε ηλεκτροκίνητο όχημα με κριτήριο την κάλυψη των προδιαγραφών του εκάστοτε οχήματος. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά που απαιτεί το σύστημα κίνησης οχημάτων είναι η υψηλή ροπή σε μικρές ταχύτητες, ευρεία περιοχή ταχυτήτων λειτουργίας υπό σταθερή ισχύ, υψηλή πυκνότητα ισχύος, υψηλή απόδοση, μικρό βάρος, χαμηλό κόστος, αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής με την ελάχιστη δυνατή ανάγκη για συντήρηση.

Οι πιο διαδεδομένοι τύποι κινητήρων ηλεκτρικών οχημάτων είναι:

- **Η μηχανή συνεχούς ρεύματος (DC Machine)**

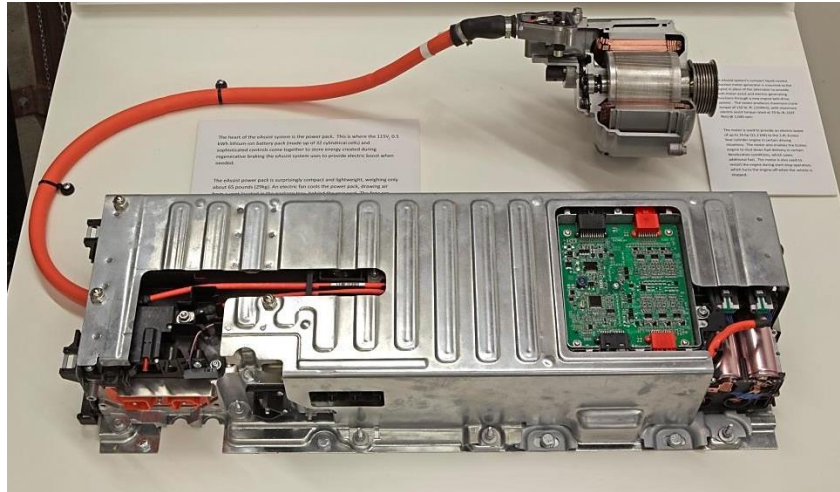
Σε αρχικό στάδιο η τεχνολογική ωριμότητα και ο απλός έλεγχος αυτής της μηχανής υπερίσχυσαν έναντι της ανάγκης για συντήρηση και αντικατάσταση των ψηκτρών ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Ωστόσο, η ανάγκη για αξιοπιστία των κινητήρων στα ηλεκτρικά οχήματα και η εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος και των μικροεπεξεργαστών έφερε τους κινητήρες χωρίς συλλέκτη και ψήκτρες στο προσκήνιο.



Σχήμα 2.8. Τομή μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος. [37]

- **Η μηχανή επαγωγής (Induction Machine)**

Το μικρό κόστος, ο εύκολος έλεγχος και η υψηλή αξιοπιστία είναι οι λόγοι για τους οποίους αυτό το είδος κινητήρα έχει ευρεία εφαρμογή στα ηλεκτρικά οχήματα. Ακόμη ένας λόγος είναι η δυνατότητα υποδιέγερσης σε συνθήκες χαμηλού φορτίου ώστε να αναπτύσσει υψηλή ταχύτητα βελτιώνοντας το βαθμό απόδοσης σε συνθήκες ελέγχου σταθερής ισχύος.



Σχήμα 2.9. Κινητήρας επαγωγής ισχύος 182 hp του Buick Lacrosse. [33]

- **Η σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών (Permanent Magnet Synchronous Machine)**

Η μηχανή αυτή αποτελεί ελκυστική τεχνολογία για συστήματα ηλεκτρικής κίνησης λόγω του εξαιρετικά υψηλού βαθμού απόδοσης, της μεγάλης πυκνότητας ισχύος, της μειωμένης κυμάτωσης ροπής και του χαμηλού ακουστικού θορύβου. Ωστόσο, το κόστος είναι υψηλό εξαιτίας του κόστους των μονίμων μαγνητών και η κατασκευή του δρομέα πολύπλοκη. Επιπλέον, στις υψηλές θερμοκρασίες οι μόνιμοι μαγνήτες απομαγνητίζονται προσωρινά ή μόνιμα.



Σχήμα 2.10. Συναρμολόγηση του δρομέα. Τοποθέτηση και κόλληση ένα προς ένα των 400 κομματιών μόνιμου μαγνήτη (Chevrolet Spark 2013). [34]

- **Οι μηχανές μαγνητικής αντίστασης (Synchronous & Switched Reluctance Machine)**

Οι κινητήρες μαγνητικής αντίστασης χαρακτηρίζονται από την απλότητα κατασκευής, τη μικρή ροπή αδράνειας του δρομέα, την υψηλή ροπή σε μεγάλο εύρος στροφών, τη μεγάλη αξιοπιστία και το χαμηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης.

Ωστόσο, σημαντικά μειονεκτήματα έχουν περιορίσει τη χρήση τους σε ειδικές εφαρμογές. Τα κυριότερα μειονεκτήματά τους είναι η μη-γραμμικότητα του μαγνητικού κυκλώματος, η υψηλή κυμάτωση ροπής σε χαμηλές στροφές και ο ακουστικός θόρυβος. Βέβαια, οι τεχνολογικές εξελίξεις στον έλεγχο και το σχεδιασμό έχουν εξαλείψει σε μεγάλο βαθμό κάποια από αυτά τα μειονεκτήματα με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η αξιοποίησή τους σε σύγχρονα ηλεκτρικά οχήματα.



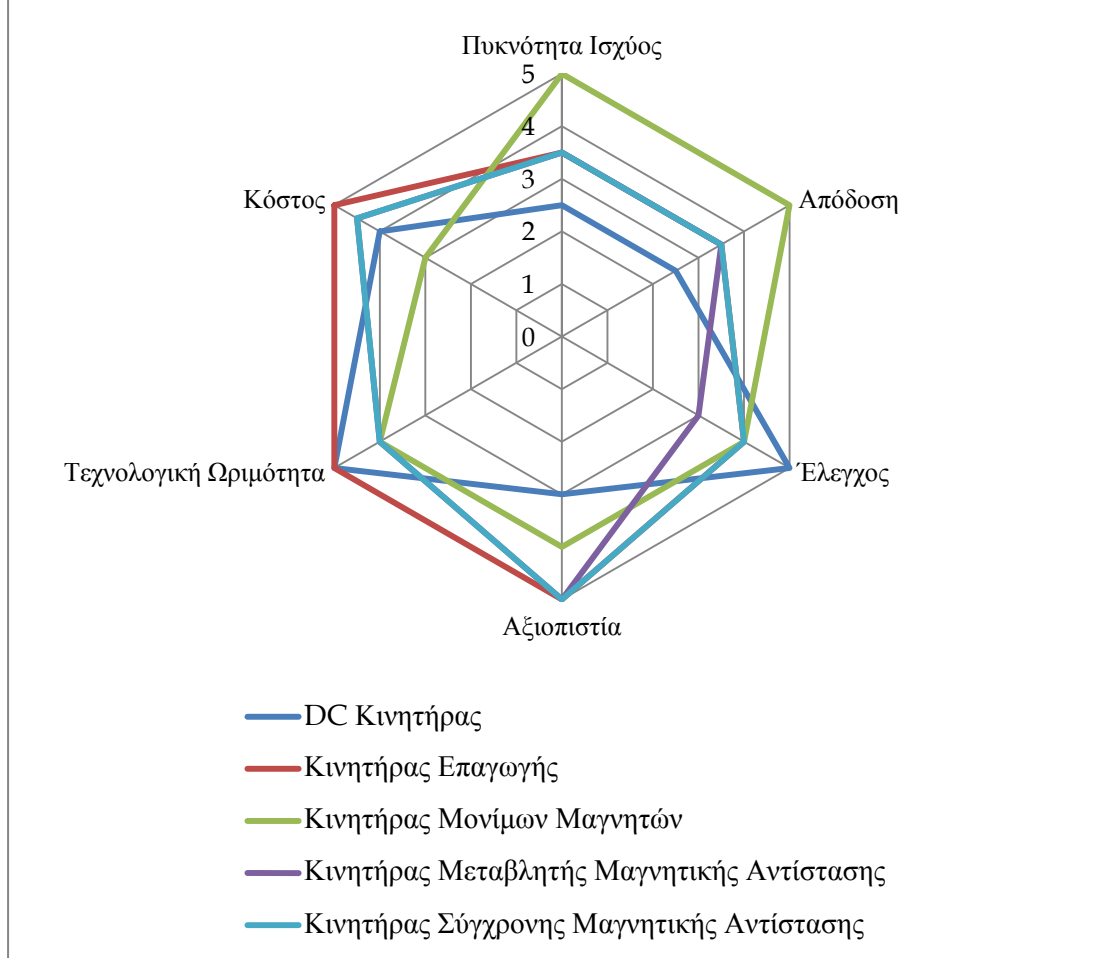
Σχήμα 2.11. Αριστερά δύο βασικά κομμάτια ενός κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (Switched Reluctance Machine) και δεξιά ο δρομέας ενός κινητήρα σύγχρονης μαγνητικής αντίστασης (Synchronous Reluctance Machine). [2]

Για την αξιολόγηση των βασικών κατηγοριών κινητήρων ως προς την καταλληλότητα σε εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων, χρησιμοποιείται ένα σύστημα βαθμολόγησης με κλίμακα η οποία εκτείνεται από το ένα έως το πέντε.

Πίνακας 2.1. Πίνακας αξιολόγησης των τεσσάρων κατηγοριών κινητήρων για εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων.

	DC Κινητήρας	Κινητήρας Επαγωγής	Κινητήρας Μονίμων Μαγνητών	Κινητήρας Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης	Κινητήρας Σύγχρονης Μαγνητικής Αντίστασης
Πυκνότητα Ισχύος	2,5	3,5	5	3,5	3,5
Απόδοση	2,5	3,5	5	3,5	3,5
Έλεγχος	5	4	4	3	4
Αξιοπιστία	3	5	4	5	5
Τεχνολογική Ωριμότητα	5	5	4	4	4
Κόστος	4	5	3	4,5	4,5
Σύνολο	22	26	25	23,5	24,5

Ποιοτικό διάγραμμα αξιολόγησης των κινητήρων για εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων



Σχήμα 2.12. Αραχνοειδές διάγραμμα αξιολόγησης κινητήρων.

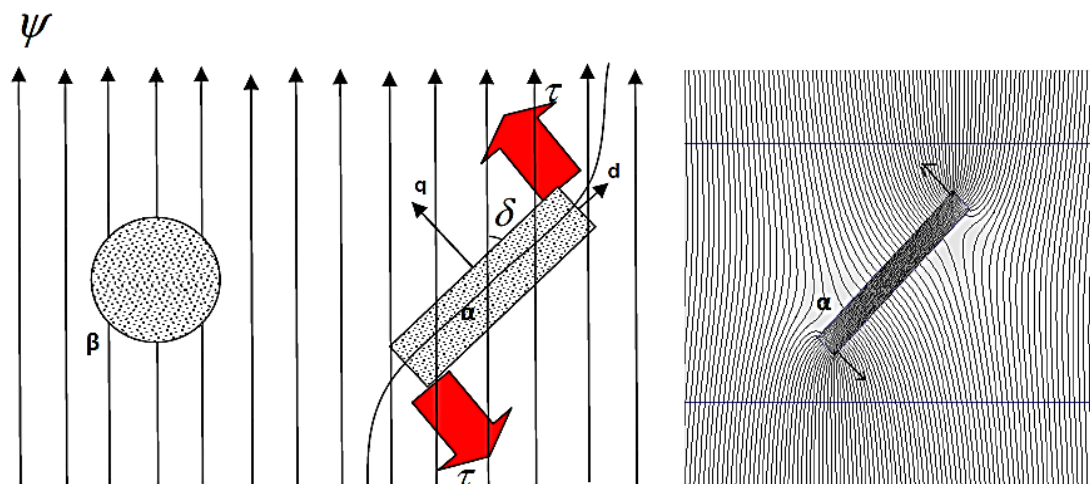
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Βασική Θεωρία

3.1. Αρχή λειτουργίας σύγχρονης μηχανής μαγνητικής αντίστασης

Η σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης χρησιμοποιεί την ιδέα της μαγνητικής αντίστασης και της στρεφόμενης ημιτονοειδούς μαγνητεγερτικής δύναμης, η οποία μπορεί να παραχθεί από ένα κλασικό στάτη μηχανής επαγωγής, ώστε να παραχθεί ροπή. Η ιδέα αυτή χρονολογείται από το 1900.

Η κύρια ιδέα μπορεί να εξηγηθεί μέσω του σχήματος που φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Στο σχήμα αυτό το αντικείμενο (α) με ισοτροπικό μαγνητικό υλικό έχει διαφορετικές επαγωγές στον d-άξονα και στον q-άξονα ενώ το αντικείμενο (β) με ισοτροπικό μαγνητικό υλικό έχει την ίδια επαγωγή σε όλες τις κατευθύνσεις. Το μαγνητικό πεδίο (Ψ) το οποίο εφαρμόζεται στο αντικείμενο (α) παράγει ροπή αν υπάρχει γωνία δ ανάμεσα στον d-άξονα και στο πεδίο ($\delta \neq 0$). Είναι φανερό ότι αν ο d-άξονας δεν είναι ευθυγραμμισμένος με το πεδίο, το πεδίο παραμορφώνεται. Η κύρια διεύθυνση της παραμόρφωσης αυτής είναι ευθυγραμμισμένη με τον q-άξονα του αντικειμένου.



Σχήμα 3.1. Ένα αντικείμενο με ανισοτροπική γεωμετρία (αντικείμενο α) και ένα αντικείμενο με ισοτροπική γεωμετρία (αντικείμενο β) υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου Ψ . [5]

Στη σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης το μαγνητικό πεδίο (Ψ) παράγεται από το κατανεμημένο ημιτονοειδές τυλίγμα του στάτη και συνδέει το στάτη με το δρομέα μέσω του μικρού διακένου, όπως ακριβώς σε μια κλασική μηχανή επαγωγής. Το πεδίο στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα και μπορεί να υποτεθεί ότι είναι ημιτονοειδώς κατανεμημένο. Στην περίπτωση αυτή θα υπάρχει συνεχώς ροπή η οποία θα ενεργεί ώστε να μειώσει τη συνολική δυναμική ενέργεια του συστήματος, μειώνοντας την παραμόρφωση του πεδίου στον q -άξονα ($\delta \rightarrow 0$). Αν η γωνία δ διατηρείται σταθερή, για παράδειγμα μέσω ενός συστήματος ελέγχου, τότε η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια θα μετατρέπεται συνεχώς σε μηχανική ενέργεια.

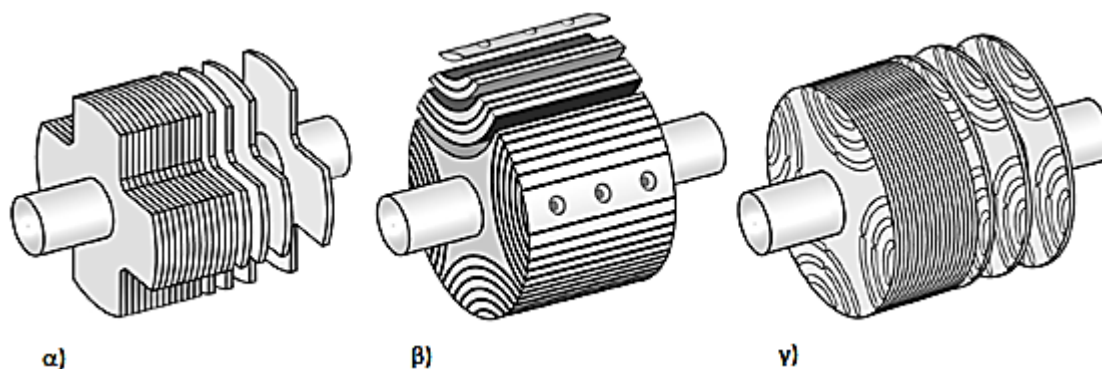
Το ρεύμα του στάτη ευθύνεται για τη μαγνήτιση (κύριο πεδίο) και για την παραγωγή ροπής η οποία προσπαθεί να μειώσει την παραμόρφωση του πεδίου. Αυτό μπορεί να συμβεί ελέγχοντας τη γωνία του ρεύματος, η οποία είναι η γωνία ανάμεσα στο διάνυσμα του ρεύματος του τυλίγματος του στάτη και στον d -άξονα του δρομέα.

3.2. Τύποι γεωμετριών δρομέα

Κυρίως υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι σύγχρονων μηχανών μαγνητικής αντίστασης με ανιστροπικές δομές δρομέα (Σχήμα 3.2). Ο δρομέας έκτυπων πόλων κατασκευάζεται αφαιρώντας ποσότητα σιδήρου από την εγκάρσια περιοχή (Σχήμα 3.2α).

Στο δρομέα αξονικών επιστρώσεων ο οποίος είναι ο δεύτερος τύπος σύγχρονης μηχανής μαγνητικής αντίστασης, οι επιστρώσεις σιδήρου έχουν κατάλληλο σχήμα σε κάθε πόλο και μονώνονται ανάμεσα τους χρησιμοποιώντας ηλεκτρικά και μαγνητικά παθητικά υλικά (μονώσεις). Οι επιστρώσεις σιδήρου και οι μονώσεις συνδέονται μέσω σφηνών στον άξονα (Σχήμα 3.2β).

Στον τρίτο τύπο δρομέα οι επιστρώσεις πακτώνονται με τον παραδοσιακό τρόπο. Λεπτές ραβδώσεις αφήνονται ώστε τα διάφορα τμήματα του δρομέα να συνδέονται μεταξύ τους μέσω αυτών (Σχήμα 3.2γ).



Σχήμα 3.2. Πιθανές σχεδιάσεις δρομέα για μια σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης: α) Απλός δρομέας έκτυπων πόλων. β) Ανιστροπικός δρομέας αξονικών επιστρώσεων. γ) Ανιστροπικός δρομέας εγκάρσιων επιστρώσεων. [5]

Η σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης δεν έχει χαρακτηριστική ροπή εκκίνησης και γι' αυτό μπορεί να τοποθετηθεί κλωβός στο δρομέα ο οποίος θα μπορούσε να παράγει την ασύγχρονη ροπή εκκίνησης. Αλλά η μηχανή μπορεί να εκκινήσει από μηδενική ταχύτητα χρησιμοποιώντας σύγχρονους τεχνολογικά αντιστροφείς, κατάλληλο έλεγχο πεδίου και PWM τεχνικές.

Μια σύντομη ιστορική παρουσίαση εναλλακτικών γεωμετριών δρομέα θα μπορούσε να είναι πολύ χρήσιμη για την κατανόηση της σύγχρονης μηχανής μαγνητικής αντίστασης (Σχήμα 3.3).

Ο δρομέας στο Σχήμα 3.3α προκύπτει αφαιρώντας υλικό από τον κλασικό δρομέα μιας μηχανής επαγωγής, επεξεργάζοντας τον είτε πριν είτε μετά τη χύτευση. Οι δρομείς αυτού του τύπου έχουν απλή κατασκευή, αλλά ο λόγος εκτυπότητας είναι πολύ μικρός και δεν δίνει ανταγωνιστική επίδοση.

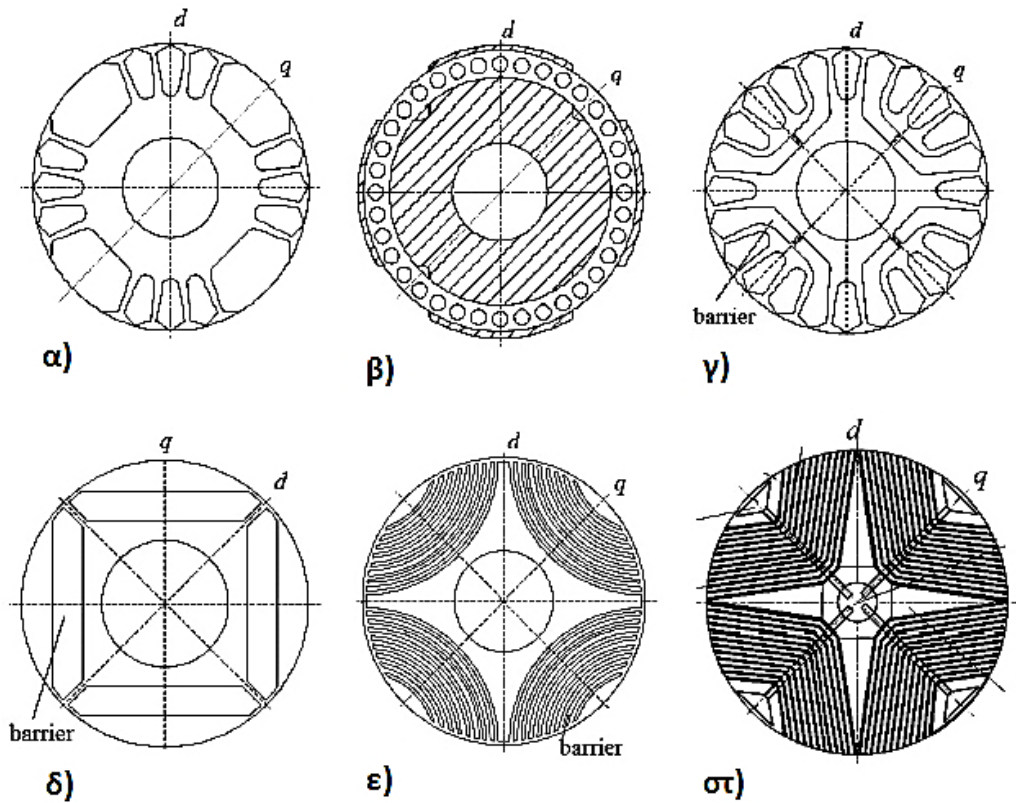
Το Σχήμα 3.3β δείχνει την κατασκευή έκτυπου πόλου, όπως μιας κλασικής σύγχρονης μηχανής έκτυπων πόλων, αλλά χωρίς τυλίγματα. Για αυτό το είδος δρομέα πετυχαίνεται ένας ακόρεστος λόγος επαγωγής κοντά στο 3 ή 2,5 υπό φορτίο. Δεν έχει αναφερθεί τιμή του λόγου εκτυπότητας υψηλότερη από 3,8.

Παρά το μικρό λόγο εκτυπότητας, τα άλλα χαρακτηριστικά επίδοσης της γεωμετρίας έκτυπου πόλου δεν είναι επίσης αποδεκτά, επειδή αν η περιοχή μεταξύ των πόλων στον q-άξονα απλωθεί για να μειωθεί το L_q , αυτό θα προκαλέσει στένεμα της περιοχής του πόλου στον d-άξονα που επίσης μειώνει το L_d . Στην περίπτωση αυτή άλλου είδους διαμορφώσεις (για παράδειγμα τροποποίηση με φράγματα) θα πρέπει να γίνουν ώστε να βελτιωθεί η επίδοση της μηχανής.

Η διαμόρφωση του ενός φράγματος (Σχήμα 3.3γ και Σχήμα 3.3δ) δεν είναι ούτε αυτή επαρκής για να βελτιώσει την επίδοση της μηχανής. Η διαμόρφωση του δρομέα (Σχήμα 3.3δ) προέρχεται από τη σύγχρονη μηχανή με εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες, αφού αυτοί αφαιρεθούν.

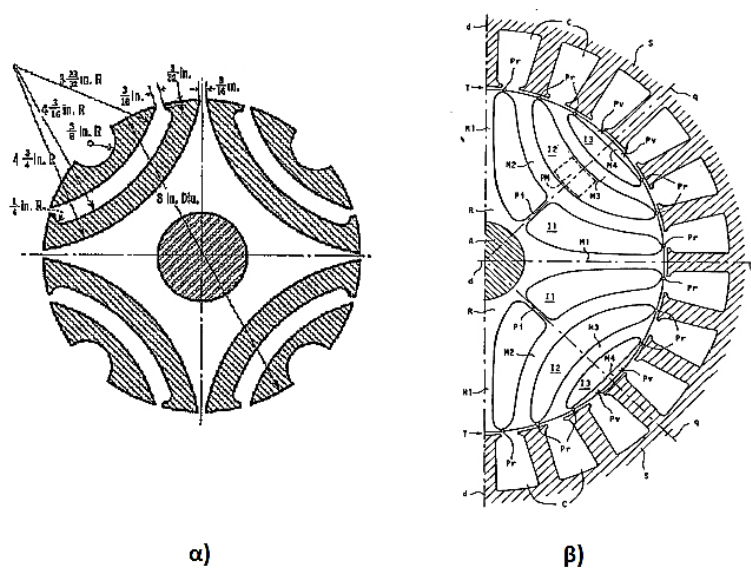
Γι' αυτόν το λόγο το πλήθος των φραγμάτων θα πρέπει να αυξηθεί. Από το 1923 ο Γ. Κ. Κόστκο είχε αναλύσει ένα δρομέα της μορφής που φαίνεται στο Σχήμα 3.3ε (βλέπε επίσης Σχήμα 3.4α) ενσωματώνοντας μερικά χαρακτηριστικά όπως η χρήση πολλαπλών φραγμάτων ροής, τμηματοποιημένης γεωμετρίας και το κανάλι q-άξονα.

Ο Κόστκο υπέδειξε ότι ο ουσιώσης περιορισμός στη σχεδίαση του έκτυπου πόλου είναι κυρίως ότι αν η περιοχή ανάμεσα στους πόλους επεκταθεί προκειμένου να μειωθεί η επαγωγή του q-άξονα, τότε το τόξο του πόλου στενεύει παράγοντας μια ανεπιθύμητη μείωση της επαγωγής του d-άξονα. Επομένως, συμπεράνε ότι ο μόνος τρόπος για να κατασκευάσει μια σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης είναι τα πολλαπλά φράγματα ή η τμηματοποιημένη διάταξη διότι με αυτόν τον τρόπο δεν εμπλέκεται το τόξο του πόλου.



Σχήμα 3.3. Ιστορική εξέλιξη διάφορων εναλλακτικών γεωμετριών δρομέα. [5]

Μετεγενέστεροι κατασκευαστές, οι οποίοι γνώριζαν την εργασία του Κόστικο (Σχήμα 3.4α), ανέπτυξαν τη γεωμετρία σε δύο κύριες γραμμές: την τμηματοποιημένη γεωμετρία (Σχήμα 3.3ε Fratta και Σχήμα 3.4β Vagati) και τη γεωμετρία αξονικών επιστρώσεων (Σχήμα 3.3στ).

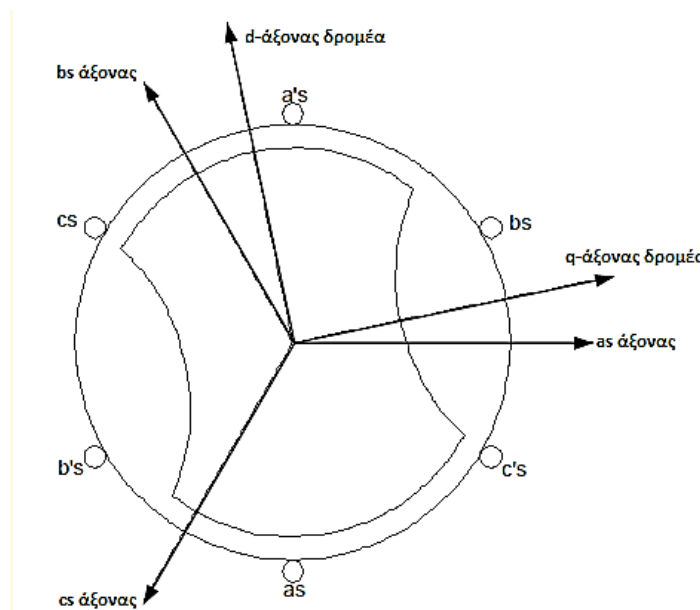


Σχήμα 3.4. α) Μια από τις πρώτες δομές ανισοτροπικού δρομέα εγκάρσιων επιστρώσεων. β) Η σύγχρονη και βελτιωμένη εκδοχή της. [5]

3.3. Μαθηματικό μοντέλο

3.3.1. Οι d και q εξισώσεις της σύγχρονης μηχανής μαγνητικής αντίστασης

Ένας διπολικός σύγχρονος κινητήρας μαγνητικής αντίστασης φαίνεται στο Σχήμα 3.5. Έχει τριφασικό τυλίγμα στάτη και δρομέα έκτυπων πόλων. Τα τυλίγματα του στάτη είναι πανομοιότυπα, τοποθετημένα ώστε να διαφέρουν 120° ηλεκτρικές μεταξύ τους, με N_s ισοδύναμες σπείρες και αντίσταση r_s . Συνήθως, υποτίθεται ότι τα τυλίγματα είναι ημιτονοειδώς κατανεμημένα. Κατανέμοντας ημιτονοειδώς τα τυλίγματα του στάτη ενός σύγχρονου κινητήρα μαγνητικής αντίστασης, οι αρμονικές μαγνητικής ροής στο διάκενο συνεισφέρουν μόνο με έναν επιπρόσθετο παράγοντα στην αυτεπαγωγή ροής του στάτη. Έτσι, οι εξισώσεις οι οποίες παρουσιάζουν τη συμπεριφορά της σύγχρονης μηχανής μαγνητικής αντίστασης μπορούν να προκύψουν από τις συμβατικές εξισώσεις ενός τυπικού πεδίου σύγχρονης μηχανής. Στη σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης το τυλίγμα διέγερσης δεν υπάρχει. Επιπλέον, στις μηχανές με δομή αξονικών ή εγκάρσιων επιστρώσεων δρομέα, ο κλωβός του δρομέα κανονικά απουσιάζει αφού είναι δυνατή η σύγχρονη εκκίνηση από μηδενική ταχύτητα με τη βοήθεια κατάλληλου μετατροπέα (inverter).



Σχήμα 3.5. Διπολικός σύγχρονος κινητήρας μαγνητικής αντίστασης. [5]

Έτσι, εξαλείφοντας τους παράγοντες του τυλίγματος πεδίου και του τυλίγματος απόσβεσης από τις εξισώσεις Park, η βάση για τις d-q εξισώσεις της σύγχρονης μηχανής μαγνητικής αντίστασης προκύπτει ως εξής:

$$v_d = r_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_r \lambda_{qs} \quad (3.1)$$

$$v_q = r_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} - \omega_r \lambda_{ds} \quad (3.2)$$

όπου:

$$\lambda_{ds} = L_{ls}i_{ds} + L_{md}i_{ds} = L_{ds}i_{ds} \quad (3.3)$$

$$\lambda_{qs} = L_{ls}i_{qs} + L_{mq}i_{qs} = L_{qs}i_{qs} \quad (3.4)$$

L_{ls} , L_{md} και L_{mq} είναι η αυτεπαγωγή ροής του στάτη, η αυτεπαγωγή ορθού άξονα μαγνήτισης και η αυτεπαγωγή εγκάρσιου άξονα μαγνήτισης, αντίστοιχα. Η ποσότητα r_s είναι η αντίσταση ανά φάση του στάτη. Σε όρους των d-q μεταβλητών, η ηλεκτρομαγνητική ροπή είναι πανομοιότυπη με αυτή μιας σύγχρονης μηχανής:

$$T_e = \frac{3P}{2} (\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds}) \quad (3.5)$$

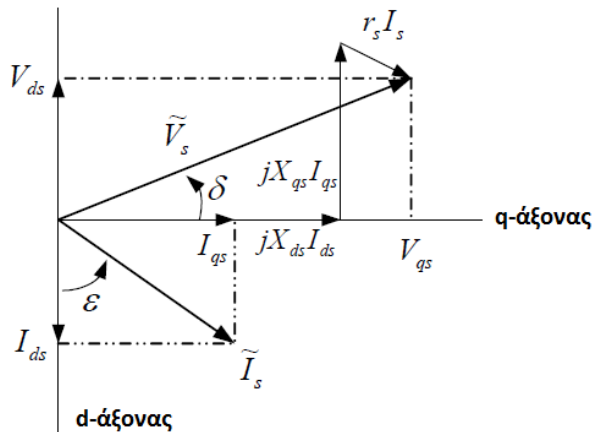
όπου P είναι το πλήθος των πόλων.

3.3.2. Οι εξισώσεις μόνιμης κατάστασης για τον σύγχρονο κινητήρα μαγνητικής αντίστασης

Οι d-q εξισώσεις εκφράζουν τη συμπεριφορά των φυσικών ρευμάτων του στάτη και του δρομέα σε ένα πλαίσιο αναφοράς το οποίο στρέφεται, με το δρομέα της μηχανής να έχει τον ίδιο ρόλο όπως στη σύγχρονη μηχανή με τύλιγμα δρομέα με δακτυλίους. Όταν εφαρμόζεται τριφασική τροφοδοσία στη μηχανή, σχηματίζεται ένα σταθερού πλάτους στρεφόμενο διάνυσμα στο d-q επίπεδο. Όταν ο δρομέας στρέφεται στην ίδια γωνιακή ταχύτητα με το στρεφόμενο διάνυσμα της τροφοδοσίας (τροποποιημένο κατά το πλήθος των πόλων), το διάνυσμα της τάσης φαίνεται να είναι σταθερό ως προς το δρομέα (πλαίσιο αναφοράς). Στην περίπτωση αυτή, είναι τυπικό να αναλυθεί το διάνυσμα τάσης του στάτη στους d-q άξονες ως δύο συνιστώσες (Σχήμα 3.6):

$$V_{qs} = \tilde{V}_s \cos \delta \quad (3.6)$$

$$V_{ds} = -\tilde{V}_s \sin \delta \quad (3.7)$$



Σχήμα 3.6. Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης μηχανής μαγνητικής αντίστασης. [5]

Οι μεταβλητές στις διαφορικές εξισώσεις (3.1) και (3.2) επίσης γίνονται σταθερές στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Δηλαδή ο όρος $\frac{d}{dt}$ μπορεί να εξαλειφθεί. Τα ρεύματα μπορούν έπειτα να επιλυθούν συναρτήσει των τάσεων ως εξής:

$$I_{ds} = \frac{\omega_e L_{qs} V_{qs} + r_s V_{ds}}{r_s^2 + \omega_e^2 L_{ds} L_{qs}} \quad (3.8)$$

$$I_{qs} = \frac{-\omega_e L_{ds} V_{ds} + r_s V_{qs}}{r_s^2 + \omega_e^2 L_{ds} L_{qs}} \quad (3.9)$$

ή, προσεγγιστικά, αγνοώντας την αντίσταση του στάτη:

$$I_{ds} = \frac{V_{qs}}{\omega_e L_{ds}} \quad (3.10)$$

$$I_{qs} = \frac{-V_{ds}}{\omega_e L_{qs}} \quad (3.11)$$

3.3.3. Μιγαδικές εξισώσεις για τη σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης

Εναλλακτικά, είναι δυνατό να δημιουργηθεί μια μιγαδική εξίσωση από τις εξισώσεις (3.1) και (3.2) για τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας πολλαπλασιάζοντας την εξίσωση (3.1) με $-j$ ($j = \sqrt{-1}$) και προσθέτοντας το στην εξίσωση (3.2). Έτσι, προκύπτει:

$$v_{qs} - jv_{ds} = r_s(I_{qs} - I_{ds}) + \omega_e(\lambda_{ds} + \lambda_{qs}) \quad (3.12)$$

ή, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (2.3) και (2.12):

$$v_{qs} - jv_{ds} = r_s(I_{qs} - I_{ds}) + \omega_e(L_{ds}I_{ds} + L_{qs}I_{qs}) \quad (3.13)$$

Η εξίσωση (2.13) μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$V_{qs} - jV_{ds} = r_s(I_{qs} - I_{ds}) + j\omega_e L_{ds}(-jI_{ds}) + j\omega_e L_{qs}I_{qs} \quad (3.14)$$

Και χρησιμοποιώντας τον μιγαδικό συμβολισμό:

$$\tilde{V}_s = r_s \tilde{I}_s + jX_{ds} \tilde{I}_{ds} + jX_{qs} \tilde{I}_{qs} \quad (3.15)$$

Ένα διάγραμμα διανυσμάτων της εξίσωσης (3.15) φαίνεται παραπάνω (Σχήμα 3.6).

3.3.4. Η εξίσωση της ροπής για λειτουργία με σταθερο V/f και σταθερό ρεύμα

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.10) και (3.11), η εξίσωση της ροπής μπορεί να επιλυθεί συναρτήσει της τάσεις ως εξής:

$$T_e = \frac{3P}{2} (L_{ds} - L_{qs}) \frac{-\omega_e L_{ds} r_s V_{ds}^2 + \omega_e L_{qs} r_s V_{qs}^2 + (r_s^2 - \omega_e^2 L_{ds} L_{qs}) V_{ds} V_{qs}}{(r_s^2 + \omega_e^2 L_{ds} L_{qs})^2} \quad (3.16)$$

Για όλες τις συχνότητες, εκτός αυτών κοντά στο μηδέν, η εξίσωση (3.16) προσεγγίζει καλά αγνοώντας την αντίσταση στάτη. Στην περίπτωση αυτήν, η εξίσωση (3.16) γράφεται:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_{ds} - L_{qs}}{L_{ds} L_{qs}} \frac{V_{ds} V_{qs}}{\omega_e \omega_e} \quad (3.17)$$

Αφαιρώντας τις εξισώσεις (3.6) και (3.7) προκύπτει η ροπή συναρτήσει της τάσης, της συχνότητας και της γωνίας ροπής ως εξής:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \left(\frac{1}{L_{qs}} - \frac{1}{L_{ds}} \right) \left(\frac{V_s}{\omega_e} \right)^2 \frac{\sin 2\delta}{2} \quad (3.18)$$

Όπως διαπιστώνεται, η ροπή μεταβάλλεται με το τετράγωνο του λόγου της τάσης προς τη συχνότητα και με το ημίτονο της διπλάσιας γωνίας ροπής. Όταν ο λόγος της τάσης προς τη συχνότητα είναι σταθερός, η μέγιστη ροπή επιτυγχάνεται όταν $\delta = 45^\circ$. Προκύπτει, λοιπόν, ότι η μέγιστη ροπή για σταθερό λόγο της τάσης προς τη συχνότητα είναι:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \left(\frac{1}{L_{qs}} - \frac{1}{L_{ds}} \right) \left(\frac{V_s}{\omega_e} \right)^2 \quad (3.19)$$

Αν οι εξισώσεις (3.3) και (3.4) αντικατασταθούν στην εξίσωση (3.5), η εξίσωση ροπής μπορεί να γραφεί συναρτήσει των d-q ρευμάτων του στάτη ως εξής:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_{ds} - L_{qs}) I_{ds} I_{qs} \quad (3.20)$$

Είναι φανερό πως τα ρεύματα που περιγράφονται από τις εξισώσεις (3.8) και (3.9) περιγράφουν ένα σταθερού πλάτους διάνυσμα ρεύματος I_s στο d-q επίπεδο. Αν οι εξισώσεις αυτές γραφούν ως εξής:

$$I_{ds} = I_s \cos \varepsilon \quad (3.21)$$

$$I_{qs} = I_s \sin \varepsilon \quad (3.22)$$

Τότε η ηλεκτρομαγνητική ροπή μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του ρεύματος στάτη και της «μαγνητεγερτικής γωνίας» ε ως εξής:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_{ds} - L_{qs}) I_s^2 \frac{\sin 2\varepsilon}{2} \quad (3.23)$$

3.3.5. Μέγιστος συντελεστής ισχύος

Ένα συχνά χρησιμοποιούμενο επιχείρημα κατά της χρήσης ενός σύγχρονου κινητήρα μαγνητικής αντίστασης είναι ο μικρός συντελεστής ισχύος. Είναι χρήσιμο να εξεταστεί το θέμα αυτό πιο διεξοδικά. Αναφερόμενοι στο Σχήμα 3.6, ο συντελεστής ισχύος ενός σύγχρονου κινητήρα μαγνητικής αντίστασης, $\cos \varphi$, μπορεί να εκφραστεί

ως ο λόγος της προβολής του διανύσματος της τάσης στο διάνυσμα του ρεύματος προς το μέτρο του διανύσματος της τάσης. Δηλαδή:

$$\cos \varphi = \frac{V_{qs} \sin \varepsilon - V_{ds} \cos \varepsilon}{\sqrt{V_{qs}^2 + V_{ds}^2}} \quad (3.24)$$

Πάλι είναι βολικό να αγνοηθεί η αντίσταση στάτη. Προφανώς, η περίπτωση αυτήν είναι μια απαισιόδοξη υπόθεση αφού κάθε αντίσταση θα αύξανε τον συντελεστή ισχύος. Έτσι, το αποτέλεσμα που θα προκύψει είναι το κάτω όριο (ελάχιστο). Από τις εξισώσεις (3.8) και (3.9), η εξίσωση (3.24), μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\cos \varphi = \frac{\omega_e L_{ds} I_{ds} \sin \varepsilon - \omega_e L_{qs} I_{qs} \cos \varepsilon}{\sqrt{(\omega_e L_{ds} I_{ds})^2 + (\omega_e L_{qs} I_{qs})^2}} \quad (3.25)$$

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (3.21) και (3.22) έχουμε:

$$\cos \varphi = \frac{\omega_e L_{ds} I_s \cos \varepsilon \sin \varepsilon - \omega_e L_{qs} I_s \sin \varepsilon \cos \varepsilon}{\sqrt{(\omega_e L_{ds} I_s \cos \varepsilon)^2 + (\omega_e L_{qs} I_s \sin \varepsilon)^2}} \quad (3.26)$$

το οποίο απλοποιείται σε:

$$\cos \varphi = \frac{(L_{ds} - L_{qs}) \sin \varepsilon \cos \varepsilon}{\sqrt{(L_{ds} \cos \varepsilon)^2 + (L_{qs} \sin \varepsilon)^2}} \quad (3.27)$$

ή:

$$\cos \varphi = \frac{k-1}{\sqrt{k^2 \frac{1}{\sin^2 \varepsilon} + \frac{1}{\cos^2 \varepsilon}}} \quad (3.28)$$

Όπου το k δηλώνει το λόγο εκτυπότητας $\left(k = \frac{L_{ds}}{L_{qs}}\right)$.

Η εξίσωση (3.28) δίνει το συντελεστή ισχύος συναρτήσει της μαγνητεγερτικής γωνίας ε για μια μηχανή με λόγο εκτυπότητας, k . Είναι χρήσιμο να καθορίσουμε ποιες είναι οι τιμές της μαγνητεγερτικής γωνίας οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα μέγιστο συντελεστή ισχύος. Αν το σημείο αυτό επιλεγεί ως ονομαστική τιμή τότε η μηχανή μπορεί να θεωρηθεί ότι λειτουργεί στην κατάσταση βέλτιστης μετατροπής ενέργειας.

Αν θεωρηθεί ότι $x = \sin^2 \varepsilon$ και αντικατασταθεί στην εξίσωση (3.28), ο συντελεστής ισχύος $\cos \varphi$ εκφράζεται ως συνάρτηση του x :

$$\cos \varphi(x) = \frac{k-1}{\sqrt{k^2 \frac{1}{x} + \frac{1}{1-x}}} \quad (3.29)$$

Παραγωγίζοντας την εξίσωση (3.29) ως προς x και λύνοντας, προκύπτει η τιμή του x η οποία δίνει τη μέγιστη τιμή του $\cos \varphi(x)$. Έτσι,

$$\frac{d}{dx} \cos \varphi(x) = \frac{k-1}{\left(k^2 \frac{1}{x} + \frac{1}{1-x}\right)^{-3/2}} \left(\frac{-k^2}{x^2} + \frac{1}{(1-x)^2} \right) = 0 \quad (3.30)$$

Αφού το $k = 1$ δεν είναι λύση, έχουμε:

$$-k^2(1-x)^2 + x^2 = 0 \quad (3.31)$$

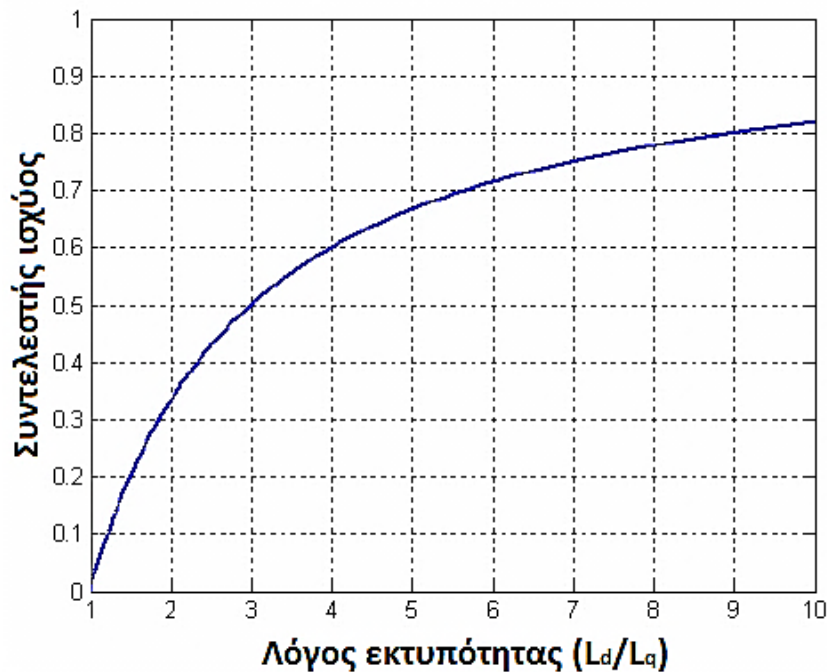
Αφού $x \neq 0$ και $k \neq 0$, η λύση είναι $x = k(1-x)$ ή

$$\sin^2 \varepsilon = k(1 - \sin^2 \varepsilon) = k \cos^2 \varepsilon \quad (3.32)$$

Δηλαδή $\tan \varepsilon = \sqrt{k}$ και έτσι:

$$\cos \varphi_{max} = \frac{k-1}{\sqrt{k^2 \frac{1}{1+k} + \frac{1}{1-k}}} = \frac{k-1}{k+1} \quad (3.33)$$

Ο συντελεστής ισχύος παίρνει τη μέγιστη τιμή $\cos \varphi_{max} = \frac{k-1}{k+1}$, όταν η μαγνητεγερτική γωνία παίρνει τιμή τέτοια ώστε $\tan \varepsilon = \sqrt{k}$.



Σχήμα 3.7. Συντελεστής ισχύος συναρτήσει του λόγου εκτυπότητας (k) ενός σύγχρονου κινητήρα μαγνητικής αντίστασης. [5]

Σημειώνεται ότι για μηχανές με λόγο εκτυπότητας 7-8, ο συντελεστής ισχύος είναι κοντά στο 0,8. Η τιμή αυτή είναι μια τυπική τιμή της κλάσης Β των μηχανών επαγωγής ονομαστικής ισχύος περίπου 10 hp.

Το σημείο λειτουργίας μεγίστου συντελεστή ισχύος είναι προφανώς μια ιδανική συνθήκη λειτουργίας για την οποία ορίζεται η ονομαστική ροπή. Αν η αντίσταση του

στάτη αγνοείται, η ισχύς εισόδου και η ισχύς εξόδου μπορούν να εξισωθούν. Η ισχύς εισόδου για τη συνθήκη μεγίστου συντελεστή ισχύος είναι από την εξίσωση (3.33):

$$P_{pf(max)} = \frac{3}{2} V_s I_s \cos \varphi = \frac{3}{2} V_s I_s \frac{L_{ds} - L_{qs}}{L_{ds} + L_{qs}} \quad (3.34)$$

Όταν η αντίσταση του στάτη αγνοείται, έχουμε:

$$V_{qs} = V_s \cos \delta = X_{ds} I_{ds} = X_{ds} I_s \cos \varepsilon \quad (3.35)$$

$$V_{ds} = V_s \sin \delta = X_{qs} I_{qs} = X_{qs} I_s \sin \varepsilon \quad (3.36)$$

Λαμβάνοντας το λόγο των δύο αυτών εξισώσεων, προκύπτει:

$$\tan \delta = \frac{X_{qs}}{X_{ds}} \tan \varepsilon = \frac{L_{qs}}{L_{ds}} \tan \varepsilon \quad (3.37)$$

Ωστόσο, όπως είδαμε προηγουμένως, $\tan \varepsilon = \sqrt{k}$ ή $\tan \varepsilon = \sqrt{\frac{L_{ds}}{L_{qs}}}$, έτσι η εφαπτομένη της γωνίας ροπής δ στο μέγιστο συντελεστή ισχύος είναι:

$$\tan \delta = \sqrt{\frac{L_{qs}}{L_{ds}}} \quad (3.38)$$

Από τις εξισώσεις (3.37) και (3.38) μπορεί να προκύψει ότι:

$$\cos \varepsilon = \sqrt{\frac{L_{qs}}{L_{ds} + L_{qs}}} \quad (3.39)$$

$$\cos \delta = \sqrt{\frac{L_{ds}}{L_{ds} + L_{qs}}} \quad (3.40)$$

Τελικά από τις εξισώσεις (3.35) και (3.36) το πλάτος του ρεύματος στη συνθήκη μεγίστου συντελεστή ισχύος είναι:

$$I_s = \frac{V_s}{X_{ds}} \sqrt{\frac{L_{ds}}{L_{qs}}} \quad (3.41)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (3.32), (3.33) και (3.34) μπορούμε να εκφράσουμε την ισχύ εισόδου αποκλειστικά συναρτήσει της τάσης εισόδου ως εξής:

$$P_{pf(max)} = \frac{3}{2} \frac{V_s^2}{\omega_e} \frac{1}{\sqrt{L_{ds} L_{qs}}} \frac{L_{ds} - L_{qs}}{L_{ds} + L_{qs}} \quad (3.42)$$

Από την εξίσωση (3.19), η ροπή εξόδου δίνεται:

$$T_{e(po)} = \frac{3}{4} \frac{P}{2} \left(\frac{1}{L_{qs}} - \frac{1}{L_{ds}} \right) \left(\frac{V_s}{\omega_e} \right)^2 \quad (3.43)$$

Αμελώντας τις απώλειες η ισχύς εισόδου είναι:

$$P_{po} = \frac{2\omega_e}{P} T_{e(po)} = \frac{3}{4} \left(\frac{1}{L_{qs}} - \frac{1}{L_{ds}} \right) \frac{V_s^2}{\omega_e} \quad (3.44)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις (3.44) και (3.42) προκύπτει:

$$\frac{P_{po}}{P_{pf(max)}} = \frac{1}{2} \frac{L_{ds} + L_{qs}}{\sqrt{L_{ds} L_{qs}}} \quad (3.45)$$

Επομένως αν ο λόγος εκτυπότητας είναι $\frac{L_{ds}}{L_{qs}} = 8$, τότε $\frac{P_{po}}{P_{pf(max)}} = 1,59$ η οποία είναι μια πολύ λογική ανά μονάδα τιμή ροπής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Προκαταρκτική Σχεδίαση

4.1. Διαδικασία σχεδίασης

Σήμερα για να καταλάβουμε την ηλεκτρομαγνητική, θερμική και μηχανική συμπεριφορά των μηχανών βασιζόμαστε κυρίως σε αριθμητικές μεθόδους. Πέρα από τη σφαίρα του απλού υπολογισμού απαιτείται φαντασία και κρίση για τη σχεδίαση μιας ηλεκτρικής μηχανής. Οι περισσότερες από τις εργασίες κλειδιά βασίζονται σε λογισμικό και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

1. Βασική ηλεκτρική και μηχανική σχεδίαση
2. Θερμική ανάλυση
3. Έλεγχος και ανάλυση λειτουργίας του συστήματος
4. Μηχανική CAD
5. Μηχανική ανάλυση
6. Βελτιστοποίηση
7. Διαχείριση βάσης δεδομένων (σχέδια, κατασκευαστικές λεπτομέρειες, κ.ά)

Οι πιο θεμελιώδεις εργασίες είναι η (1) και η (2). Αυτές οι δύο εργασίες καθορίζουν τις διαστάσεις του κινητήρα, τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή και τη λειτουργία του. Στην απλούστατη περίπτωση, η εργασία (3) επιβεβαιώνει ότι ο κινητήρας θα εκκινήσει όταν συνδεθεί με την τροφοδοσία και θα σταματήσει όταν αποσυνδεθεί. Πιο πολύπλοκες προσομοιώσεις, ίσως, απαιτούνται όταν η σχεδίαση του κινητήρα σχετίζεται με τη σχεδίαση πολυπλοκότερου συστήματος, όπως το σύστημα κίνησης ενός ηλεκτρικά αυτοκινούμενου οχήματος. Η εργασία (4) είναι απαραίτητο τμήμα της κατασκευής και συνήθως ολοκληρώνεται με την εργασία (5). Η εργασία (6) είναι για τη βελτίωση της σχεδίασης και απαιτεί ένα γρήγορο και αξιόπιστο υπολογιστικό σύστημα για τις εργασίες (1) και (2). Η εργασία (7) δεν είναι πραγματικά απαραίτητη για τη σχεδίαση του κινητήρα, αλλά είναι συνήθως σημαντική η διασύνδεση του λογισμικού σχεδίασης με μια βάση δεδομένων η οποία να περιέχει σχεδιάσεις και πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά των υλικών.

Μια σχεδίαση ορίζεται από ένα σύνολο παραμέτρων σχεδίασης. Οι παράμετροι σχεδίασης περιλαμβάνουν όλες τις διαστάσεις των επιστρώσεων, των τυλίγμάτων, των μαγνητών, κτλ. Περιλαμβάνουν, επίσης, το πλήθος των σπειρών του τυλίγματος, τη διάταξη του τυλίγματος και πολλές λεπτομέρειες της τροφοδοσίας. Για κινητήρες οι οποίοι τρέχουν από ηλεκτρονικά συστήματα οδήγησης, η σχεδίασή τους μπορεί να περιλαμβάνει λεπτομέρειες των παραμέτρων ελέγχου όπως είναι οι γωνίες μεταγωγής, τιμές τάσης ή/και ρεύματος, κ.ά.

Η διαδικασία σχεδίασης ξεκινάει καθορίζοντας ένα σετ λειτουργικών απαιτήσεων. Περιλαμβάνει, επίσης, υπολογισμούς επίδοσης για να επιβεβαιώσει ότι η σχεδίαση ανταποκρίνεται στις λειτουργικές απαιτήσεις. Επειδή δεν υπάρχει μια γενική διαδικασία για τη σύνθεση μιας σχεδίασης η οποία θα ανταποκρίνεται στις λειτουργικές απαιτήσεις, οι περισσότεροι σχεδιαστές βασίζονται σε μια επαναληπτική ή αναδρομική διαδικασία κατά την οποία οι παράμετροι προσαρμόζονται αναδρομικά έως ότου οι υπολογισμοί να ικανοποιούν τις αρχικές απαιτήσεις. Τα τελικά αποτελέσματα αναγράφονται στο φύλλο σχεδίασης συνοψίζοντας όλες τις σχεδιαστικές παραμέτρους και πολλές λειτουργικές καταστάσεις αποτυπωμένες γραφικά.

Ακόμη και όταν ένα πρόγραμμα υπολογιστή είναι διαθέσιμο για να εκτελεστούν οι υπολογισμοί επίδοσης, ο μηχανικός σχεδίασης πρέπει να πάρει μόνος όλες τις αποφάσεις σχετικά με την προσαρμογή των παραμέτρων. Με άλλα λόγια, όλη η εφυία και η δημιουργικότητα παρέχεται από το μηχανικό σχεδίασης, ενώ ο υπολογιστής μοντελοποιεί την τρέχουσα σχεδίαση. Οι υπολογισμοί της επίδοσης μπορεί να είναι πολύπλοκοι και επαναλαμβανόμενοι, ενώ οι αποφάσεις σχεδίασης μπορεί να είναι λεπτοί, ευαίσθητοι και να εμπλέκουν δύσκολους συμβιβασμούς και κρίσεις. Αυτή είναι η διαχωριστική γραμμή των ευθυνών ανάμεσα στο λογισμικό και τον μηχανικό σχεδίασης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδίασης.

Η βασική διαδικασία σχεδίασης περιλαμβάνει τρία βήματα:

- Την ενσωμάτωση της ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων στον υπολογισμό της επίδοσης
- Την αυτοματοποίηση μερικών ή όλων των χειροκίνητων επαναλήψεων
- Την αποθήκευση και διαχείριση της σχεδίασης σε μια βάση δεδομένων

Η ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων γενικά χρησιμοποιείται ιδιαίτερα για την ανάλυση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων και για τη θερμική ανάλυση. Παρά την πρόοδο που γίνεται στην ταχύτητα της υπολογιστικής επεξεργασίας η ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι σχετικά αργή.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι ο καθορισμός των λειτουργικών απαιτήσεων του ηλεκτρικού κινητήρα και η επιλογή των βασικών παραμέτρων της σχεδίασής του μέσω αναλυτικών σχέσεων. Στο επόμενο κεφάλαιο πραγματοποιείται η ανάλυση της παραμετροποιημένης σχεδίασης

με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση λογισμικού και προκύπτει η τελική σχεδίαση για τις τέσσερις μηχανές.

4.2. Κατασκευαστικά υλικά ηλεκτρικών μηχανών

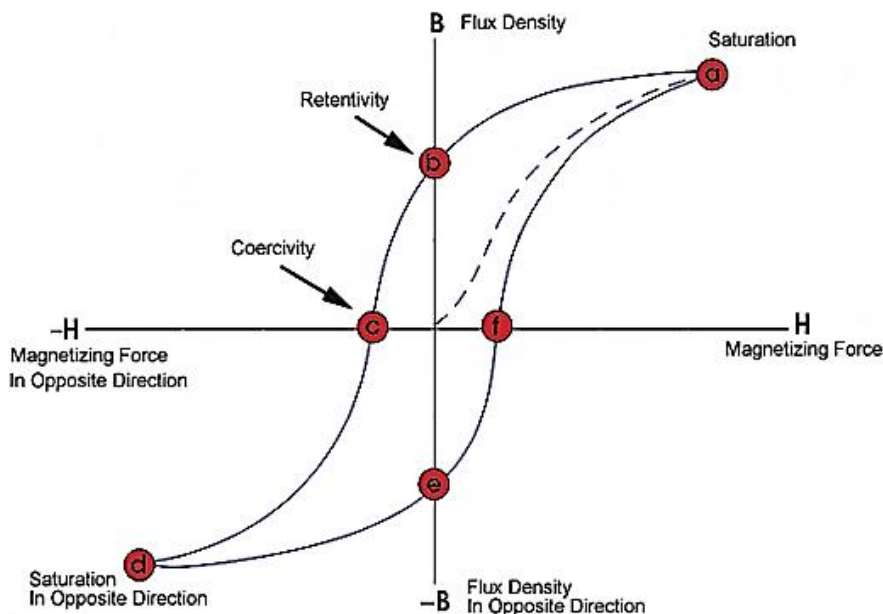
Ο πυρήνας του στάτη ή του δρομέα κατασκευάζεται από σιδηρομαγνητικό υλικό, το οποίο καθοδηγεί τη μαγνητική ροή στα κατάλληλα σημεία της μηχανής. Η μεταβλητότητα της μαγνητικής ροής, μαζί με το κόστος των επιμέρους υλικών, καθορίζουν την επιλογή ανάμεσα σε λαμαρίνα και συμπαγή σίδηρο. Οι ιδιότητες των σιδηρομαγνητικών υλικών είναι χρήσιμες αλλά και προβληματικές. Γι' αυτόν το λόγο, οι κατασκευαστές ηλεκτρικών μηχανών πρέπει να επιλέγουν το κατάλληλο υλικό ανάλογα με τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν.

Οι απαιτούμενες ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες των υλικών κατασκευής του πυρήνα είναι:

- 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 εμβαδόν βρόχου υστέρησης και μικρή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνονται μειωμένες ειδικές απώλειες, υψηλή απόδοση και μικρή θερμοκρασιακή αύξηση κατά τη λειτουργία. Μειώνονται, επίσης, οι απαιτήσεις απαγωγής θερμότητας, ενώ η μέθοδος ψύξης γίνεται απλούστερη και λιγότερο δαπανηρή. Συνεπώς, επιλέγοντας υλικά χαμηλών απωλειών το λειτουργικό κόστος της ηλεκτρικής μηχανής μειώνεται.

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά διαχωρίζονται σε μαλακά και σκληρά. Τα μαλακά σιδηρομαγνητικά εμφανίζουν μικρές τιμές παραμένοντος μαγνητισμού, δηλαδή, όταν πάψουν να μαγνητίζονται, χάνουν σε μεγάλο βαθμό τη μαγνητική τους ροή. Η καμπύλη μαγνήτισης ενός μαλακού σιδηρομαγνητικού υλικού έχει μεγάλη κλίση, δηλαδή τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά εμφανίζουν υψηλή σχετική μαγνητική διαπερατότητα, ενώ ο βρόχος υστέρησης έχει μικρό εμβαδό με συνέπεια οι απώλειες υστέρησης να είναι μειωμένες. Μερικά παραδείγματα τέτοιων υλικών είναι ο μαλακός σίδηρος, ο πυριτιούχος χάλυβας και τα κράματα σιδήρου-νικελίου τύπου Permalloy. Χρησιμοποιούνται στην κατασκευή μετασχηματιστών και ηλεκτρικών γεννητριών και κινητήρων. Από την άλλη μεριά, τα σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά είναι «μόνιμοι μαγνήτες». Η καμπύλη μαγνήτισης ενός σκληρού σιδηρομαγνητικού υλικού έχει μικρότερη κλίση, ενώ το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης είναι μεγαλύτερο. Κατά συνέπεια, η σχετική μαγνητική διαπερατότητα είναι χαμηλότερη και οι απώλειες υστέρησης είναι υψηλότερες. Ένα τυπικό σκληρό μαγνητικό υλικό είναι το κράμα Alnico. Τα σκληρά μαγνητικά υλικά είναι κατάλληλα για την κατασκευή μόνιμων μαγνητών, στους οποίους είναι επιθυμητές μεγάλες τιμές τόσο

για την παραμένουσα μαγνήτιση όσο και για το πεδίο επαναφοράς ώστε να μην απομαγνητίζονται εύκολα.



Σχήμα 4.1. Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού. [35]

Αναφορικά με το συμπαγή σίδηρο, η προσθήκη μικρής ποσότητας πυριτίου βελτιώνει πολλές από τις ιδιότητές του: Η ηλεκτρική αντίσταση αυξάνεται, η μαγνητική αντίσταση μειώνεται και επίσης βελτιώνεται η σταθερότητα των μαγνητικών χαρακτηριστικών στο χρόνο. Η αύξηση της περιεκτικότητας πυριτίου περιορίζεται από το γεγονός ότι ο σίδηρος γίνεται εύθραυστος και υποβαθμίζεται η αντοχή του σε μηχανικές καταπονήσεις. Επιπλέον, σημειώνεται μικρή μείωση στην επαγωγή κόρου. Η παρασκευή κράματος σιδήρου-πυριτίου απαιτεί θερμικές και μηχανικές διεργασίες, με συνέπεια το βελτιωμένο υλικό να έχει αυξημένο κόστος.

Η λαμαρίνα (ελάσματα σιδηρομαγνητικού υλικού) χρησιμοποιείται όταν υπάρχει εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί δινορρεύματα. Η χρήση της περιορίζει τα επαγόμενα δινορρεύματα διότι μειώνεται η αγώγιμη διαδρομή του ρεύματος. Για αυτό το σκοπό η μια ή και οι δύο επιφάνειες του ελάσματος είναι καλυμμένες με μονωτικό υλικό και ο προσανατολισμός τους είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση της μαγνητικής ροής. Η μονωτική επίστρωση προστατεύει επίσης το σίδηρο από την οξείδωση.

Οι τύποι των ελασμάτων είναι δύο: 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 W/Kg και 4 W/Kg για ελάσματα πάχους $0,35 \text{ mm}$ και $0,5 \text{ mm}$ αντίστοιχα σε μαγνητική επαγωγή $1,5 \text{ T}$ και συχνότητα πεδίου 50 Hz . Αντίθετα, τα ελάσματα με κατευθυνόμενους κόκκους παρουσιάζουν μια κατεύθυνση στην οποία οι μαγνητικές

ιδιότητες είναι βελτιωμένες και χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην κατασκευή πυρήνων μετασχηματιστών και όταν απαντώνται υψηλές συχνότητες. Τυπικές τιμές απωλειών σε αυτήν την περίπτωση είναι 1 W/Kg για έλασμα πάχους $0,35 \text{ mm}$ σε μαγνητική επαγωγή $1,5 \text{ T}$ και συχνότητα πεδίου 50 Hz .

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.

Οι μόνιμοι μαγνήτες χρησιμοποιούνται ως εναλλακτική πηγή διέγερσης στις σύγχρονες μηχανές, αντικαθιστώντας το τύλιγμα πεδίου που τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα. Ο μόνιμος μαγνήτης έχει αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια, η οποία διατηρείται αν δεν επιβληθεί πολύ ισχυρό μαγνητικό πεδίο αντίθετα σε αυτόν. Ο μόνιμος μαγνήτης δεν παρέχει ισχύ, αλλά την προϋπόθεση για ανάπτυξη ροπής. Η ισχύς παρέχεται από το τύλιγμα του τυμπάνου της μηχανής. Σημειώνεται ότι και στην περίπτωση χρήσης τυλίγματος για τη δημιουργία του πεδίου διέγερσης, η ενέργεια του πεδίου αυτού διατηρείται. Το βασικό του όμως μειονέκτημα είναι οι ωμικές απώλειες λόγω της αντίστασης των πηνίων.

Συνοπτικά, η χρήση μόνιμων μαγνητών στην κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών προσφέρει μειωμένες απώλειες, ενώ δεν υπάρχει πλέον ανάγκη παροχής DC ρεύματος στο δρομέα μέσω ψηκτρών ή δακτυλίων.

Ένα μειονέκτημά τους είναι η σταθερή τιμή της μαγνήτισής τους, δηλαδή δεν υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής της διέγερσης (field weakening). Επιπλέον, υπάρχει κίνδυνος απομαγνήτισης των μόνιμων μαγνητών λόγω επιβολής ισχυρού εξωτερικού πεδίου, πολύ υψηλής θερμοκρασίας ή έπειτα από έντονη μηχανική καταπόνηση. Παρόλα αυτά, η χρήση τους διαδίδεται όλο και περισσότερο, ιδιαίτερος λόγω της ανακάλυψης του κράματος NdFeB που ήρθε να αντικαταστήσει το ακριβότερο, SmCo.

4.3. Προδιαγραφές συστήματος κίνησης

Η εφαρμογή είναι η κατασκευή ηλεκτρικού κινητήρα σε ηλεκτρικό μίνι-βαν μεταφοράς προσωπικού.

Οι προδιαγραφές προκαταρκτικής σχεδίασης που προκύπτουν από τις απαιτήσεις της εφαρμογής συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα ο οποίος αποτελεί τη βάση του σχεδιασμού.

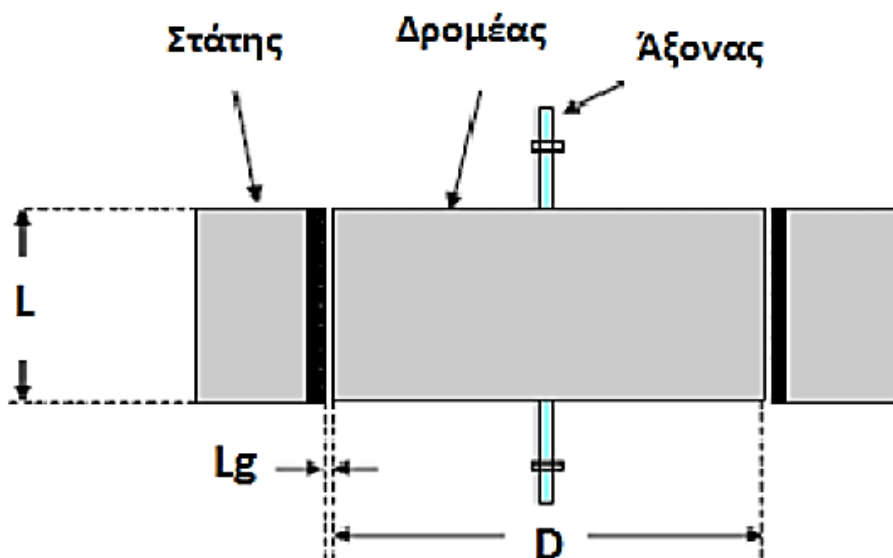
Πίνακας 4.1. Προδιαγραφές του ηλεκτρικού κινητήρα.

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Ονομαστική Ισχύς	100 kW
Ονομαστική Ροπή	125 Nm
Μέγιστη Ροπή	250 Nm
Ονομαστική Ταχύτητα	4500 RPM
Μέγιστη Ταχύτητα	8500 RPM
Ονομαστική Φασική Ενεργός Τάση	150 V
Βαθμός Απόδοσης	≥ 90 %
Μέγιστες Διαστάσεις (διάμετρος × μήκος)	260 mm × 300 mm



Σχήμα 4.2. Μίνι-βάν Ford Transit. [3]

4.4. Θεμελιώδεις σχέσεις προκαταρκτικής σχεδίασης



Σχήμα 4.3. Βασικές διαστάσεις ηλεκτρικής μηχανής. [21]

4.4.1. Ειδική μαγνητική φόρτιση

Η ειδική μαγνητική φόρτιση \bar{B} συνδέει τον αριθμό των πόλων με τη μαγνητική ροή ανά πόλο μέσω της σχέσης:

$$\bar{B} = \frac{p \cdot \Phi}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (4.1)$$

Τυπικές τιμές είναι από $0,5 T$ έως $0,75 T$. Το άνω όριο τίθεται όταν τα δόντια του στάτη βρίσκονται σε κορεσμό. Η ειδική μαγνητική φόρτιση συνδέεται με τις απώλειες πυρήνα της μηχανής.

4.4.2. Ειδική ηλεκτρική φόρτιση

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

$$ac = 3 \cdot \frac{2 \cdot N_s \cdot I}{\pi \cdot D} \quad (4.2)$$

Τυπικές τιμές της ηλεκτρικής φόρτισης είναι από $15000 AE/m$ έως $45000 AE/m$. Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση συνδέεται με τις απώλειες χαλκού της μηχανής.

Η ειδική μαγνητική φόρτιση και η ειδική ηλεκτρική φόρτιση συνδέονται με τη σχέση εξόδου της μηχανής, η οποία δίνει μια εκτίμηση της ροπής ή της ισχύος εξόδου.

Αν ληφθεί ότι:

- Η ενεργός τιμή της επαγόμενης τάσης E δίνεται από τη σχέση:
$$E = 4,44 \cdot k_w \cdot f \cdot N_s \cdot \Phi \quad (4.3)$$

όπου k_w : Συντελεστής τυλίγματος
 f : Ηλεκτρική συχνότητα
 N_s : Συνολικός αριθμός ελιγμάτων ανά φάση
 Φ : Μαγνητική ροή ανά πόλο

- Η φαινόμενη ισχύς της μηχανής δίνεται από τη σχέση:
$$S = 3 \cdot E \cdot I \quad (4.4)$$

όπου I : Ρεύμα της φάσης

- Η ηλεκτρική συχνότητα f συνδέεται με τη μηχανική συχνότητα περιστροφής n σύμφωνα με τη σχέση:

$$f = \frac{p}{2} \cdot n \quad (4.5)$$

Συνδυάζοντας τις τρεις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$S = 1,11 \cdot k_w \cdot \pi^2 \cdot \bar{B} \cdot ac \cdot D^2 \cdot L \cdot n \quad (4.6)$$

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

Όπως παρατηρείται από την παραπάνω σχέση, η ισχύς εξόδου της μηχανής είναι ανάλογη του τετραγώνου της διαμέτρου διακένου και του αξονικού μήκους του ενεργού μέρους του πυρήνα.

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:

$$\eta = \frac{P_{εξ}}{P_{εξ} + P_{απ}} \propto \frac{x^{3,5}}{x^{3,5} + Kx^{3,5}} \propto \frac{1}{1 + \frac{K}{x^{1,5}}} \quad (4.7)$$

Η εξίσωση (4.7) δείχνει ότι η απόδοση αυξάνει με την αύξηση στις γραμμικές διαστάσεις. Αυτό δικαιολογεί εν μέρει γιατί κινητήρες με ισχύ μικρότερη του 1 KW έχουν απόδοση της τάξης του 60 %, ενώ γεννήτριες μεγάλης ισχύος έχουν απόδοση πάνω από 97 %.

4.4.3. Οριακή τάση διακένου

Η οριακή τάση διακένου αποτελεί το βασικό μέγεθος της μηχανικής αντοχής της μηχανής. Το μέγεθος αυτό ορίζεται ως η φυγόκεντρος δύναμη του δρομέα ανά μονάδα επιφάνειας.

Η φυγόκεντρος δύναμη δίνεται από τη σχέση:

$$F = m \cdot \omega_{rm}^2 \cdot R \quad (4.8)$$

όπου m : Ισοδύναμη μάζα του δρομέα στην περιφέρειά του

ω_{rm} : Μηχανική γωνιακή ταχύτητα

Άρα

$$\sigma_{max} = \frac{F}{A} = \frac{m \cdot \omega_{rm}^2}{2\pi \cdot L} \quad (4.9)$$

όπου $A = \pi \cdot D \cdot L$: Εμβαδόν διακένου

Η οριακή τάση διακένου δεν πρέπει να ξεπερνά τη τιμή των 10 tn/cm^2 .

4.4.4. Πυκνότητα ρεύματος τυλίγματος

Η πυκνότητα ρεύματος τυλίγματος αποτελεί βασικό ηλεκτρικό μέγεθος της μηχανής το οποίο σχετίζεται με τη θερμική της ισορροπία καθορίζοντας το μέγεθος των ωμικών απωλειών στο τύλιγμά της. Στη συνήθη περίπτωση, οι θερμικές απώλειες στην ονομαστική κατάσταση λειτουργίας είναι κυρίως απώλειες χαλκού και λιγότερο απώλειες πυρίνα. Οι θερμικές απώλειες έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας της μηχανής. Σε υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας, δηλαδή εάν ξεπεραστούν τα όρια θερμικής αντοχής, υπάρχει ο κίνδυνος καταστροφής των μονώσεων των τυλιγμάτων.

Ένα εμπειρικό όριο της πυκνότητας ρεύματος είναι τα 4 A/mm^2 . Για τιμές μεγαλύτερες από το όριο υπάρχει ανάγκη για εξαναγκασμένη ψύξη ώστε να αυξηθεί η ικανότητα παροχής ισχύος της ηλεκτρικής μηχανής. Η εξαναγκασμένη ψύξη υλοποιείται με τεχνητό αερισμό ή με κλειστό σύστημα κυκλοφορίας ψυκτικού υγρού για μηχανές μεγαλύτερης ισχύος.

4.4.5. Προσδιορισμός ηλεκτρομαγνητικής ροπής

Ο προσδιορισμός της ελάχιστης επιφάνειας του διακένου γίνεται λαμβάνοντας υπόψιν τη μέγιστη επιθυμητή ροπή διακένου. Αρχικά, υπολογίζεται η μέση εφαπτομενική πίεση διακένου η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$P_t = \frac{1}{\pi \cdot D \cdot \mu_o} \cdot \oint_c \overline{B_n} \cdot \overline{B_t} \cdot dc \quad (4.10)$$

όπου B_n : Ακτινική μαγνητική επαγωγή διακένου

B_t : Εφαπτομενική μαγνητική επαγωγή διακένου

Έτσι, η ροπή διακένου T_{el} που δύναται να αναπτύξει η μηχανή, μπορεί να υπολογισθεί με βάση τη μέση εφαπτομενική πίεση των μαγνητικών δυνάμεων στο διάκενο και την επιφάνεια του διακένου σύμφωνα με τη σχέση:

$$T_{el} = \frac{\pi}{2} \cdot D^2 \cdot L \cdot P_t \quad (4.11)$$

4.4.6. Αναλογία διαστάσεων D και L

Η διαστασιολόγηση του διακένου της ηλεκτρικής μηχανής εμπλέκει θέματα επίδοσης, απόδοσης και μηχανικής αντοχής. Σχετικά με την επίδοση, η σχέση (4.6) υποδεικνύει ότι είναι προτιμητέες δυσκοειδείς μηχανές, καθώς η ισχύς της μηχανής αυξάνεται με το τετράγωνο της διαμέτρου του διακένου. Από την άλλη μεριά, η απόδοση της μηχανής δεν αυξάνεται κατ'ανάγκη όταν η αναλογία D/L είναι αυξημένη. Ο λόγος είναι ότι σε περίπτωση μεγάλης διαμέτρου διακένου σε σχέση με το μήκος της μηχανής, αυξάνεται το ποσοστό του τυλίγματος που βρίσκεται έξω από την ενεργή περιοχή του πυρήνα και κατά συνέπεια αυξάνονται οι θερμικές απώλειες. Επίσης, μια μηχανή με πολύ μακρύ διάκενο έχει μεγάλη μάζα πυρήνα και αναμένεται να εμφανίζει αυξημένες απώλειες πυρήνα, επομένως, δεν επιτυγχάνει τη 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 το δρομέα σε μικρή ακτίνα και πλέον η επιθυμητή ισχύς λαμβάνεται με αύξηση του αξονικού μήκους της μηχανής. Σε αυτή την περίπτωση όμως, υπάρχει μηχανικό όριο στη μείωση του λόγου D/L , το οποίο συνίσταται στην ακαμψία του σώματος του δρομέα και τη διατήρηση του διακένου.

Στη βιβλιογραφία προσδιορίζονται ορισμένες αναλογίες που πρέπει να έχει μια μηχανή ώστε να χαρακτηρίζεται από υψηλή επίδοση, απόδοση ή έναν ισορροπημένο συνδυασμό των δύο. Συνήθως, προσδιορίζεται ο λόγος του αξονικού μήκους της μηχανής προς το μήκος ενός πόλου.

Το μήκος πόλου δίνεται από τη σχέση:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{p} \quad (4.12)$$

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.2) παρατίθενται οι περιοχές τιμών του λόγου D/τ με διαφορετικά χαρακτηριστικά η κάθε μία.

Πίνακας 4.2. Περιοχές τιμών λόγου D/τ .

D/τ	Χαρακτηριστικό Μηχανής
1,0	Ισορροπημένη
1,0 – 1,5	Υψηλός συντελεστής Ισχύος
1,5	Υψηλή απόδοση
1,5 – 2,0	Ελάχιστο κόστος

Ωστόσο, σε διπολικές μηχανές και σε κινητήρες ισχύος μικρότερης του 1 KW μπορεί να παρατηρηθούν τιμές του λόγου D/τ μέχρι και 0,6. Ο λόγος είναι ότι σε αυτές τις μηχανές, οι μεγάλες τιμές D/τ δίνουν μικρή διάμετρο με αποτέλεσμα να μην υπάρχει αρκετός χώρος για τις αύλακες του στάτη.

4.4.7. Πάχος διακένου

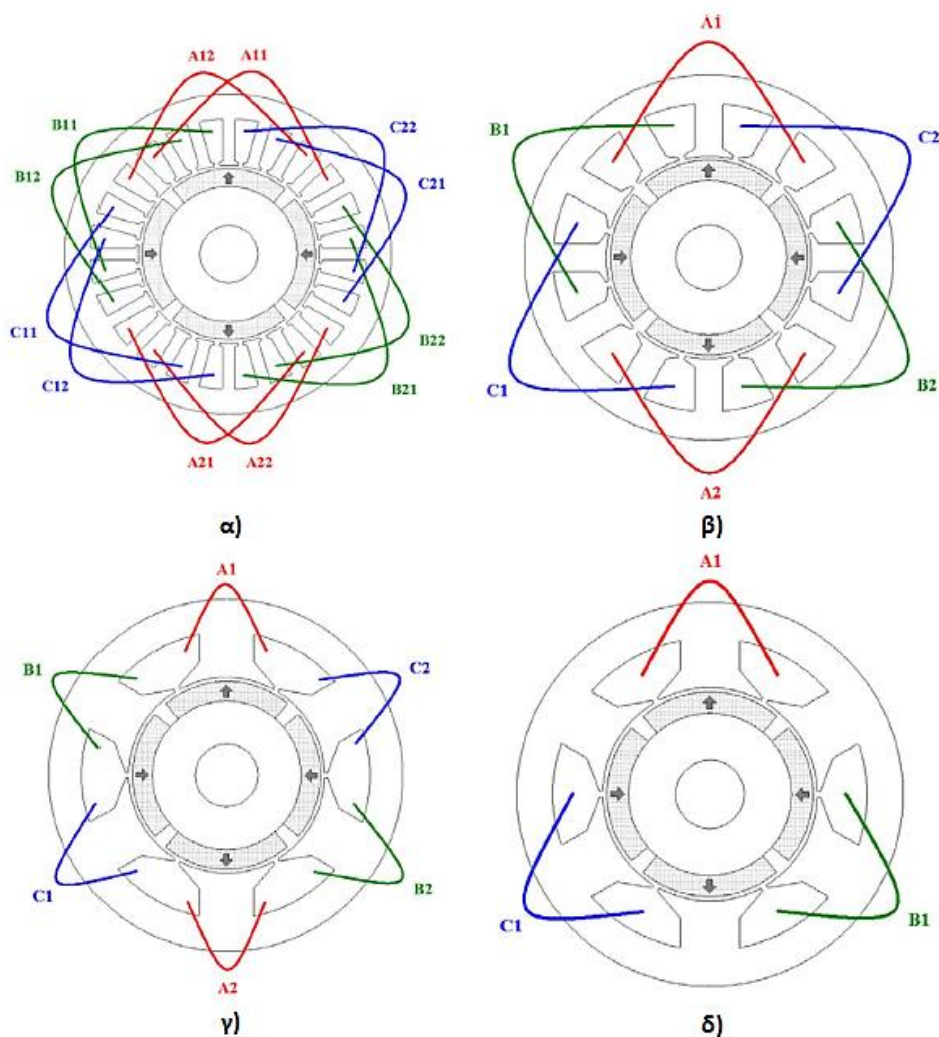
Το πάχος του διακένου είναι πρωτεύουσας σημασίας για την επίτευξη των επιθυμητών χαρακτηριστικών λειτουργίας μιας ηλεκτρικής μηχανής. Γενική αρχή είναι ότι το διάκενο πρέπει να έχει το μικρότερο δυνατό πάχος, το οποίο καθορίζεται από την ακρίβεια κατασκευής και τη δυνατότητα μηχανικής στήριξης δρομέα και στάτη. Οι δυνάμεις για δεδομένη κατασκευή μεγιστοποιούνται όταν το πάχος του διακένου είναι ελάχιστο, οπότε είναι επιθυμητό το πάχος διακένου να είναι το ελάχιστο δυνατό. Εκτός από το θέμα της κατασκευαστικής ακρίβειας του πυρήνα, ιδιαίτερα σημαντικό είναι και το θέμα της εκκεντρότητας, το οποίο τείνει να τρέψει το δρομέα προς την πλευρά όπου παρατηρείται η κατασκευαστική ασυμμετρία, όπου η συνισταμένη δύναμη έλξης ως προς τον άξονα συμμετρίας παύει να είναι μηδενική και παίρνει ανεξέλεγκτα μεγάλη τιμή, με αποτέλεσμα ο δρομέας να κολλάει στο στάτη. Στη βιβλιογραφία δίνονται πολλές σχέσεις για τον υπολογισμό του, μια εκ των οποίων είναι η ακόλουθη:

$$L_g = 0,18 + 0,006 \cdot P^{0,4} \text{ (mm)} \quad (4.13)$$

4.5. Τύλιγμα ηλεκτρικών μηχανών

Το τύλιγμα μιας 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 πρώτο είδος χρησιμοποιείται σε ολιγοπολικές μηχανές, ενώ το δεύτερο σε πολυπολικές χαμηλών ταχυτήτων π.χ. σε υδροηλεκτρικές εφαρμογές), διανεμημένο (με ένα ή περισσότερα αυλάκια ανά πόλο και φάση) και πλήρους ή κλασματικού βήματος.

Στο Σχήμα 4.4 παρατίθενται τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις τυλιγμάτων.



Σχήμα 4.4. Τυπικές διαμορφώσεις τυλιγμάτων στάτη. α) 24 αυλάκια, επικαλυπτόμενο, διανεμημένο. β) 12 αυλάκια, επικαλυπτόμενο. γ) 6 αυλάκια, μη επικαλυπτόμενο, όλα τα δόντια με τυλίγματα. δ) 6 αυλάκια, μη επικαλυπτόμενο, τυλίγματα στα μισά δόντια. [36]

4.5.1. Διανεμημένο τύλιγμα

Το διανεμημένο επικαλυπτόμενο τύλιγμα παράγει γενικά πιο ημιτονοειδή ΜΕΔ στο διάκενο, γι'αυτό και χρησιμοποιείται εκτεταμένα στις μηχανές μόνιμου μαγνήτη χωρίς συλλέκτη (Brushless AC PM machines).

4.5.2. Συγκεντρωμένο τύλιγμα

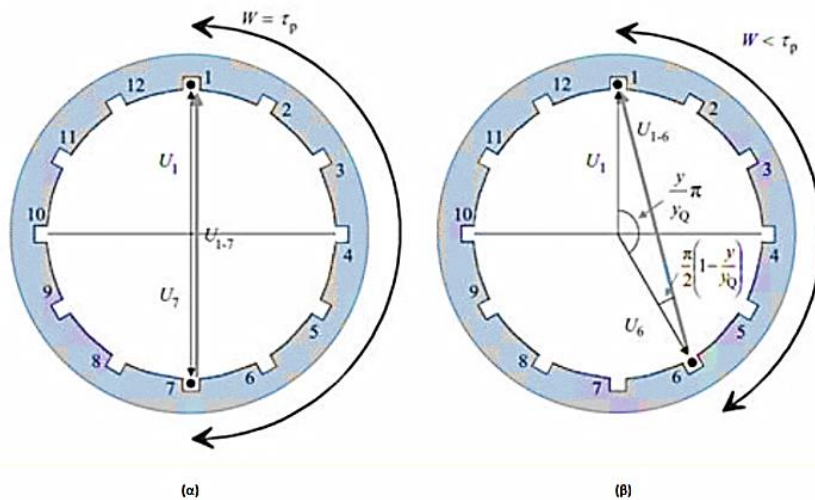
Μια νέα τοπολογία είναι το συγκεντρωμένο τύλιγμα κλασματικού βήματος (Fractional Slot Concentrated Winding) που κερδίζει έδαφος χάρις την υψηλή πυκνότητα ισχύος, την απόδοση και τα κοντά άκρα τυλιγμάτων.

Πίνακας 4.3. Χαρακτηριστικά συγκεντρωμένου-διανεμημένου τυλίγματος.

	Συγκεντρωμένο	Διανεμημένο
Συντελεστής πληρότητας	50% – 65%	35% – 50%
Κατασκευή στάτη	Συνεχή ελάσματα ή τμηματικές κατασκευές	Συνεχή ελάσματα
Τυλίγματα τερματικών συνδέσεων	Κοντά μη-επικαλυπτόμενα	Μακρά επικαλυπτόμενα
Αρμονικό περιεχόμενο παραγόμενης από το στάτη ροπής	Υψηλότερης τάξης αρμονικές στις περισσότερες περιπτώσεις	Θεμελιώδης

4.5.3. Κλασματικό βήμα

Τα τυλίγματα στα οποία ο αριθμός αυλάκων ανά πόλο και 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 μια διπολική μηχανή 12 αυλάκων (πολικού βήματος εκπεφρασμένο σε αύλακες $Q/P = 6$), το πηνίο της αύλακας 1 θα έπρεπε να καταλήγει στην αύλακα 7. Όμως, το πηνίο αυτό καταλήγει στην αύλακα 6, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Συνεπώς, το τυλίγμα είναι κλασματικού βήματος $5/6$.



Σχήμα 4.5. α) Πλήρες βήμα. β) Κλασματικό βήμα. [21]

4.5.4. Διπλή στρώση

Τα τυλίγματα μονής στρώσης παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή στο βραχυκύκλωμα, χάρις τις μεγαλύτερες αυτεπαγωγές ανά φάση (που περιορίζουν το ρεύμα σφάλματος) και τις μικρότερες αμοιβαίες επαγωγές (εμποδίζεται η απώλεια «υγειών» φάσεων σε περίπτωση σφάλματος). Επιπλέον, χάρις τη μεγαλύτερη αυτεπαγωγή σκέδασης,

προτιμώνται σε εφαρμογές που απαιτούν λειτουργία σταθερής ισχύος σε μεγάλο εύρος στροφών.

Στη διπλή στρώση οι απώλειες πυρήνα λόγω δινορρευμάτων είναι χαμηλότερες, εφόσον είναι μικρότερο το αρμονικό περιεχόμενο της ΜΕΔ που προκαλεί η αντίδραση τυμπάνου. Ακόμη, η ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι περισσότερο ημιτονοειδής. Εντούτοις, στη διπλή στρώση η ικανότητα παραγωγής ροπής σε κατάσταση υπερφόρτισης είναι μικρότερη απ'ότι στη μονή στρώση.

Πίνακας 4.4. Χαρακτηριστικά τυλίγμάτων μονής και διπλής στρώσης.

	Τυλίγματα μονής στρώσης	Τυλίγματα διπλής στρώσης
Πηνία ανά αύλακα	Ένα	Δύο
Αμοιβαία ζεύξη φάσεων	Πολύ χαμηλή αμοιβαία επαγωγή	Σημαντική λόγω αυτεπαγωγής σκέδασης στην αύλακα
Άκρα τυλίγματος	Μακρά	Κοντά
Φασική αυτεπαγωγή	Υψηλότερη λόγω μεγαλύτερης αυτεπαγωγής σκέδασης (καλύτερη ικανότητα εξασθένησης πεδίου)	Χαμηλότερη λόγω μικρότερης αυτεπαγωγής σκέδασης
Απώλειες δρομέα	Υψηλότερες λόγω σημαντικότερου αρμονικού περιεχομένου ΜΕΔ στάτη	Χαμηλότερες λόγω χαμηλότερων αρμονικών ΜΕΔ στάτη
Δυνατοί συνδυασμοί αυλακίων-πόλων	Λιγότεροι	Περισσότεροι
Κατασκευή	Ευκολότερη	Δυσκολότερη
Συντελεστής τυλίγματος	Υψηλότερος	Χαμηλότερος
Αντί-ΗΕΔ	Λιγότερο ημιτονοειδής	Πιο ημιτονοειδής

4.6. Προσδιορισμός χαρακτηριστικών μηχανής

4.6.1. Διαστασιολόγηση διακένου

Για τον υπολογισμό των διαστάσεων διακένου πρέπει να επιλεγούν πρώτα τα βασικά μεγέθη της σχεδίασης. Λαμβάνοντας υπόψιν τις συνθήκες μόνιμης κατάστασης, δηλαδή την ηλεκτρομαγνητική ροπή $125 Nm$ προσδιορίζεται η επιφάνεια του διακένου.

Ως μέση επαγωγή διακένου λαμβάνεται η τιμή $0,7 T$.

Γίνεται αποδεκτό ότι η βέλτιστη γωνία της μαγνητικής επαγωγής διακένου είναι $\theta \cong 84^\circ$, οπότε η μέση επαπτομενική πίεση υπολογίζεται:

$$P_t = \frac{B^2 \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \pi \cdot D}{\pi \cdot D \cdot \mu_0} = \frac{B^2 \cdot \sin 2\theta}{2 \cdot \mu_0} = \frac{0,7^2 \cdot \sin(2 \cdot 84^\circ)}{2 \cdot (4\pi \cdot 10^{-7})} \cong 40535 \text{ kN/m}^2$$

Αντικαθιστώντας την τιμή αυτή στην εξίσωση (4.11) προκύπτει ότι:

$$D^2 L = 3926313 \text{ mm}^3$$

Η επιλογή των διαστάσεων D και L γίνεται σε συνδυασμό με την επίλυση του προβλήματος στο FEMM. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η σχέση ανάμεσα στο D και το L διαφοροποιείται ανάλογα με την εφαρμογή. Μεγάλη τιμή του D προσφέρει μεγάλες αύλακες και πολύ χώρο για τα τυλίγματα, επομένως χαμηλότερη πυκνότητα ρεύματος. Από την άλλη, μεγάλη τιμή του L ενδείκνυται για εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων αφού μειώνεται η αδράνεια του δρομέα και η επιφανειακή τάση οι οποίες είναι ανάλογες του τετραγώνου της ακτίνας. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται μερικά δυνατά ζεύγη τιμών ώστε ο κινητήρας να παράγει την απαιτούμενη μέγιστη ροπή.

Πίνακας 4.5. Ζεύγη δυνατών συνδυασμών D και L.

<i>D (mm)</i>	<i>L (mm)</i>
100	393
110	324
120	273
130	232
140	200
150	175
160	153
170	136
180	121
190	109
200	98

Λαμβάνοντας υπόψιν τη γεωμετρία του δρομέα και την ανομοιομορφία της κατανομής στο διάκενο και τις σκεδάσεις της μαγνητικής ροής, οι προτεινόμενες τιμές της διαμέτρου διακένου και του ενεργού μήκους της μηχανής είναι:

$$D = 140 \text{ mm}, L = 200 \text{ mm}$$

Σύμφωνα με τη σχέση (4.13) υπολογίζεται ότι το ελάχιστο πάχος διακένου είναι:

$$L_g = 0,16 + 0,006 \cdot P^{0,4} = 0,16 + 0,006 \cdot 100000^{0,4} \cong 0,8 \text{ mm}$$

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές η πραγματική ισχύς του κινητήρα είναι 100 kW.

Εκτιμάται ότι κατά την κατασκευή μπορεί να επιτευχθεί το συγκεκριμένο πάχος διακένου.

4.6.2. Συχνότητα λειτουργίας και αριθμός πόλων

Η επιλογή ονομαστικής συχνότητας λειτουργίας και αριθμού πόλων σχετίζεται με τη μηχανική ταχύτητα περιστροφής στη μόνιμη κατάσταση:

$$\frac{p}{2} \cdot \omega_m = 2\pi \cdot f \Leftrightarrow \frac{p}{f} = \frac{4\pi}{\omega_m} \quad (4.14)$$

Έχουμε:

$$\frac{p}{f} = \frac{4\pi}{\frac{2\pi \cdot 4500}{60}} = 0,0266$$

Πρέπει $20 \text{ Hz} < f < 400 \text{ Hz}$.

Επιλέγουμε:

$$p = 4 \text{ και } f = 150 \text{ Hz}$$

Επιλέγεται ο αριθμός των πόλων να είναι τέσσερις καθώς μεγαλύτερος αριθμός πόλων θα είχε ως αποτέλεσμα μειωμένη ροπή μαγνητικής αντίστασης.

4.6.3. Προσδιορισμός μεγεθών στάτη

Η μέση ροή ανά πόλο υπολογίζεται:

$$\Phi = \frac{\bar{B} \cdot \pi \cdot L \cdot D}{p} = \frac{0,70 \cdot \pi \cdot 0,200 \cdot 0,140}{4} = 15,4 \text{ mWb}$$

Σύμφωνα με τις προδιαγραφές, η φασική τάση λειτουργίας του κινητήρα είναι 150 V και ο συντελεστής τυλίγματος ισούται με $0,966$, οπότε προκύπτει ότι:

$$N_s = \frac{e}{4,44 \cdot k_w \cdot f \cdot \Phi} = \frac{150}{4,44 \cdot 0,966 \cdot 150 \cdot 0,0154} \approx 15 \text{ σπείρες}$$

Συνεπώς, ο απαιτούμενος αριθμός εν σειρά αγωγών τυλίγματος είναι:

$$N_s = 15 \text{ σπείρες}$$

Η ενεργός τιμή του ρεύματος δίνεται:

$$I_n = \frac{P_{el}}{3 \cdot e \cdot \cos \varphi} = \frac{100000}{3 \cdot 150 \cdot 0,7} = 317 \text{ A}$$

Ο συντελεστής ισχύος θεωρείται ότι είναι $0,7$ και η πραγματική ισχύς του κινητήρα είναι 100 kW σύμφωνα με τις προδιαγραφές.

4.6.4. Διατομή αυλακίου

Το πλήθος των σπειρών ανά αύλακα προκύπτει:

$$n_c = \frac{N_s}{m \cdot q}$$

Το πραγματικό εμβαδόν του χαλκού ανά αύλακα υπολογίζεται ως εξής:

$$S_{cu} = \frac{n_c \cdot I_n}{J}$$

Θεωρώντας συντελεστή πληρότητας της αύλακας ff , το συνολικό εμβαδόν αύλακας πρέπει να είναι:

$$S_{slot} = \frac{S_{cu}}{ff}$$

Ο συντελεστής πληρότητας ff ορίζεται ως ο λόγος του εμβαδού της αύλακας που θα καταλάμβανε το τύλιγμα αν ήταν ιδανικά συμπιεσμένο, δηλαδή χωρίς κενά μέσα σε αυτήν, προς το εμβαδόν της αύλακας.

Οπότε για διανεμημένο τύλιγμα με δύο αυλάκια ανά πόλο και φάση ($q = 2$), ο συνολικός αριθμός αυλακίων είναι: $Q_s = m \cdot q \cdot p = 3 \cdot 2 \cdot 4 = 24$.

Ο αριθμός αυλακίων ανά πόλο είναι: $Q_s/p = m \cdot q = 6$.

Το πλήθος των σπειρών ανά αυλάκι για $N_s = 15$ προκύπτει:

$$n_c = \frac{N_s}{m \cdot q} = \frac{15}{3 \cdot 2} \cong 3$$

Θεωρώντας συντελεστή πληρότητας $ff = 0,50$ προκύπτει ότι το εμβαδόν της αύλακας θα είναι:

$$S_{slot} = 475 \text{ mm}^2$$

Θεωρήθηκε ότι η χωρική πυκνότητα ρεύματος στη μόνιμη κατάσταση μπορεί να πάρει τιμές κοντά στο θερμικό όριο των μονώσεων ($J = 4 \text{ A/mm}^2$) και στην κατάσταση μέγιστης ροπής (προσωρινή υπερφόρτιση) μπορεί να πάρει τιμές μεγαλύτερες από το θερμικό όριο ($J \leq 8 \text{ A/mm}^2$) λόγω ύπαρξης συστήματος ψύξης.

4.6.5. Υπολογισμός ειδικών φορτίσεων

Η ειδική μαγνητική φόρτιση έχει καθοριστεί ίση με:

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

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση υπολογίζεται ως εξής:

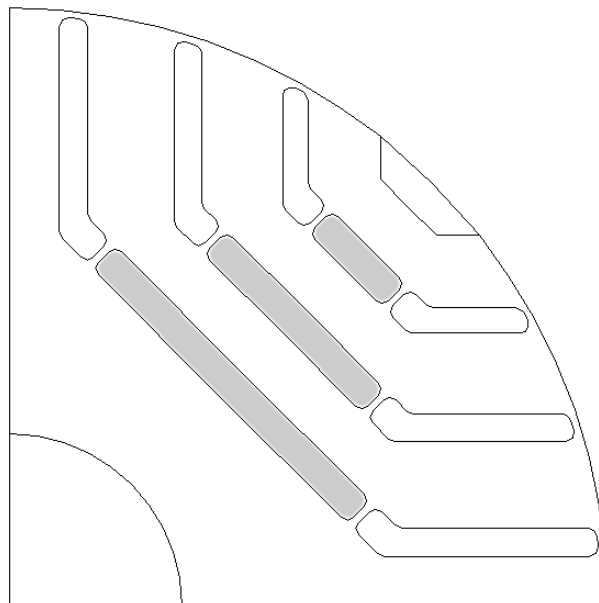
$$ac = 3 \cdot \frac{2 \cdot N_s \cdot I_n}{\pi \cdot D} = 3 \cdot \frac{2 \cdot 15 \cdot 317}{\pi \cdot 0,14} = 64867 \text{ AE/m}$$

4.7. Προτεινόμενες γεωμετρίες δρομέα

Βασιζόμενοι στην προκαταρκτική σχεδίαση και λαμβάνοντας υπόψιν τους κατασκευαστικούς περιορισμούς, οι προτεινόμενες γεωμετρίες δρομέα είναι οι εξής:

4.7.1. Γεωμετρία δρομέα A

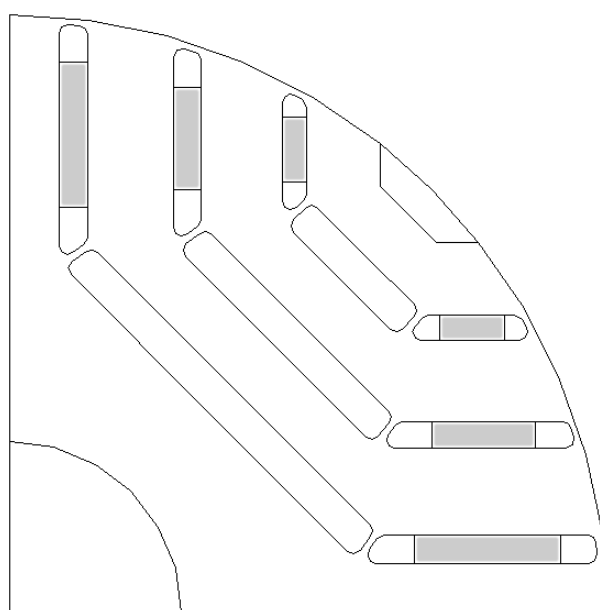
Ο δρομέας αυτός (Σχήμα 4.6) αποτελείται από τέσσερα φράγματα μαγνητικής ροής ανά πόλο. Επιθυμώντας την αποφυγή μιας μεγάλης επαπτόμενης ράβδωσης και χωρίς να επηρεάζεται σημαντικά η μηχανική αντοχή του δρομέα αφαιρέθηκε η επαπτόμενη ράβδωση μεταξύ του πρώτου φράγματος μαγνητικής ροής και διακένου με αποτέλεσμα τη χωρική «επικοινωνία» του πρώτου φράγματος και του διακένου. Το πάχος των φραγμάτων είναι οριακά μεγαλύτερο στον q-άξονα συγκριτικά με τον d-άξονα. Στο εσωτερικό των φραγμάτων μαγνητικής ροής στη διεύθυνση του q-άξονα βρίσκονται τοποθετημένοι οι μαγνήτες οι οποίοι έχουν το ίδιο πάχος αλλά το πλάτος τους μειώνεται όσο πιο κοντά βρίσκονται στο διάκενο. Στο πρώτο φράγμα δεν υπάρχει μαγνήτης. Οι αποστάσεις μεταξύ των φραγμάτων μαγνητικής ροής είναι ίσες μεταξύ τους και μεγαλύτερες στον d-άξονα.



Σχήμα 4.6. Προτεινόμενη γεωμετρία δρομέα A.

4.7.2. Γεωμετρία δρομέα Β

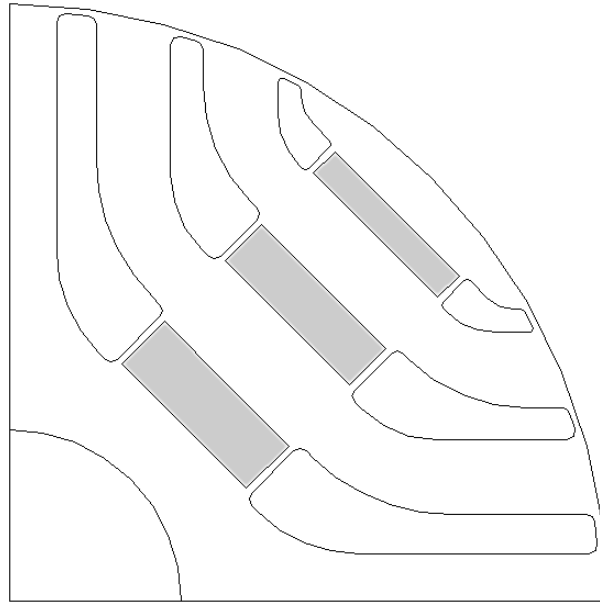
Όπως στην προηγούμενη προτεινόμενη γεωμετρία δρομέα, η γεωμετρία δρομέα Β (Σχήμα 4.7) αποτελείται από τέσσερα φράγματα μαγνητικής ροής ανα πόλο. Το πρώτο φράγμα μαγνητικής ροής «επικοινωνεί» με το διάκενο. Το πάχος των φραγμάτων είναι οριακά μεγαλύτερο στον q-άξονα συγκριτικά με τον d-άξονα. Στο εσωτερικό των φραγμάτων μαγνητικής ροής στη διεύθυνση του d-άξονα βρίσκονται τοποθετημένοι οι μαγνήτες οι οποίοι έχουν το ίδιο πάχος αλλά διαφορετικό πλάτος ανάλογα με το μέγεθος του φράγματος μαγνητικής ροής. Στο πρώτο φράγμα δεν υπάρχει μαγνήτης. Οι αποστάσεις μεταξύ των φραγμάτων μαγνητικής ροής είναι ίσες μεταξύ τους και μεγαλύτερες στον d-άξονα.



Σχήμα 4.7. Προτεινόμενη γεωμετρία δρομέα Β.

4.7.3. Γεωμετρία δρομέα Γ

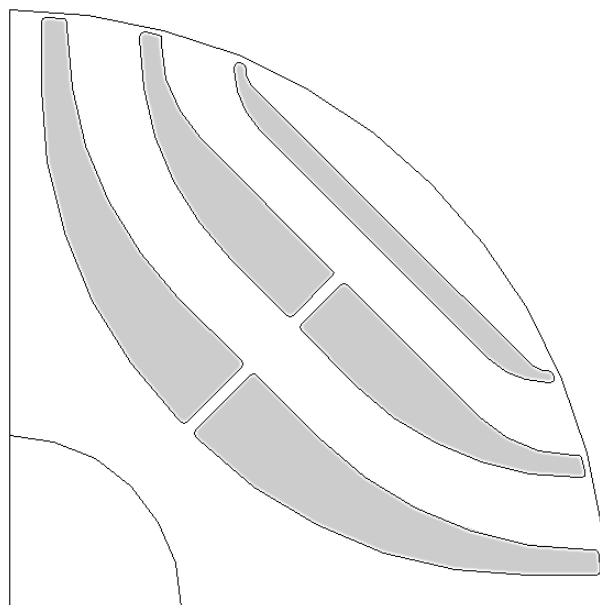
Η γεωμετρία του δρομέα αυτού (Σχήμα 4.8) αποτελείται από τρία φράγματα μαγνητικής ροής ανά πόλο. Το πάχος των φραγμάτων είναι μεγαλύτερο στον q-άξονα συγκριτικά με τον d-άξονα. Στο εσωτερικό των φραγμάτων μαγνητικής ροής στη διεύθυνση του q-άξονα βρίσκονται τοποθετημένοι οι μαγνήτες. Το πλάτος των μαγνητών είναι το ίδιο αλλά το πάχος τους μειώνεται όσο πιο κοντά βρίσκεται ο μαγνήτης στο διάκενο. Όλες οι γωνίες της σχεδίασης είναι στρογγυλεμένες.



Σχήμα 4.8. Προτεινόμενη γεωμετρία δρομέα Γ.

4.7.4. Γεωμετρία δρομέα Δ

Ο δρομέας αυτός (Σχήμα 4.9) αποτελείται από τρία φράγματα μαγνητικής ροής ανά πόλο. Η συγκεκριμένη γεωμετρία δρομέα μοιάζει περισσότερο στην προτεινόμενη γεωμετρία δρομέα Γ (Σχήμα 4.8). Οι κυριότερες διαφορές τους είναι ότι η συγκεκριμένη γεωμετρία αποτελείται από λιγότερες αξονικές ραβδώσεις και το εσωτερικό των φραγμάτων μαγνητικής ροής είναι γεμισμένο πλήρως με μαγνήτη.



Σχήμα 4.9. Προτεινόμενη γεωμετρία δρομέα Δ.

Επειδή ο όγκος του μαγνήτη αυτής της γεωμετρίας είναι πολλαπλάσιος του όγκου μαγνήτη των προηγούμενων γεωμετριών και με σκοπό να πραγματοποιηθεί τελικά οικονομική σύγκριση των προτεινόμενων γεωμετριών, ο μαγνήτης που θα χρησιμοποιηθεί για αυτήν τη γεωμετρία είναι ένα είδος φερρίτη. Το κόστος του φερρίτη είναι χαμηλότερο συγκριτικά με το κόστος μονίμων μαγνητών σπάνιων γαιών που θα χρησιμοποιηθούν στις προηγούμενες προτεινόμενες γεωμετρίες. Επιπλέον, ο φερρίτης έχει σχεδόν την ίδια επιτρεπτότητα με τον αέρα με αποτέλεσμα να δημιουργεί, όπως ο αέρας, υψηλής μαγνητικής αντίστασης μονοπάτια βελτιώνοντας τη μαγνητική ανισοτροπία του δρομέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Οριστική Σχεδίαση Χρησιμοποιώντας τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

5.1. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος του μαγνητικού κυκλώματος η οποία περιγράφεται στη βιβλιογραφία είναι μια πολύ χρήσιμη μέθοδος για τον προσεγγιστικό υπολογισμό μαγνητικών πεδίων σε μηχανές απλής γεωμετρίας. Για πιο ακριβείς υπολογισμούς είναι απαραίτητο κάποιο λογισμικό με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Ο κύριος περιορισμός της μεθόδου του μαγνητικού κυκλώματος είναι ότι απαιτείται η υπόθεση των συνδέσεων της μαγνητικής ροής. Τα μήκη και οι διατομές αυτών των συνδέσεων πρέπει να είναι γνωστά. Συνήθως, υποτίθεται ότι οι συνδέσεις αποτελούνται από ευθείες γραμμές. Για να υπολογιστούν τα φαινόμενα της περίθλασης, του κορεσμού και της διαρροής της μαγνητικής ροής χρησιμοποιούνται συνήθως εμπειρικοί συντελεστές διόρθωσης. Αν ο κινητήρας έχει για πολλά χρόνια τον ίδιο τύπο σχεδίασης, τότε αυτοί οι εμπειρικοί συντελεστές είναι αρκετά γνωστοί. Σήμερα, οι σχεδιαστές ασχολούνται με νέες ιδέες σχεδίασης για τις οποίες οι διασυνδέσεις και οι συντελεστές διόρθωσης είναι άγνωστοι. Ακόμα και όταν η σχεδίαση είναι μια νέα εκδοχή μιας παλαιότερης και καλά μελετημένης σχεδίασης, υπάρχει η ανάγκη για καλή κατανόηση των επιδράσεων των γεωμετρικών αλλαγών και του κορεσμού στην απόδοση του κινητήρα και των άλλων παραμέτρων που σχετίζονται με τα μαγνητικά πεδία.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων διατίθεται μέσω διαφόρων λογισμικών όπως είναι το FEMM ή το Maxwell. Το λογισμικό δεν απαιτεί να γνωρίζει τα μονοπάτια ροής ή τους εμπειρικούς συντελεστές. Έχει την ικανότητα να υπολογίζει ακριβώς τα μαγνητικά πεδία και τις σχεδιαστικές παραμέτρους για κινητήρες πολύπλοκης γεωμετρίας, με κορεσμό και/ή μόνιμους μαγνήτες, με σημαντική αντίδραση τυμπάνου και με ή χωρίς δινορρέυματα.

5.1.1. Ενεργειακή συνάρτηση

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στη μετατροπή ενέργειας. Ο κανόνας της μετατροπής ενέργειας στους ηλεκτρικούς κινητήρες προέρχεται από τις εξισώσεις Maxwell και μπορεί να εκφραστεί ως:

$$-\int_V \bar{E} \cdot \bar{J} dV = \int_V \bar{H} \cdot \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} dV \quad (5.1)$$

όπου \bar{B} είναι η μαγνητική επαγωγή, \bar{H} είναι η ένταση μαγνητικού πεδίου, \bar{J} είναι η χωρική πυκνότητα ρεύματος, \bar{E} είναι η ένταση ηλεκτρικού πεδίου και V είναι ο όγκος που εσωκλείει η υπο εξέταση μηχανή.

Ο αριστερός όρος της εξίσωσης (5.1) είναι η καθαρή ηλεκτρική ισχύς εισόδου P_E . Ο δεξιός όρος μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$-\int_V \bar{E} \cdot \bar{J} dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \left(\int_0^B \bar{H} \cdot d\bar{B} \right) dV \quad (5.2)$$

Ο όρος στη δεξιά πλευρά είναι ο ρυθμός αύξησης της αποθηκευμένης μαγνητικής ενέργειας:

$$W_m = \int_V \left(\int_0^B \bar{H} \cdot d\bar{B} \right) dV \quad (5.3)$$

Η ισχύς εισόδου P_E μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού \bar{A} πέρα από την ένταση ηλεκτρικού πεδίου \bar{E} χρησιμοποιώντας τον ορισμό του \bar{A} :

$$\bar{B} = \nabla \times \bar{A} \quad (5.4)$$

στον νόμο Faraday:

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (5.5)$$

Έτσι, έχουμε:

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \bar{A}) \quad (5.6)$$

Αγνοώντας το ηλεκτροστατικό δυναμικό, το οποίο ισχύει αν δεν υπάρχουν απώλειες ισχύος, τότε:

$$\bar{E} = -\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \quad (5.7)$$

Αντικαθιστώντας την έκφραση για την ένταση ηλεκτρικού πεδίου \bar{E} από την εξίσωση (5.7) στην εξίσωση (5.2) προκύπτει:

$$P_E = \int_V \bar{J} \cdot \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} dV = \frac{\partial}{\partial t} \int_V \left(\int_0^A \bar{J} \cdot d\bar{A} \right) dV \quad (5.8)$$

Το ολοκλήρωμα είναι η καθαρή ηλεκτρική ενέργεια εισόδου:

$$W_E = \int_v \left(\int_0^A \bar{J} \cdot d\bar{A} \right) dV \quad (5.9)$$

Τότε οι εξισώσεις (5.7), (5.4) και (5.5) δίνουν:

$$\int_v \left(\int_0^B \bar{H} \cdot d\bar{B} \right) dV = \int_v \left(\int_0^A \bar{J} \cdot d\bar{A} \right) dV \quad (5.10)$$

Αυτό δηλώνει ότι η αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια ισούται με την ηλεκτρική ενέργεια εισόδου για μηχανή χωρίς απώλειες. Διάφορες τεχνικές, όπως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, λύνουν το πεδιακό πρόβλημα ελαχιστοποιώντας την ενεργειακή συνάρτηση F , η οποία είναι η διαφορά ανάμεσα στην αποθηκευμένη ενέργεια και στην ενέργεια εισόδου στο χώρο του συστήματος. Έτσι, για μαγνητικά συστήματα, οι εξισώσεις (5.3), (5.9) και (5.10) δίνουν:

$$F = \int_v \left(\int_0^B \bar{H} \cdot d\bar{B} - \int_0^A \bar{J} \cdot d\bar{A} \right) dV \quad (5.11)$$

Η F ελαχιστοποιείται όταν:

$$\frac{\partial F}{\partial A} = 0 \quad (5.12)$$

Έτσι, έχουμε:

$$\int_v \left(\frac{\partial}{\partial A} \int_0^B \bar{H} \cdot d\bar{B} - \bar{J} \right) dV = 0 \quad (5.13)$$

Η συνάρτηση F διαφέρει από την εξίσωση (5.13) αν υπάρχουν απώλειες λόγω επαγόμενων ρευμάτων. Σε γραμμικά προβλήματα επαγωγής η συνάρτηση F γίνεται:

$$F = \int_v \left(\frac{B^2}{2\mu} - \bar{J} \cdot \bar{A} + j\omega \frac{1}{2} \sigma \bar{A}^2 \right) dV \quad (5.14)$$

όπου \bar{J} είναι η εφαρμοζόμενη χωρική πυκνότητα ρεύματος με γωνιακή συχνότητα ω , μ είναι η διαπερατότητα και σ είναι η αγωγιμότητα.

5.1.2. Η διατύπωση των πεπερασμένων στοιχείων

Η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης μαγνητικής ενέργειας πάνω σε ένα σύνολο πεπερασμένων στοιχείων οδηγεί σε μια εξίσωση με τη μορφή πίνακα η οποία μπορεί να λυθεί για το διανυσματικό δυναμικό σε όλη την έκταση του πλέγματος. Η δημιουργία αυτής της εξίσωσης αφορά περιπτώσεις επίπεδων προβλημάτων επαγωγής.

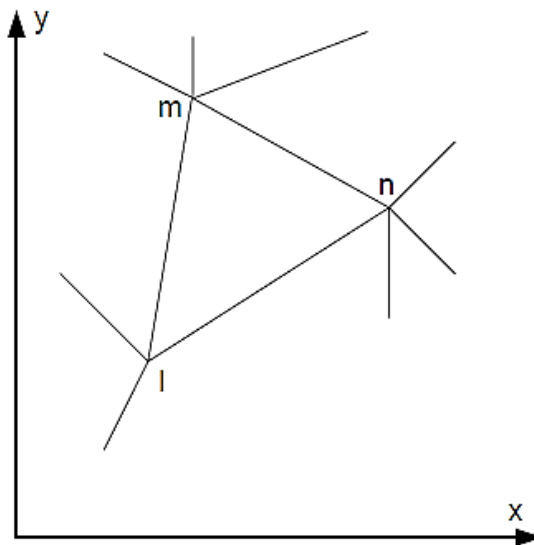
Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται το σύστημα συντεταγμένων για επίπεδα προβλήματα μαζί με ένα τμήμα ενός τυπικού πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων. Ολόκληρο το επίπεδο πλέγμα θα μπορούσε, για παράδειγμα, να αναπαριστά το στάτη, το δρομέα και το

διάκενο ενός κινητήρα. Στο Σχήμα 5.2 φαίνεται ένα παράδειγμα για το πως δημιουργείται το πλέγμα στο λογισμικό FEMM ώστε να σχηματιστεί το πρόβλημα. Η αναλυόμενη μηχανή διαιρείται σε τρίγωνα τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Καθένα από αυτά τα στοιχεία έχουν τρεις κορυφές οι οποίες ονομάζονται σημεία του πλέγματος. Δεδομένης της γεωμετρίας του κινητήρα, αυτό το πλέγμα μπορεί να δημιουργηθεί αυτόματα από το λογισμικό για την πιο ακριβή λύση.

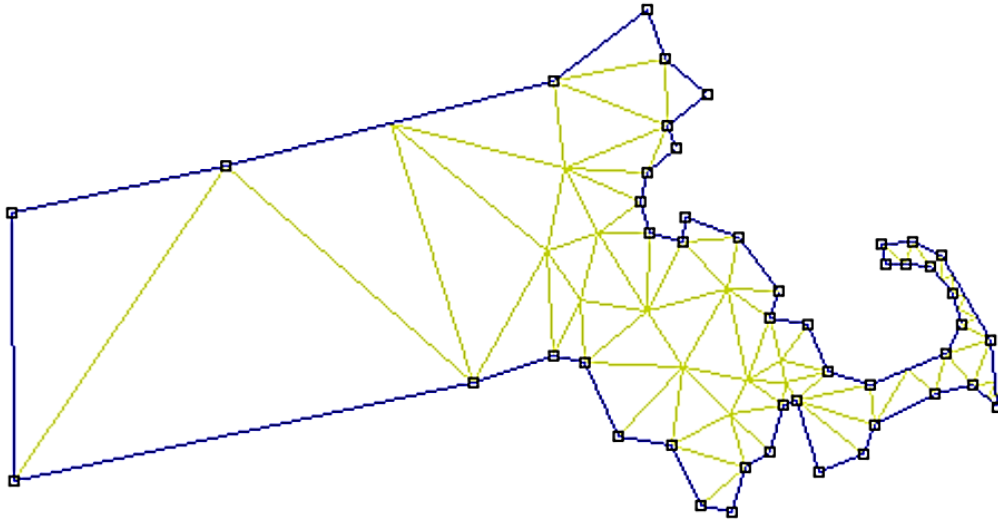
Σε τέτοια δισδιάστατα προβλήματα, το \bar{J} και το \bar{A} υποτίθεται ότι είναι κάθετα στο επίπεδο της σελίδας (προς τα έξω ή προς τα μέσα). Σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο το \bar{A} υποτίθεται διαφέρει γραμμικά σύμφωνα με τη σχέση:

$$A = \sum_{k=l,m,n} \frac{A_k}{2\Delta} (d_k + e_k X + f_k Y) \quad (5.15)$$

όπου Δ είναι το εμβαδόν του τριγώνου.



Σχήμα 5.1. Ένα τριγωνικό πεπερασμένο στοιχείο συνδεδεμένο με άλλα πεπερασμένα στοιχεία.



Σχήμα 5.2. Πλεγματοποίηση της Μασαχουσέτης στο FEMM. [40]

Εφαρμόζοντας την εξίσωση (5.15) στις τρεις κορυφές προκύπτει η λύση για τους συντελεστές d , e και f :

$$\begin{bmatrix} d_l & d_m & d_n \\ e_l & e_m & e_n \\ f_l & f_m & f_n \end{bmatrix} = 2\Delta \begin{bmatrix} 1 & x_l & y_l \\ 1 & x_m & y_m \\ 1 & x_n & y_n \end{bmatrix}^{-1} \quad (5.16)$$

Το μαγνητικό πεδίο στο τρίγωνο είναι:

$$\bar{B} = \bar{\nabla} \times \bar{A} = \bar{\nabla} \times A\bar{u}_z \quad (5.17)$$

$$\bar{B}(x, y) = -\frac{\partial A}{\partial y}\bar{u}_x + \frac{\partial A}{\partial x}\bar{u}_y \quad (5.18)$$

όπου \bar{u}_x , \bar{u}_y και \bar{u}_z είναι μοναδιαία διανύσματα. Αντικαθιστώντας την εξίσωση (5.15) στην εξίσωση (5.18) προκύπτει:

$$\bar{B}(x, y) = \frac{1}{2\Delta} \sum_{k=l,m,n} (-f_k A_k \bar{u}_x + e_k A_j \bar{u}_y) \quad (5.19)$$

Έτσι, το μαγνητικό πεδίο είναι σταθερό στο εσωτερικό ενός πεπερασμένου στοιχείου. Το διανυσματικό δυναμικό A_k στα σημεία του πλέγματος μπορεί να βρεθεί ελαχιστοποιώντας τη συνάρτηση (5.14), η οποία για επίπεδα προβλήματα γίνεται:

$$F = \int_S \left(\frac{B^2}{2\mu} - JA + j\omega \frac{1}{2} \sigma A^2 \right) dS \quad (5.20)$$

όπου $dS = dx \cdot dy$. Αντικαθιστώντας την εξίσωση (5.20) στην (5.12) και θεωρώντας ένα πεπερασμένο στοιχείο προκύπτει:

$$\int_S \frac{\partial}{\partial A_j} \left(\frac{B^2}{2\mu} - JA + \omega \sigma A^2 \right) dS = 0, \quad j = l, m, n \quad (5.21)$$

Η ολοκλήρωση στο τρίγωνο δίνει την εξίσωση μορφής 3×3 πίνακα:

$$[R][A] + j[M][A] = [C] \quad (5.22)$$

όπου:

$$[R] = \frac{v}{4\Delta} \begin{bmatrix} (e_l e_l + f_l f_l) & (e_l e_m + f_l f_m) & (e_l e_n + f_l f_n) \\ (e_m e_l + f_m f_l) & (e_m e_m + f_m f_m) & (e_m e_n + f_m f_n) \\ (e_n e_l + f_n f_l) & (e_n e_m + f_n f_m) & (e_n e_n + f_n f_n) \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

$$[M] = \frac{\omega\sigma}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

$$[C] = \frac{J\Delta}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

Η εξίσωση (5.22) μέσω της εξίσωσης (5.25) λύνεται για το διανυσματικό δυναμικό A σε μια περιοχή που περιέχεται το τρίγωνο με κορυφές l , m και n . Για πρακτικά προβλήματα με N σημεία η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε πεπερασμένο στοιχείο και με τον τρόπο αυτό προκύπτουν οι πίνακες $[R]$ και $[M]$ με N σειρές και N στήλες. Οι $[C]$ και $[A]$ είναι τότε διανύσματα-στήλες που περιέχουν μιγαδικούς όρους.

5.1.3. Οριακές συνθήκες

Μια εξίσωση πεπερασμένου στοιχείου στη μορφή $N \times N$ πίνακα όπως η εξίσωση (5.22) μπορεί να λυθεί για το διανυσματικό δυναμικό A των σημείων του πλέγματος χρησιμοποιώντας τεχνικές πινάκων. Γενικά, όλα τα εσωτερικά σημεία του πλέγματος είναι χωρίς περιορισμούς, ενώ τα εξωτερικά σημεία του πλέγματος περιορίζονται αφού εξαρτώνται από οριακές συνθήκες με την εξωτερική περιοχή της αναλυόμενης περιοχής.

Σε προβλήματα δύο διαστάσεων μια γραμμή μαγνητικής ροής είναι μια γραμμή με σταθερό μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό A . Για τις περισσότερες ηλεκτρικές μηχανές με εξωτερική επιφάνεια από χάλυβα, η ροή υποτίθεται ότι περιορίζεται στο εξωτερικό χαλύβδινο όριο. Χρησιμοποιώντας την οριακή συνθήκη, $A = 0$, οι γραμμές ροής περιορίζονται.

Η απουσία κάθε είδους περιορισμού σε ένα εξωτερικό σημείο του πλέγματος θα προκαλούσε τις γραμμές ροής να είναι κάθετες στην οριακή συνθήκη του πλέγματος. Σε κάθε ηλεκτρική μηχανή η οποία έχει πανομοιότυπους πόλους, κάθε πολικό όριο έχει μια περιοδική οριακή συνθήκη. Για στρεφόμενες επίπεδες μηχανές, οι περιοδικές οριακές συνθήκες εκφράζονται σε πολικές συντεταγμένες (r, θ) ως εξής:

$$A(r, \theta_0 + \theta_p) = -A(r, \theta_0) \quad (5.26)$$

όπου θ_0 είναι η γωνία ενός ακτινικού ορίου και θ_p είναι η γωνία πολικού βήματος.

5.1.4. Τεχνικές επίλυσης

Αφού σχηματιστεί η εξίσωση σε μορφή πίνακα και τεθεί ο περιορισμός για το A , η επίλυση του A για τα σημεία του πλέγματος χωρίς περιορισμούς μπορεί να προχωρήσει. Αν η διαπερατότητα μ είναι γνωστή για όλη την έκταση της περιοχής, τότε η εξίσωση (5.25) μπορεί να επιλυθεί απευθείας από την Gauss-Jordan απαλειφή. Συνήθως, ο υπολογιστικός χρόνος είναι ανάλογος του αριθμού των άγνωστων δυναμικών των σημείων του πλέγματος υψωμένα σε δύναμη του 2 ή 3. Για τα περισσότερα μοντέλα ηλεκτρικών μηχανών με ένα πολικό βήμα, ο χρόνος κυμαίνεται από μερικά λεπτά έως λίγες ώρες για έναν υπολογιστή μέτριου μεγέθους.

Αν η διαπερατότητα μ δεν είναι σταθερή, τότε ο πίνακας $[R]$ εξαρτάται από το μέγεθος του B (και του J). Η επαναληπτική διαδικασία αναπτύχθηκε επεκτείνοντας την εξίσωση (5.12) σε πολυδιάστατη σειρά Taylor:

$$\left. \frac{\partial F}{\partial A_i} \right|_{A+\delta A} = \left. \frac{\partial F}{\partial A_i} \right|_A - \sum_j \left. \frac{\partial^2 F}{\partial A_i \partial A_j} \right|_{A+\delta A} \delta A_j + \dots \quad (5.27)$$

όπου i και j είναι ακέραιοι αριθμοί από το 1 έως το N . Αντικαθιστώντας την εξίσωση (5.27) στην εξίσωση (5.12) προκύπτει η εξίσωση:

$$A_j = - \left[\left. \frac{\partial^2 F}{\partial A_i \partial A_j} \right|_{A+\delta A} \right]^{-1} \left. \frac{\partial F}{\partial A_i} \right|_{A+\delta A} \quad (5.28)$$

Ο Ιακωβιανός πίνακας της εξίσωσης (5.28) πρώτα εκτιμάται με μια αρχική λύση χρησιμοποιώντας προσεγγιστικές διαπερατότητες υλικών. Έπειτα, επιλύεται κατ' επανάληψη έως ότου το A_j προκύψει αμελητέα μικρό. Σε κάθε λύση της εξίσωσης (5.28), ο Ιακωβιανός πίνακας και το διάνυσμα υπολοίπων στο δεξιό μέρος επανυπολογίζονται εφαρμόζοντας τις τελευταίες τιμές του δυναμικού A , πετυχαίνοντας γρηγορότερη σύγκλιση στη σωστή τιμή του δυναμικού A .

Η τεχνική απαιτεί γνώση του συντελεστή μαγνητικής διαπερατότητας $\nu (= 1/\mu)$ και του $\partial \nu / \partial B^2$ σε κάθε μη-γραμμικό υλικό. Στο λογισμικό FEMM αυτοί οι παράμετροι υπολογίζονται αυτόματα από τις καμπύλες B-H οι οποίες δίνονται ως δεδομένα εισόδου.

5.1.5. Παράμετροι από το πεδίο

Αν και η κατανομή του μαγνητικού διανυσματικού δυναμικού A έχει ελάχιστη σημασία για τους μηχανικούς σχεδίασης, πολλές παράμετροι υπολογίζονται από αυτήν. Για παράδειγμα, η μετεπεξεργασία του FEMM μπορεί να υπολογίζει παραμέτρους σημαντικού ενδιαφέροντος για τους σχεδιαστές.

Η πυκνότητα μαγνητικού πεδίου B υπολογίζεται για κάθε πεπερασμένο στοιχείο χρησιμοποιώντας την εξίσωση (5.3). Επίσης, τα διαγράμματα ροής προκύπτουν χρησιμοποιώντας την προεπεξεργασία και τη μετεπεξεργασία του FEMM. Τα διαγράμματα ροής και οι πυκνότητες μαγνητικής ροής δείχνουν στον σχεδιαστή που θα πρέπει να προστεθεί ή να αφαιρεθεί χάλυβας.

Ο ορισμός της μαγνητικής ροής Φ είναι:

$$\Phi = \iint_S \bar{B} \cdot d\bar{S} \quad (5.29)$$

Αντικαθιστώντας τον ορισμό του A από την εξίσωση (5.28) προκύπτει:

$$\Phi = \iint_S \bar{\nabla} \times \bar{A} \cdot d\bar{S} \quad (5.30)$$

Η επιφάνεια ολοκλήρωσης μπορεί να αντικατασταθεί με μια κλειστή γραμμή ολοκλήρωσης. Έτσι, έχουμε:

$$\Phi = \oint_{\partial S} \bar{A} \cdot d\bar{l} \quad (5.31)$$

Για προβλήματα δύο διαστάσεων η μαγνητική ροή ανάμεσα σε δύο οποιαδήποτε σημεία του πλέγματος είναι:

$$\Phi_{12} = (A_1 - A_2) \cdot d \quad (5.32)$$

όπου το d είναι το βάθος.

Ακόμη, η επαγωγή του κάθε πηνίου το οποίο διαρρέεται με ρεύμα προκύπτει από την κατανομή του A . Η επαγωγή L υπολογίζεται από μαγνητοστατικά προβλήματα χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$\frac{L}{d} = \frac{J}{3I^2} \sum_{n=1}^{N_j} (S_n \sum_{k=1}^3 A_k) \quad (5.33)$$

όπου d είναι το βάθος του επιπέδου της μηχανής, I είναι το ρεύμα του πηνίου, N_j είναι το πλήθος των στοιχείων και S_n είναι το εμβαδόν των πεπερασμένων στοιχείων.

Η υπολογιζόμενη εμπέδηση για προβλήματα με επαγόμενα ρεύματα περιέχουν αντιστατικούς και επαγωγικούς όρους. Για παράδειγμα, σε προβλήματα με αξονική συμμετρία η εμπέδηση του πηνίου δίνεται:

$$\bar{Z} = \frac{j\omega \bar{A}_{ave} N}{I_s} 2\pi r_0 \quad (5.34)$$

όπου r_0 είναι η μέση ακτίνα (απόσταση από τον άξονα συμμετρίας) του ρεύματος, \bar{A}_{ave} είναι το μέσο μιγαδικό διανυσματικό δυναμικό στην περιοχή του ρεύματος και N είναι το πλήθος των σπειρών. Ισχύει: $I_s = J_s \cdot (\text{εμβαδόν μιας σπείρας})$

Η μαγνητική ενέργεια W_m της εξίσωσης (5.2) υπολογίζεται για κάθε πεπερασμένο στοιχείο καθώς και για ολόκληρο τον όγκο του πλέγματος. Μια άλλη χρήσιμη

ενέργεια που υπολογίζεται είναι η μαγνητική συνενέργεια η οποία είναι χρήσιμη στον υπολογισμό της δύναμης και της ροπής.

5.2. Παραμετροποίηση στάτη

5.2.1. Πλήθος αυλάκων στάτη

Η πιο βασική παράμετρος στη σχεδίαση του στάτη αποτελεί το πλήθος των αυλάκων. Η επιλογή του πλήθους των αυλάκων του στάτη συνδέεται αμοιβαία με την επιλογή του είδους του τύλιγματος που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή της μηχανής. Το πως διατάσσεται το τύλιγμα καθορίζεται από τον αριθμό των αυλάκων ανά πόλο και ανά φάση. Το πλήθος των αυλάκων και ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και ανά φάση συνδέονται μέσω της σχέσης:

$$Q_s = m \cdot p \cdot q \quad (5.35)$$

όπου Q_s είναι το πλήθος των αυλάκων,

m είναι ο αριθμός των φάσεων,

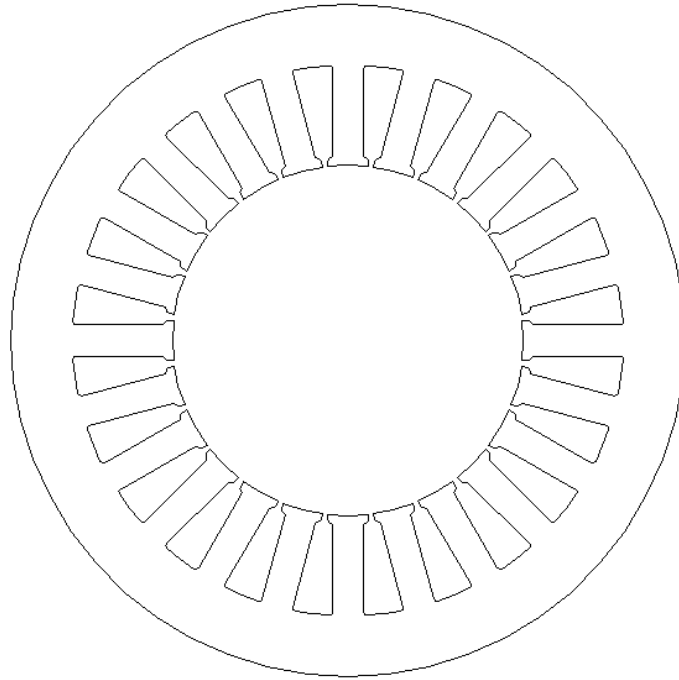
p είναι ο αριθμός των πόλων και

q είναι ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και ανά φάση.

- Εάν ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και ανά φάση είναι ακέραιος αριθμός, τότε το τύλιγμα ονομάζεται ακέραιο.
- Εάν ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και ανά φάση είναι κλασματικός αριθμός και μεγαλύτερος του 1, τότε το τύλιγμα ονομάζεται κλασματικό.
- Εάν ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και ανά φάση είναι κλασματικός αριθμός και μικρότερος του 1, τότε το τύλιγμα ονομάζεται συγκεντρωμένο.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, το τύλιγμα που θα χρησιμοποιηθεί είναι ακέραιο, απλής στρώσης και διανεμημένο ($q = 2$). Ο λόγος που χρησιμοποιείται αυτό το τύλιγμα είναι διότι η αντι-ΗΕΔ γίνεται περισσότερο ημιτονοειδής, οι αρμονικές τρίτης και υψηλότερης τάξης μειώνονται και η κατασκευαστική διαδικασία παραμένει σχετικά εύκολη. Συνεπώς, το πλήθος των αυλάκων είναι:

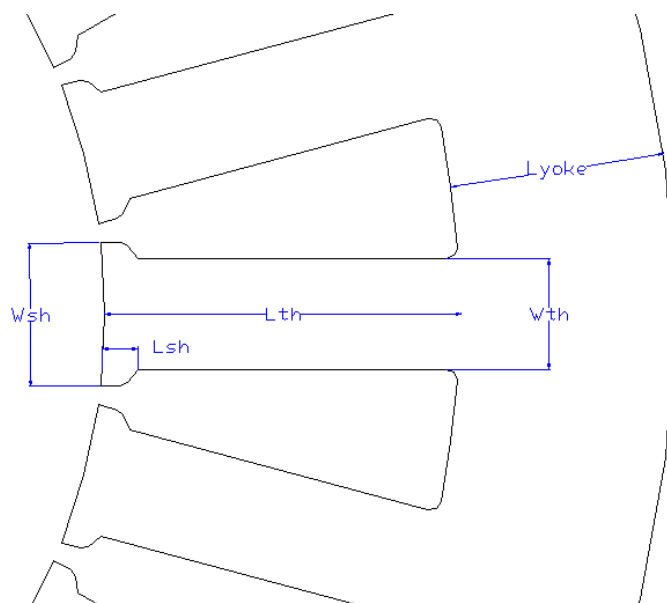
$$Q_s = m \cdot p \cdot q = 3 \cdot 4 \cdot 2 = 24 \text{ αυλάκια}$$



Σχήμα 5.3. Γεωμετρία στάτη με 24 αύλακες.

5.2.2. Γεωμετρικές παράμετροι των δοντιών και του σώματος του στάτη

Η παραμετροποίηση του στάτη γίνεται για το σώμα και τα δόντια του στάτη και με βάση αυτή προκύπτουν οι διαστάσεις των αυλάκων. Θα ήταν δυνατή η παραμετροποίηση του σώματος και των αυλάκων, αλλά δεν είναι κρισιμότερη η επιλογή των διαστάσεων της αύλακος από την επιλογή των διαστάσεων του δοντιού. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι σημαντικότερες γεωμετρικές παράμετροι που προτείνονται για τη σχεδίαση του στάτη.



Σχήμα 5.4. Οι σημαντικότερες παράμετροι στη σχεδίαση του στάτη.

Οι παράμετροι L_{th} και W_{th} καθορίζουν το ύψος και το πλάτος του δοντιού, αντίστοιχα. Οι παράμετροι L_{sh} και W_{sh} καθορίζουν το ύψος και το πλάτος του πέλματος, αντίστοιχα. Η παράμετρος L_{yoke} καθορίζει το ύψος του σώματος του στάτη.

Το εμβαδόν της αύλακας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S_{slot} = \frac{\pi \cdot \left[\left(\frac{D}{2} + L_{th} \right)^2 - \left(\frac{D}{2} + L_{sh} \right)^2 \right]}{Q} - W_{th} \cdot (L_{th} - L_{sh}) \quad (5.36)$$

όπου D είναι η διάμετρος διακένου.

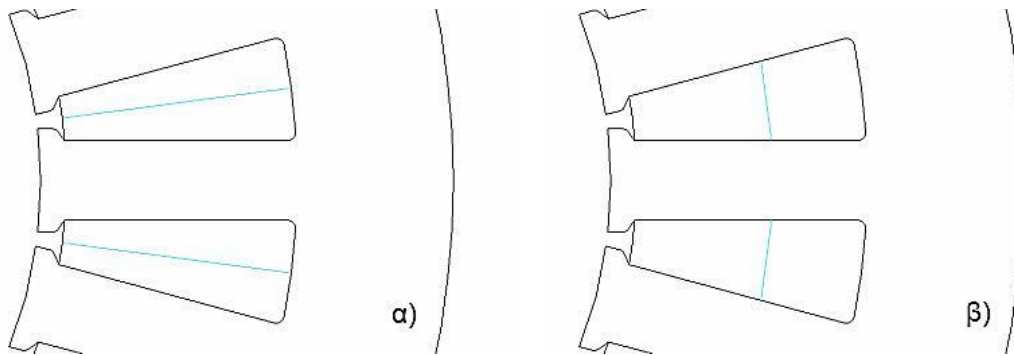
Με βάση τα μεγέθη τα οποία προέκυψαν στην προκαταρκτική σχεδίαση και επιλέγοντας καταλλήλως τις τιμές για το ύψος του πέλματος και το πλάτος του δοντιού (προτείνεται να είναι περίπου ίσο με $0,7 \cdot \frac{\pi \cdot D}{Q}$), η εξίσωση (5.36) επιλύεται ως προς L_{th} και υπολογίζεται το ύψος του δοντιού.

Τα αυλάκια μπορεί να είναι:

- Ανοικτά
- Ημίκλειστα

Όταν χρησιμοποιούνται τα ανοικτά αυλάκια, τα πηνία του τυλίγματος μπορούν να σχηματιστούν και να μονωθούν πλήρως πριν εγκατασταθούν στα αυλάκια. Επίσης, είναι ευκολότερη η αντικατάσταση μεμονωμένων πηνίων. Αντιθέτως, όταν χρησιμοποιούνται ημίκλειστα αυλάκια, τα πηνία θα πρέπει να μονωθούν αφότου τοποθετηθούν στα αυλάκια. Τα πλεονεκτήματα των ημίκλειστων αυλακίων είναι ο ελαττωμένος παράγοντας συστολής διακένου, ο οποίος δίνει μικρότερη τιμή ρεύματος μαγνήτισης, χαμηλές απώλειες λόγω ταλάντωσης των δοντιών και πολύ πιο ήσυχη λειτουργία της μηχανής. Για την εφαρμογή αυτή τα αυλάκια του στάτη θα σχεδιαστούν ημίκλειστα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στα τυλίγματα διπλής στρώσης ο διαχωρισμός της αύλακας στην παραμετροποιημένη σχεδίαση διαφέρει από τον διαχωρισμό στην πράξη. Στο Σχήμα 5.5 φαίνονται αριστερά ο τρόπος που διαχωρίζεται η αύλακα στην παραμετροποιημένη σχεδίαση και δεξιά όπως θα διαχωρίζονταν αν κατασκευάζονταν. Οι δυο τρόποι είναι «μαγνητικά ισοδύναμοι» και στην παραμετροποιημένη σχεδίαση προτιμάται ο πρώτος για λόγους ευκολίας και ακρίβειας.



Σχήμα 5.5. α) Διαχωρισμός αύλακας παραμετροποιημένης σχεδίασης. β) Διαχωρισμός αύλακας όπως πρακτικά θα γινόταν.

5.3. Παραμετροποίηση δρομέα

5.3.1. Πλήθος φραγμάτων μαγνητικής ροής

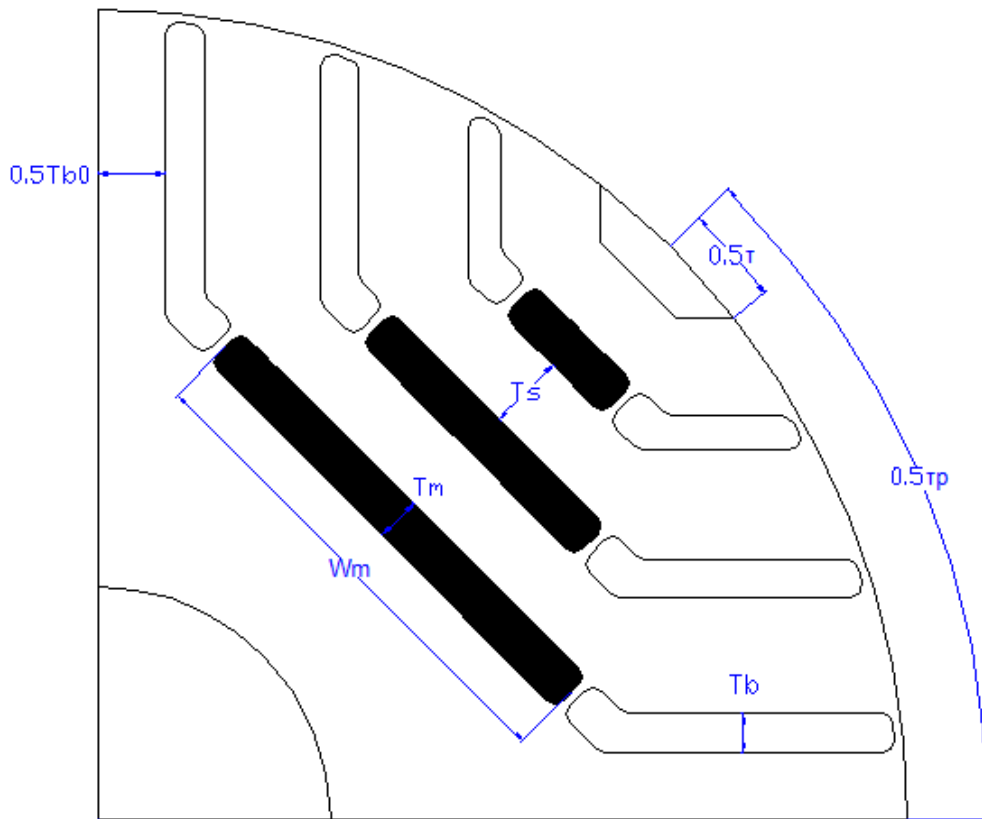
Μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους στη σχεδίαση του δρομέα είναι η επιλογή τους πλήθους των φραγμάτων μαγνητικής ροής. Είναι γνωστό ότι πολλαπλά φράγματα μαγνητικής ροής μπορούν να αυξήσουν τη μέση ροπή. Για πλήθος φραγμάτων μεγαλύτερο από τέσσερα ή πέντε, η αύξηση της μέση ροπής περιορίζεται σημαντικά. Ακόμη, η κυμάτωση ροπής επηρεάζεται από το πλήθος των φραγμάτων μαγνητικής ροής. Η αλληλεπίδραση των αρμονικών του στάτη και του δρομέα είναι η αιτία της κυμάτωσης της ροπής. Για να μειωθεί η κυμάτωση ροπής προτείνεται το πλήθος των φραγμάτων ανά πόλο να ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$n_b = \frac{Q}{p} \pm 2 \quad (5.37)$$

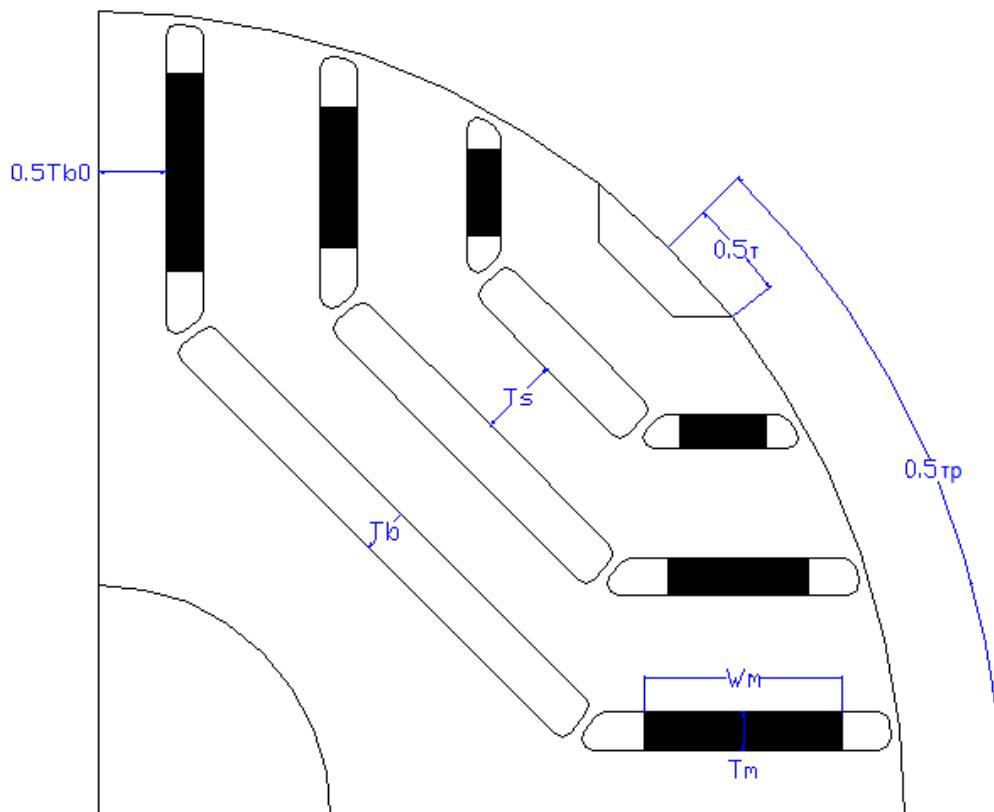
όπου Q είναι το συνολικό πλήθος αυλάκων στάτη και p είναι ο αριθμός των πόλων της μηχανής.

5.3.2. Γεωμετρικές παράμετροι των φραγμάτων μαγνητικής ροής και των μονίμων μαγνητών

Η θέση και το μέγεθος των φραγμάτων μαγνητικής ροής παίζουν επίσης πολύ σημαντικό ρόλο. Γι' αυτόν το λόγο είναι χρήσιμο να εισάγουμε μερικές γεωμετρικές παραμέτρους. Στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5.6, Σχήμα 5.7, Σχήμα 5.8 και Σχήμα 5.9) παρουσιάζονται οι σημαντικότερες γεωμετρικές παράμετροι που προτείνονται.



Σχήμα 5.6. Οι σημαντικότερες παράμετροι στη σχεδίαση του δρομέα Α.



Σχήμα 5.7. Οι σημαντικότερες παράμετροι στη σχεδίαση του δρομέα Β.

Στα σχήματα φαίνονται οι προτεινόμενοι δρομείς (ένας πόλος) της σύγχρονης μηχανής μαγνητικής αντίστασης. Η παράμετρος τ αφορά τη θέση του πρώτου φράγματος μαγνητικής ροής (δηλαδή του κοντινότερου στο διάκενο) και καθορίζει κατ'επέκταση τις θέσεις των υπολοίπων φραγμάτων. Ελέγχεται μέσω ενός συντελεστή k_{fb} ο οποίος ορίζεται ως:

$$k_{fb} = \frac{\tau}{\tau_p} \quad (5.38)$$

όπου τ_p είναι το τόξο πολικού βήματος.

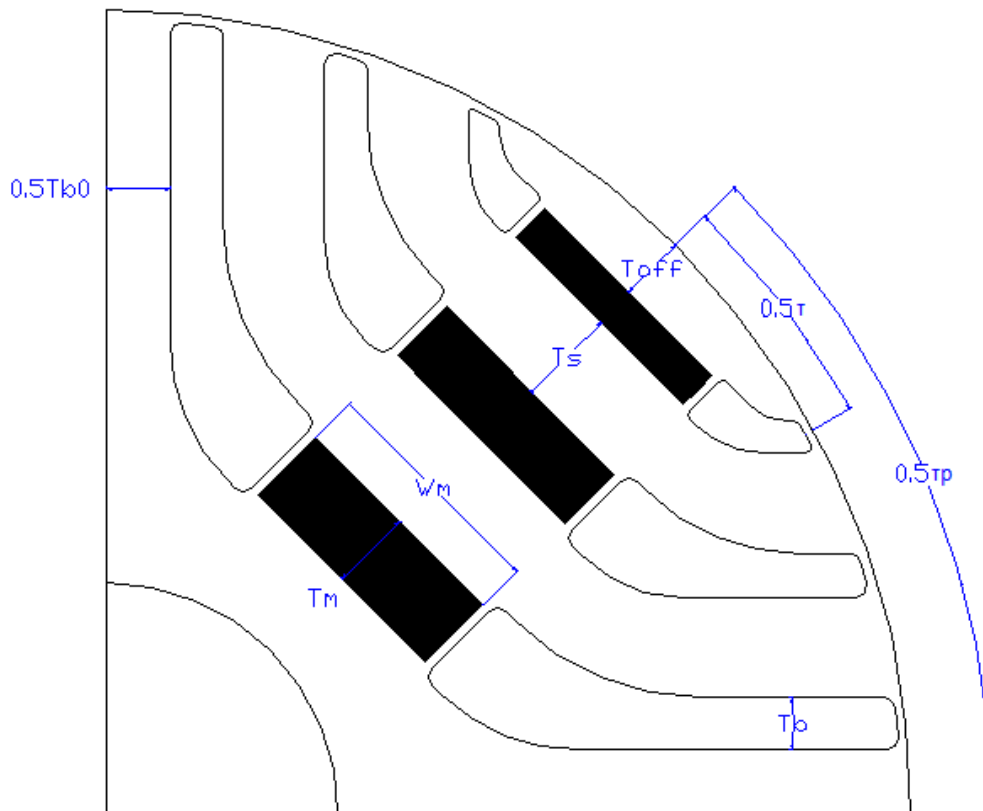
Το μέγεθος των φραγμάτων μαγνητικής ροής και η μεταξύ τους απόσταση κατά μήκος του q-άξονα καθορίζεται από τις παραμέτρους T_m , W_m και T_s για το κάθε φράγμα ξεχωριστά. Η παράμετρος T_m καθορίζει το πάχος του φράγματος, η παράμετρος W_m καθορίζει το πλάτος του φράγματος και η παράμετρος T_s καθορίζει την απόσταση μεταξύ γειτονικών φραγμάτων. Αξίζει να αναφερθεί ότι για λόγους σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών γεωμετριών, διαφορετικών σχεδιάσεων και για ευκολότερη προσαρμογή σε αλλαγές βασικών παραμέτρων, χρήσιμη ήταν η εισαγωγή μιας παραμέτρου σχεδίασης η οποία ονομάζεται λόγος μόνωσης και ορίζεται ως:

$$k_w = \frac{W_{ins}}{W_{iron}} \quad (5.39)$$

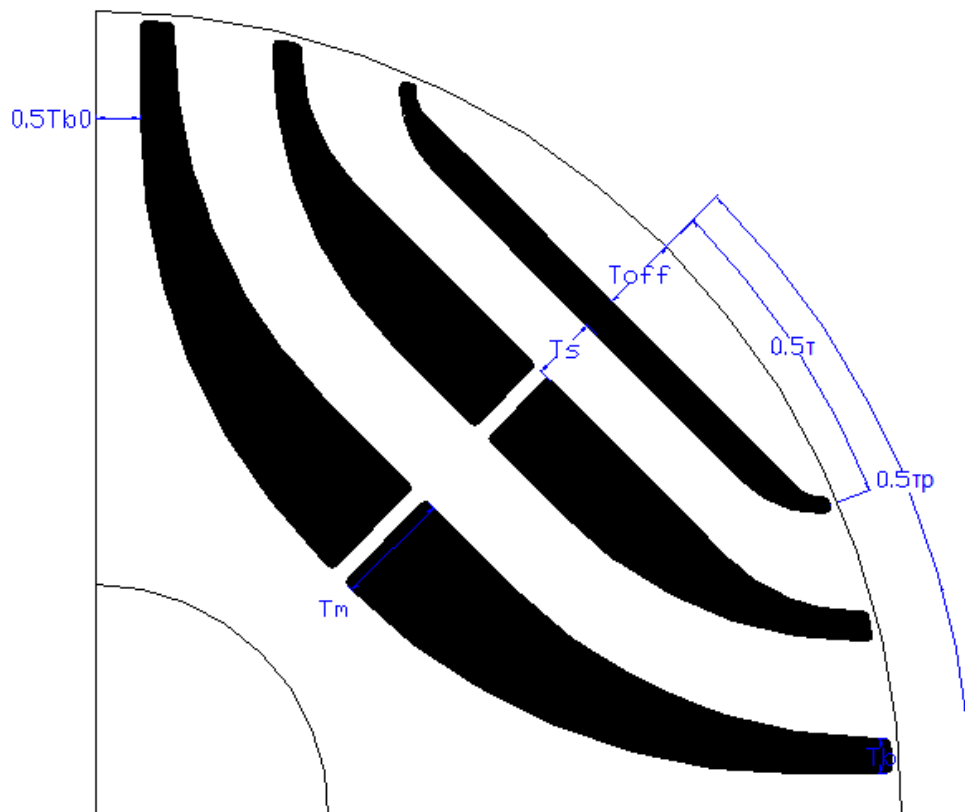
όπου W_{ins} είναι το συνολικό πάχος όλων των φραγμάτων μαγνητικής ροής και W_{iron} είναι το συνολικό πάχος των τμημάτων σιδήρου μεταξύ φραγμάτων μαγνητικής ροής.

Το πάχος των φραγμάτων μαγνητικής ροής κατά πλάτος του d-άξονα καθορίζεται από την παράμετρο T_b για το κάθε φράγμα ξεχωριστά.

Η παράμετρος T_{b0} καθορίζει την απόσταση του τελευταίου φράγματος μαγνητικής ροής ενός πόλου από το τελευταίο φράγμα μαγνητικής ροής ενός γειτονικού πόλου.

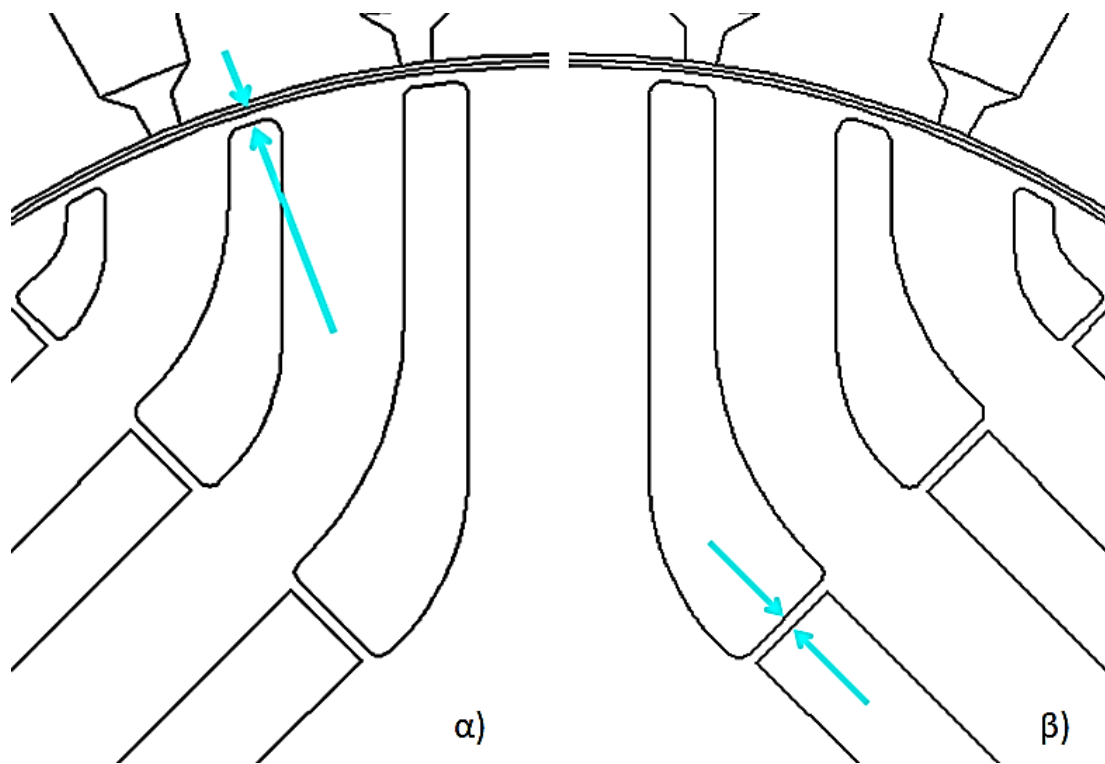


Σχήμα 5.8. Οι σημαντικότερες παράμετροι στη σχεδίαση του δρομέα Γ.



Σχήμα 5.9. Οι σημαντικότερες παράμετροι στη σχεδίαση του δρομέα Δ.

Επίσης, αξίζει να αναφερθεί πως από τη σκοπιά των μηχανικών δυνάμεων, στο δρομέα εγκάρσιων επιστρώσεων, τα πιο ευαίσθητα σημεία βρίσκονται στις ακτινικές και στις εφαπτόμενες ραβδώσεις (Σχήμα 5.10). Προκειμένου να υπάρχει μεγαλύτερη ακαμψία στη δομή του δρομέα, είναι επιθυμητό να υπάρχουν σχετικά μεγάλα μονοπάτια μαγνητικής ροής και γι' αυτόν το λόγο το πλήθος και το μέγεθος των φραγμάτων μαγνητικής ροής είναι μηχανικά περιορισμένα. Γενικά, ισχύει ότι με την αύξηση του πάχους των ραβδώσεων προκαλείται μείωση στη μέση ροπή. Συγκεκριμένα, με την αύξηση του πάχους των ακτινικών ραβδώσεων στον q -άξονα, η επαγωγή του q -άξονα αυξάνεται με αποτέλεσμα να μειώνεται η μέση ροπή εξόδου της μηχανής. Ταυτόχρονα, όμως, η αύξηση της επαγωγής του q -άξονα προκαλεί μείωση του λόγου εκτυπότητας και αύξηση του κορεσμού. Σε αυτήν την περίπτωση είναι που προτείνεται η χρήση μικρών μονίμων μαγνητών ανάμεσα στις ακτινικές ραβδώσεις. Οι μαγνήτες αυτοί προκαλούν τον κορεσμό των ακτινικών και εφαπτόμενων ραβδώσεων με αποτέλεσμα τη μείωση της επαγωγής του q -άξονα. Με τον τρόπο αυτόν, τα μειονεκτήματα που προκαλούν οι ακτινικές και εφαπτόμενες ραβδώσεις μπορούν να εξαλειφθούν.



Σχήμα 5.10. α) Εφαπτόμενη ράβδωση. β) Ακτινική ράβδωση.

5.4. Απώλειες χαλκού

5.4.1. Εκτίμηση ωμικής αντίστασης τυλίγματος

Ορίζονται τα παρακάτω μεγέθη για την αναλυτική επεξήγηση των διαδικασιών:

- Αριθμός πόλων κινητήρα: p
- Αριθμός σπειρών ανά πηνίο: N
- Ενεργό μήκος κινητήρα: L
- Εμβαδόν αύλακας στάτη: S_{slot}
- Συντελεστής πληρότητας τυλίγματος: ff

Κάθε αύλακα του στάτη φέρει τύλιγμα το οποίο επιστρέφει περνώντας από κάποια γειτονική ή όχι αύλακα. Στην περίπτωση μηχανής πλήρους βήματος (μια συστάδα αγωγών του στάτη εκτείνεται σε τόξο ίσο με το πολικό βήμα) ο συντελεστής πληρότητας λαμβάνει τιμές από 0,35 έως 0,50, αναφερόμενοι πάντοτε σε συμβατικές τεχνικές περιέλιξης.

Κατ'αυτόν τον τρόπο, λοιπόν, αν η αύλακα έχει εμβαδόν S_{slot} , τότε το ενεργό μέρος που θα επιτευχθεί κατασκευαστικά να καλύπτεται πλήρως από χαλκό θα είναι:

$$S_{cu} = ff \cdot S_{slot} \quad (5.40)$$

Για συντελεστή πληρότητας $ff = 0,50$ και εμβαδόν αύλακας $S_{slot} = 400 \text{ mm}^2$, το ενεργό εμβαδόν θα είναι $S_{cu} = 200 \text{ mm}^2$. Έχοντας επιλέξει το επιθυμητό επίπεδο τάσης βάσει της προκαταρκτικής σχεδίασης, το ενεργό εμβαδόν μπορεί να διαιρεθεί με το πλήθος των σπειρών ώστε να προκύψει η διατομή του κλώνου χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί για την περιέλιξη.

$$S_{wire} = \frac{S_{cu}}{N} \quad (5.41)$$

Το μέσο μήκος μιας σπείρας είναι το μήκος το οποίο αν πολλαπλασιαστεί με το πλήθος των σπειρών, δίνει το συνολικό μήκος χαλκού ενός πηνίου του στάτη. Το μέσο μήκος μιας σπείρας ισούται με το διπλάσιο άθροισμα του ενεργού μήκους του κινητήρα και του μήκους κεφαλής τυλίγματος.

Στην περίπτωση του πλήρους βήματος το μήκος κεφαλής υπολογίζεται ως συνάρτηση των πόλων και της μέσης ακτίνας αύλακας. Έτσι, το μήκος κεφαλής δίνεται από τη σχέση:

$$l_{ends} = \frac{2\pi}{p} \cdot \overline{R_{slot}} \quad (5.42)$$

όπου $\overline{R_{slot}}$ είναι η μέση ακτίνα της αύλακας κατά την περιστροφή της κεφαλής.

Ακόμη, το κάθε πηνίο διαμορφώνεται σχηματικά ώστε να μπορεί να επιτρέψει στο επόμενο πηνίο να τοποθετηθεί ακριβώς με τον ίδιο τρόπο. Προκειμένου να ληφθεί

υπόψιν το επιπλέον μήκος της κεφαλής λόγω της χωροταξικής διαμόρφωσης, το μήκος κεφαλής του πηνίου πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή ο οποίος ονομάζεται συντελεστής πλέξης του πηνίου και είναι μεγαλύτερος της μονάδας. Ο συντελεστής πλέξης του πηνίου για πλήρες βήμα λαμβάνεται ίσος με $olf = 1,2$.

Επομένως το μέσο μήκος μιας σπείρας υπολογίζεται απο τη σχέση:

$$\bar{l}_w = 2 \cdot \left(L + olf \cdot \frac{2\pi}{p} \cdot \overline{R_{slot}} \right) \quad (5.43)$$

Το συνολικό μήκος της περιέλιξης δίνεται από τη σχέση:

$$l_{w_tot} = N \cdot \bar{l}_w \quad (5.44)$$

Η συνολική αντίσταση για κάθε πηνίο είναι:

$$R_w = \frac{\rho \cdot l_{w_tot}}{S_{wire}} \quad (5.45)$$

όπου ρ είναι η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του χαλκού σε συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Η ειδική αντίσταση του χαλκού για θερμοκρασία $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ είναι:

$$\rho_0 = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$$

Θεωρώντας ότι η θερμοκρασία της μηχανής σε ονομαστική λειτουργία είναι $\theta = 20^\circ\text{C}$ και για συντελεστή θερμοκρασίας του χαλκού $\alpha = 3,9 \cdot 10^{-3}$, η διορθωμένη ειδική αντίσταση προκύπτει:

$$\rho = \rho_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta - \theta_0)] = 2,055 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$$

Γνωρίζοντας την ωμική αντίσταση ανά φάση, οι απώλειες χαλκού υπολογίζονται από τη σχέση:

$$P_{Cu} = 3 \cdot I_n^2 \cdot R_{ph} \quad (5.46)$$

5.5. Απώλειες πυρήνα

Όταν ένα μαγνητικό υλικό βρίσκεται μέσα σε χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, εμφανίζει απώλειες υπό τη μορφή θερμότητας. Οι απώλειες αυτές ονομάζονται απώλειες πυρήνα. Οι μηχανισμοί μετατροπής της ενέργειας του πεδίου σε θερμότητα είναι δύο, οπότε προκύπτουν τα αντίστοιχα είδη απωλειών πυρήνα: Απώλειες υστέρησης και απώλειες δινορρευμάτων. Ο αναλυτικός υπολογισμός των απωλειών πυρήνα σε μηχανές μαγνητικής αντίστασης είναι ιδιαίτερα δύσκολος λόγω της έντονης μη γραμμικότητας του μαγνητικού κυκλώματος, καθώς σε κάθε τμήμα του μαγνητικού κυκλώματος υπάρχει διαφορετική μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής με

το χρόνο. Επίσης, δύσκολος είναι ο υπολογισμός σε μηχανές υψηλής ταχύτητας περιστροφής όπου τα πεδιακά μεγέθη εναλλάσσονται με μεγάλη συχνότητα.

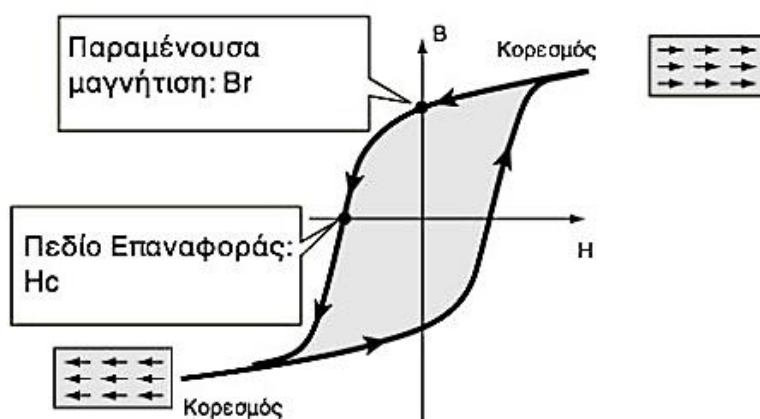
Στην εργασία αυτή ο υπολογισμός των απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων είναι προσεγγιστικός και γίνεται μέσω της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία.

5.5.1. Απώλειες υστέρησης

Όταν η πυκνότητα μαγνητικής ροής σε ένα μέσο μεταβάλλεται τότε απορροφάται ή αποδίδεται ενέργεια από το μέσο αυτό. Η ενέργεια αυτή δίνεται από το ολοκλήρωμα:

$$w = \int_{B_1}^{B_2} H \cdot dB \left(\frac{J}{m^3} \right) \quad (5.47)$$

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά τείνουν να διατηρήσουν τη μαγνητική ροή στο σώμα τους έπειτα από την επιβολή μαγνητικού πεδίου, ακόμα και μετά την αφαίρεση του. Για το λόγο αυτόν οι καμπύλες μαγνήτισης και απομαγνήτισης διαφέρουν, σχηματίζοντας το βρόχο υστέρησης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 5.11).



Σχήμα 5.11. Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού. [21]

Υπολογίζοντας το παραπάνω ολοκλήρωμα για έναν κύκλο μαγνήτισης και απομαγνήτισης προκύπτει ότι το υλικό απορροφά περισσότερη ενέργεια απ'όση τελικά αποδίδει. Η ενεργειακή διαφορά μετατρέπεται σε θερμότητα και ισούται με το εμβαδόν του βρόχου υστέρησης. Αυτή η ενέργεια που χάνεται σε κάθε κύκλο ονομάζεται απώλεια υστέρησης και συμβαίνει σε όλο τον όγκο του υλικού, με συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας και τη μείωση της απόδοσης της ηλεκτρικής μηχανής.

Στην ειδική περίπτωση που η μαγνητική ροή μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με τη συχνότητα f , χωρίς το σχηματισμό μικρότερων βρόχων, και με μέγιστη τιμή B_m , η ειδική απώλεια από υστέρηση δίνεται από την εμπειρική σχέση:

$$p_h = k_h \cdot f \cdot B_m^2 \left(W/m^3 \right) \quad (5.48)$$

όπου η σταθερά k_h εξαρτάται από τη δομή του υλικού.

Η παραπάνω μοντελοποίηση των απωλειών υστέρησης προϋποθέτει ότι η μαγνητική ροή μεταβάλλεται μόνο ως προς το μέτρο, ενώ η διεύθυνσή της παραμένει σταθερή. Στις στρεφόμενες μηχανές, όμως, η διεύθυνση της μαγνητικής ροής μεταβάλλεται. Κατά συνέπεια εμφανίζεται επιπλέον περιστροφική απώλεια υστέρησης.

5.5.2. Απώλειες δινορρευμάτων

Η χρονική μεταβολή της μαγνητικής ροής επάγει πεδίο στο σώμα του πυρήνα. Λόγω της αγωγιμότητας των σιδηρομαγνητικών υλικών, εμφανίζονται ρεύματα στο σώμα του πυρήνα, που ονομάζονται δινορρεύματα και ρέουν κυκλικά σε επίπεδο κάθετο προς τη διεύθυνση της μαγνητικής ροής. Συνεπώς, εμφανίζονται απώλειες Joule και μέρος της ενέργειας του πεδίου μετατρέπεται σε θερμότητα.

Στην περίπτωση που η μαγνητική ροή μεταβάλλεται ημιτονοειδώς ως προς το μέτρο της και μόνο, μια σχέση περιγραφής της ειδικής απώλειας από δινορρεύματα είναι η εξής:

$$p_e = k_e \cdot f^2 \cdot B_m^2 \left(W/m^3 \right) \quad (5.49)$$

όπου η σταθερά k_e εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στην περίπτωση που μεταβάλλεται και η διεύθυνση οι απώλειες δινορρευμάτων είναι μεγαλύτερες.

5.5.3. Απώλειες δινορρευμάτων στους μαγνήτες

Η σχετικά υψηλή αγωγιμότητα των μαγνητών Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου (NdFeB) ενδέχεται να προκαλέσει επιπλέον απώλεια λόγω δινορρευμάτων. Αυτά τα δινορρεύματα μπορεί να γίνουν αιτία μερικής (και μη αναστρέψιμης) απομαγνήτισης. Σε σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών με κοντινούς αριθμούς πόλων και αυλάκων, η μαγνητεγερτική δύναμη του στάτη περιέχει ένα μεγάλο αριθμό χωρικών αρμονικών, οι οποίες προκαλούν απώλειες δινορρευμάτων στους μαγνήτες.

Προκειμένου να περιοριστούν οι απώλειες στους μαγνήτες, μια καλή λύση είναι η τεχνική ελεγχόμενης ανόρθωσης PWM, μέσω της οποίας καταστέλλονται οι ανώτερες αρμονικές του φασικού ρεύματος. Μια άλλη ιδιαίτερα αποδοτική μέθοδος σχετική με την κατασκευή της μηχανής είναι η κατάτμηση των μαγνητών: Η απώλεια λόγω δινορρευμάτων στους μαγνήτες είναι αντιστρόφως ανάλογη με το πλήθος των

επιμέρους μαγνητών σ' ένα πολικό βήμα. Συνεπώς, «τεμαχίζοντας» το μαγνήτη σε περισσότερα τμήματα, οι απώλειες στους μαγνήτες περιορίζονται σημαντικά.

Στην περίπτωση μηχανών στις οποίες οι μαγνήτες βρίσκονται «θαμμένοι» στο εσωτερικό του σιδήρου του δρομέα, οι απώλειες στους μαγνήτες είναι ασήμαντες (μικρότερες από το 0,5% των συνολικών απωλειών της μηχανής). Αυτό συμβαίνει διότι οι μαγνήτες είναι λιγότερο εκτεθειμένοι στις αρμονικές της μαγνητεγερτικής δύναμης. Συνεπώς, είναι συζητήσιμο εάν αξίζει να εφαρμοστεί κάποια μέθοδο περιορισμού των απωλειών στους μαγνήτες.

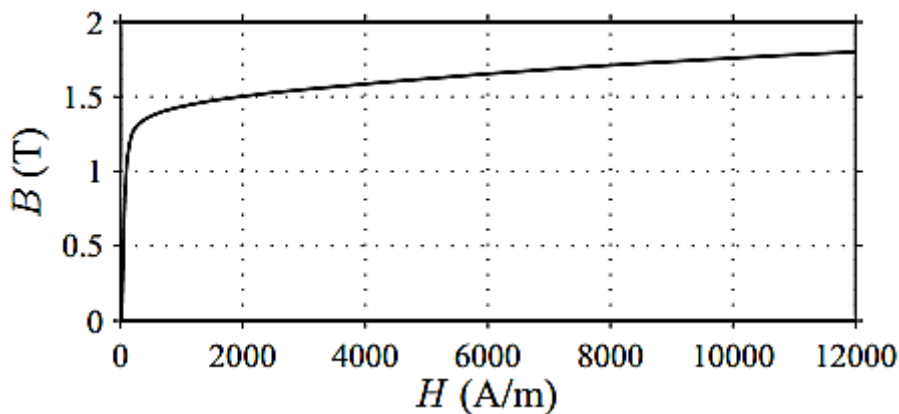
5.6. Υλικά

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση των κινητήρων παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή. Σε αυτήν την ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, οι θερμοκρασίες δεν λαμβάνονται υπόψιν και έτσι όλες οι ιδιότητες των υλικών μοντελοποιούνται ως θερμοκρασιακά αμετάβλητες.

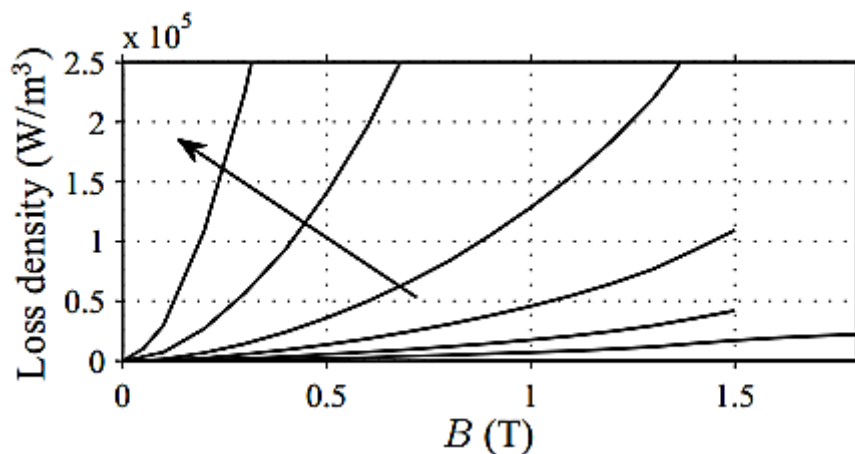
5.6.1. Σιδηρομαγνητική λαμαρίνα

Ο στάτης και ο δρομέας της μηχανής κατασκευάζονται από λεπτά φύλλα σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας (δυναμοελάσματα). Όσο λεπτότερα είναι τα φύλλα λαμαρίνας που χρησιμοποιούνται, τόσο χαμηλότερες είναι οι απώλειες πυρήνα και τόσο μεγαλύτερο γίνεται το κόστος της μηχανής. Ο συντελεστής ελασματοποίησης θεωρείται ότι είναι 95% και έτσι τίθεται στις προσομοιώσεις.

Το σιδηρομαγνητικό υλικό χαμηλών απωλειών που επιλέγεται είναι ο M235-35A (0,35 mm) της εταιρείας Thyssen. Η B-H καμπύλη του σιδηρομαγνητικού αυτού υλικού παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.12 και στο Σχήμα 5.13 παρουσιάζονται οι καμπύλες μαγνητικών απωλειών. Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 5.1) περιέχονται μερικές επιπλέον σημαντικές ιδιότητες του υλικού.



Σχήμα 5.12. B-H καμπύλη της σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας M235-35A στα 50 Hz. [38]



Σχήμα 5.13. Καμπύλες μαγνητικών απωλειών της σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας M235-35A στις συχνότητες 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 400 Hz, 1000 Hz και 2500 Hz. Η κατεύθυνση του βέλους υποδεικνύει την κατεύθυνση αύξησης της συχνότητας. [38]

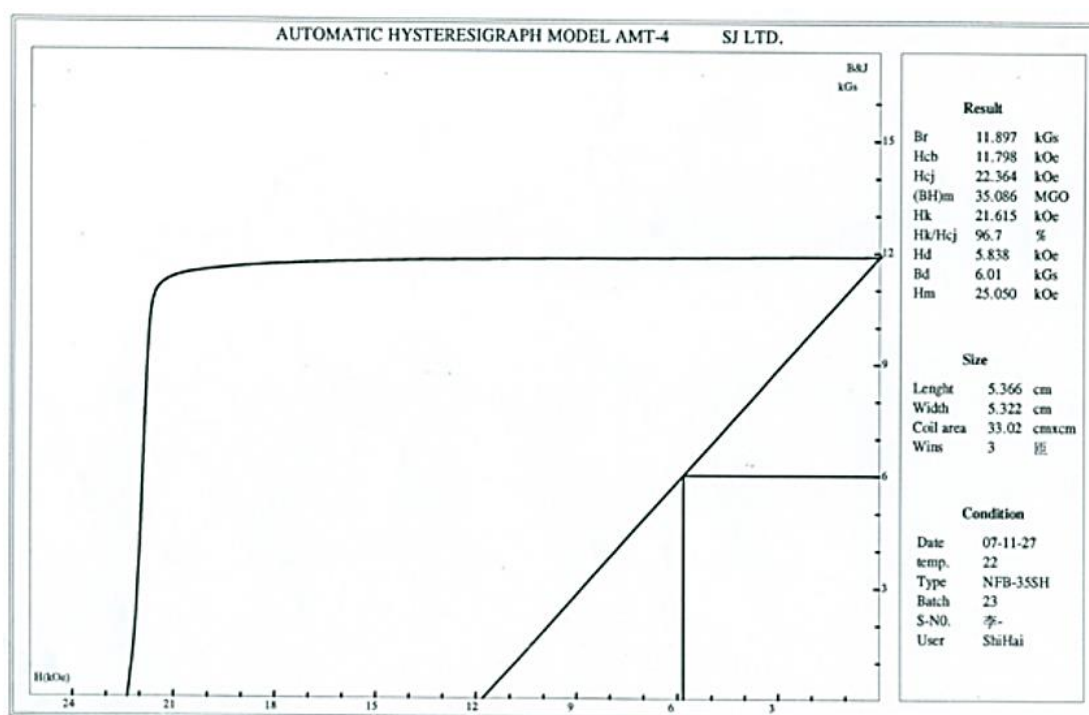
Πίνακας 5.1. Ιδιότητες σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας M235-35A.

Πυκνότητα μάζας	7600 kg/m ³
Ηλεκτρική αντίσταση	590 nΩm

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι απώλειες πυρήνα μπορούν να υπολογιστούν από τις εξισώσεις (5.48) και (5.49). Σύμφωνα με την εργασία των Daniel Eggers, Simon Steentjes και Kay Hameyer, οι απώλειες πυρήνα του υλικού M235-35A μπορούν να εκτιμηθούν με αρκετή ακρίβεια θεωρώντας τους συντελεστές k_h και k_e στις εξισώσεις (5.48) και (5.49) ίσους με $k_h = 138,7$ και $k_e = 0,447$.

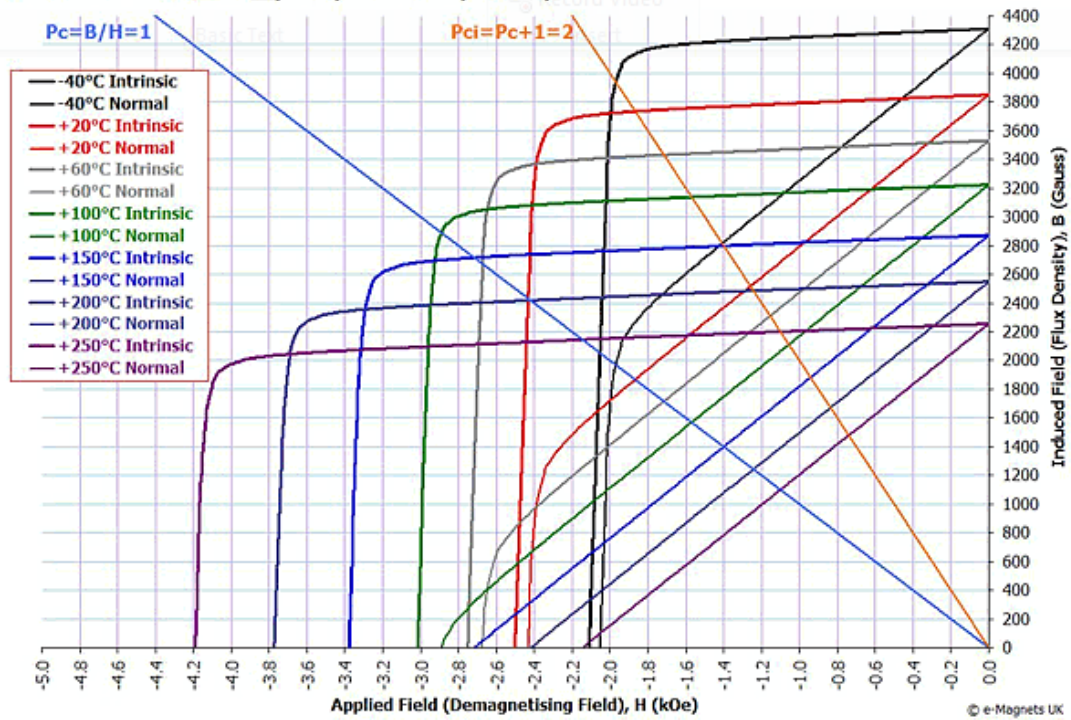
5.6.2. Μόνιμοι μαγνήτες

Το μαγνητικό υλικό που επιλέγεται για τις τρεις πρώτες μηχανές είναι το Neodymium (NdFeB) 35SH και για την τέταρτη μηχανή το Ferrite Y30. Οι καμπύλες απομαγνήτισης παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 5.14 και Σχήμα 5.15). Ωστόσο, για την ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων τα υλικά μοντελοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τη δύναμη εξαναγκασμού και τη σχετική διαπερατότητα αυτών. Οι ιδιότητες που παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 5.2 και Πίνακας 5.3) αντιστοιχούν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Σχήμα 5.14. Καμπύλη απομαγνήτισης του NdFeB 35SH. [22]

BH Curve - Ferrite Y30 / C5 / Ferroba2 / HF26/18



Σχήμα 5.15. Καμπύλη απομαγνήτισης Ferrite Y30. [39]

Πίνακας 5.2. Ιδιότητες NdFeB 35SH.

Δύναμη εξαναγκασμού	876000 A/m
Σχετική διαπερατότητα	1,05
Πυκνότητα μάζας	7400 kg/m ³
Ηλεκτρική αντίσταση	1,6 μΩm

Πίνακας 5.3. Ιδιότητες Ferrite Y30.

Δύναμη εξαναγκασμού	230000 A/m
Σχετική διαπερατότητα	1,05
Πυκνότητα μάζας	3400 kg/m ³
Ηλεκτρική αντίσταση	10 ¹⁰ μΩm

Τα σημεία λειτουργίας των μαγνητών θα πρέπει να ελεγχθούν έπειτα από τη θερμική ανάλυση. Είναι απαραίτητο οι μαγνήτες ποτέ να μη λειτουργούν στη ζώνη μη αναστρέψιμου απομαγνήτισμού προκειμένου να αποφευχθεί ο μόνιμος απομαγνήτισμός τους. Κάτι τέτοιο θα προκαλούσε μη αναστρέψιμες αλλαγές στις ιδιότητες τους και συνεπώς, αλλαγές στη συμπεριφορά της κάθε μηχανής.

5.7. Πεδιακή ανάλυση

Προκειμένου να αναλυθούν οι τοπολογίες των σύγχρονων μηχανών μαγνητικής αντίστασης με μόνιμους μαγνήτες χρησιμοποιήθηκε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων δύο διαστάσεων για κάθε μία από αυτές. Με τη χρήση των μοντέλων αυτών θα προσδιοριστούν οι σχεδιαστικές παράμετροι για τις οποίες μεγιστοποιείται η μηχανική ροπή και ελαχιστοποιείται ο όγκος του μαγνήτη.

Βέβαια, δευτερεύοντες στόχοι της ανάλυσης είναι η ελαχιστοποίηση του μεγέθους της μηχανής και της κυμάτωσης ροπής και η επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης υπό συνθήκες ονομαστικού φορτίου. Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης της σχεδίασης έγινε προσπάθεια ώστε οι δευτερόντες στόχοι να μην ξεπερνούν κάποια όρια και να πληρούν τις προδιαγραφές που καθορίστηκαν σε αρχικό στάδιο της σχεδίασης.

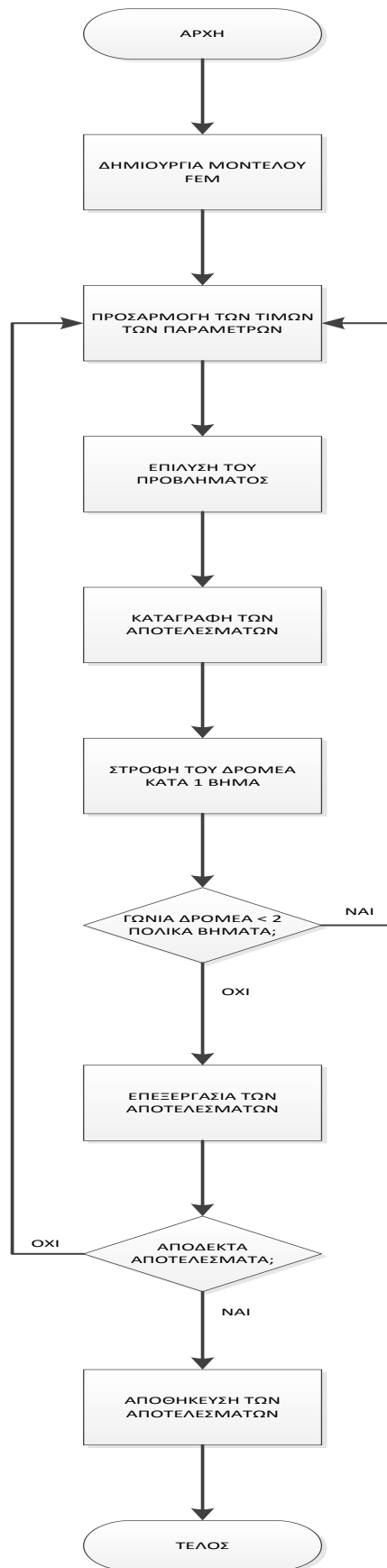
Στην επόμενη σελίδα παρουσιάζεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της σχεδίασης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει τη δημιουργία του μοντέλου FEM. Χρησιμοποιώντας τα λογισμικά Matlab και FEMM, σχεδιάζεται η γεωμετρία του προβλήματος, καθορίζονται τα χαρακτηριστικά των υλικών και οι πυκνότητες των ρευμάτων και ορίζονται οι οριακές συνθήκες του προβλήματος.

Στο δεύτερο βήμα αρχικοποιούνται οι τιμές των παραμέτρων σύμφωνα με τα δεδομένα του προβλήματος.

Επειδή η μαγνητική επαγωγή στο διάκενο διαφοροποιείται με τη θέση του δρομέα, απαιτείται η επανάληψη της ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για διαφορετικές θέσεις του δρομέα σε μια ηλεκτρική περίοδο (2 πολικά βήματα). Για το λόγο αυτόν, δημιουργείται μια επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία ο δρομέας και τα ρεύματα των τυλιγμάτων του στάτη στρέφονται σύγχρονα σύμφωνα με τη σχέση ηλεκτρικής-μηχανικής ταχύτητας κατά ένα μικρό βήμα ($\beta\eta\mu\alpha = 1^\circ$). Σε κάθε επανάληψη της παραπάνω διαδικασίας καταγράφονται η ροπή στο μέσο του διακένου, η μαγνητική ροή της φάσης A η οποία θα χρησιμεύσει στον υπολογισμό της αντι-HEΔ και οι απώλειες σιδήρου και χαλκού.

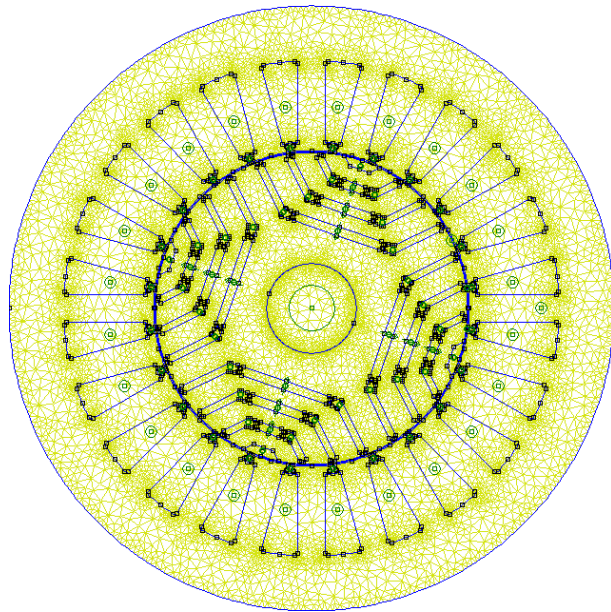
Το έβδομο βήμα αφορά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων ώστε να προκύψουν μεγέθη τα οποία μπορούν να δώσουν μια καλύτερη εικόνα σχετικά με τη λειτουργία της μηχανής.

Τα μεγέθη αυτά ελέγχονται και εφόσον είναι αποδεκτά, αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων. Σε περίπτωση που δεν είναι αποδεκτά η διαδικασία επιστρέφει στο δεύτερο βήμα, οι τιμές των παραμέτρων προσαρμόζονται και η διαδικασία συνεχίζει έως ότου φτάσει σε αποδεκτά αποτελέσματα.

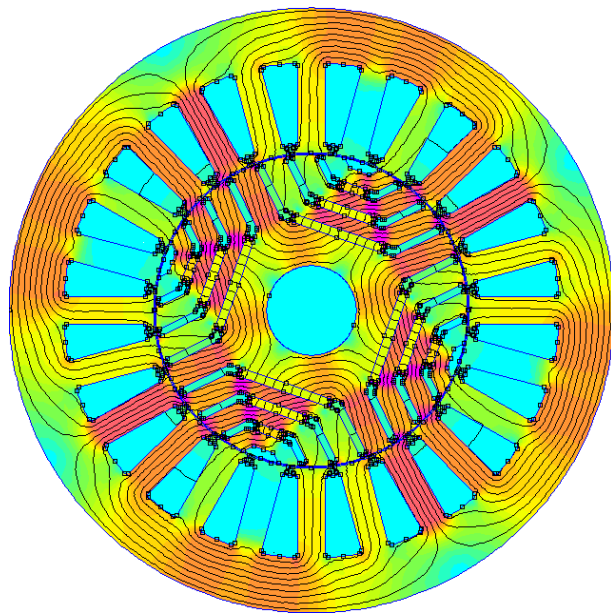


Σχήμα 5.16. Επαναληπτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης της σχεδίασης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

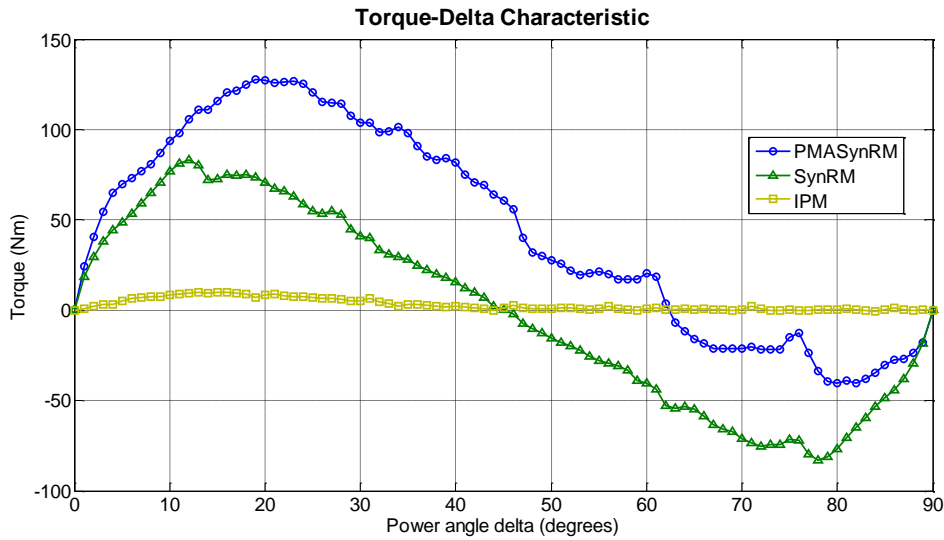
5.7.1. Προτεινόμενη γεωμετρία δρομέα Α (Μηχανή Α)



Σχήμα 5.17. Πλέγμα αποτελούμενο από 38441 κόμβους ή 76520 στοιχεία.



Σχήμα 5.18. Κατανομή μαγνητικού πεδίου της μηχανής Α υπό ονομαστικό φορτίο.



Σχήμα 5.19. Χαρακτηριστικές ροπής-γωνίας για τη σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης (πράσινη γραμμή), τη σύγχρονη μηχανή με εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες (κίτρινη γραμμή) και τη σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης με μόνιμους μαγνήτες (μπλε γραμμή). Η μέγιστη ροπή για τη σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης με μόνιμους μαγνήτες είναι 128 Nm και παράγεται σε γωνία 19° μηχανικές ή σε 38° ηλεκτρικές.

5.7.1.1. Ηλεκτρεγερτική δύναμη

Μια χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή που κυκλοφορεί σ' ένα βρόχο ο οποίος αποτελείται από αγώγιμο υλικό θα επάγει μια τάση στον βρόχο που δίνεται από τη σχέση:

$$e = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (5.50)$$

Από τον ορισμό της παραγώγου, η σχέση (5.50) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$e(t) = N \cdot \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\Phi(t+h) - \Phi(t)}{h} \quad (5.51)$$

Έτσι, μια προσέγγιση της ΗΕΔ τη χρονική στιγμή t_1 μπορεί να γίνει λαμβάνοντας το πηλίκο:

$$e(t) = N \cdot \frac{\Phi(t_2) - \Phi(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (5.52)$$

Όσο μικρότερη τίθεται η διαφορά αυτή, τόσο ακριβέστερος είναι ο υπολογισμός της ΗΕΔ.

Έτσι, όταν ο δρομέας βρίσκεται σε γωνία k , η ροή της φάσης A υπολογίζεται:

$$\Phi(k) = \sum_{i \in A} \Phi_i(k) - \sum_{j \in A'} \Phi_j(k) \quad (5.53)$$

Στη σχέση (5.53) λαμβάνονται με θετικό πρόσημο οι επιμέρους ροές που επάγουν τάση στους αγωγούς A και με αρνητικό πρόσημο οι αντίστοιχες ροές για τους γειτονικούς αγωγούς A' (επιστροφή).

Στη συνέχεια, δεδομένης της μορφής του τυλίγματος, ως N λαμβάνεται ο αριθμός των σπειρών ανά αύλακα και στρώση.

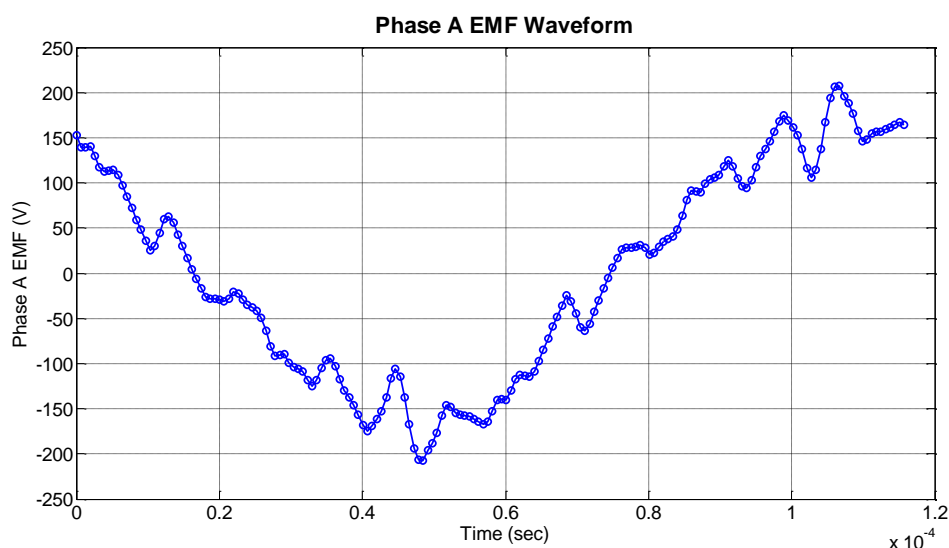
Τέλος, από τον τύπο σύνθετης παραγώγου προκύπτει:

$$e = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = N \cdot \frac{d\Phi}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = N \cdot \frac{d\Phi}{d\theta} \cdot \omega_m \quad (5.54)$$

Η επαγόμενη τάση γράφεται:

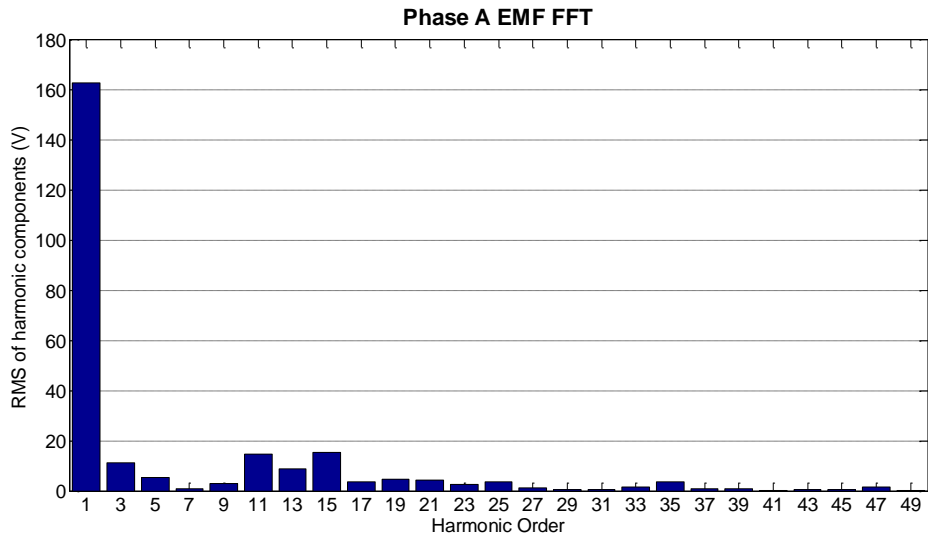
$$e(k) = N \cdot \frac{\Delta\Phi(k)}{\Delta\theta(^{\circ})} \cdot \omega_m \left(\text{rad/s} \right) \quad (5.55)$$

Στο Σχήμα 5.20 παρουσιάζεται η κυματομορφή της ΗΕΔ της μηχανής A όπως υπολογίστηκε με τον παραπάνω τρόπο.



Σχήμα 5.20. Κυματομορφή ΗΕΔ της μηχανής A σε ονομαστικό φορτίο.

Από το Σχήμα 5.20 προκύπτει η ύπαρξη αρμονικών υψηλής τάξης, η οποία επιβεβαιώνεται από τη φασματική ανάλυση της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (Σχήμα 5.21).



Σχήμα 5.21. Φασματική ανάλυση ΗΕΔ της μηχανής A σε ονομαστικό φορτίο.

Κυρίαρχες αρμονικές είναι οι 3^{ης}, 11^{ης}, 13^{ης} και 15^{ης} τάξης αρμονικές.

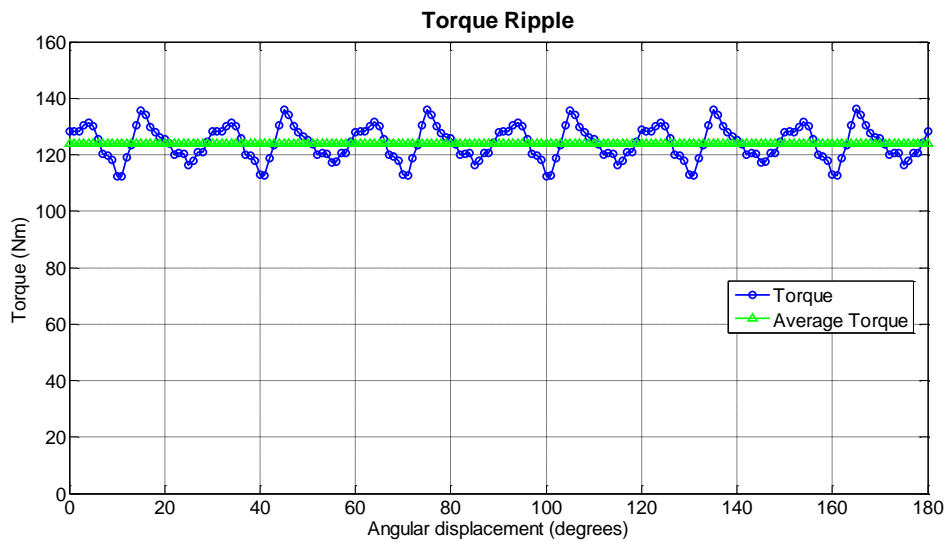
Η συνολική αρμονική παραμόρφωση (THD) της μηχανής A υπολογίστηκε ίση με:

$$THD_A = 17,34\%$$

5.7.1.2. Κυμάτωση ροπής

Η κυμάτωση ροπής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$t_{rp} = \frac{T_{max} - T_{min}}{\bar{T}} \cdot 100\% \quad (5.56)$$



Σχήμα 5.22. Ροπή συναρτήσει της γωνιακής θέσης του δρομέα της μηχανής A σε ονομαστικό φορτίο.

Η κυμάτωση ροπής της μηχανής A υπολογίστηκε ίση με:

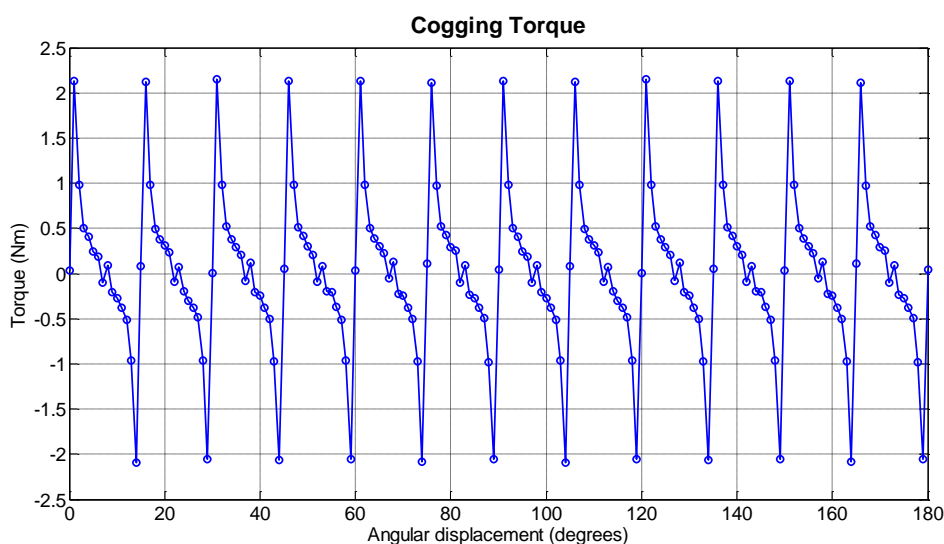
$$t_{rp,A} = 19,08\%$$

Για το συγκεκριμένο τύπο μηχανών η τιμή της κυμάτωσης ροπής της μηχανής A θεωρείται ικανοποιητική.

5.7.1.3. Ροπή Ευθυγράμμισης

Η ροπή ευθυγράμμισης οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ των αυλακώσεων του στάτη και των μαγνητών του δρομέα.

Για τη μέτρηση της ροπής ευθυγράμμισης της μηχανής, ο δρομέας περιστράφηκε κατά δύο πόλους (180°) με βήμα 1° σε κενό φορτίο ($J = 0$). Η μεταβολή της συναρτήσεως της θέσης του δρομέα παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.23.



Σχήμα 5.23. Ροπή ευθυγράμμισης της μηχανής A.

Το μέγεθος της ροπής ευθυγράμμισης από κορυφή σε κορυφή είναι: $4,3 \text{ Nm}$.

5.7.1.4. Απώλειες χαλκού και πυρήνα

Οι απώλειες χαλκού υπολογίζονται μέσω της σχέσης (5.46) ίσες με:

$$P_{cu,A} = 711,9 \text{ W}$$

Οι απώλειες πυρήνα με χρήση των εξισώσεων (5.48) και (5.49) υπολογίζονται ίσες με:

$$P_{core,A} = 356,8 \text{ W}$$

5.7.1.5. Εκτίμηση αυτεπαγωγών ευθέως και καθέτου άξονα

Για τον υπολογισμό των αυτεπαγωγών ευθέως και καθέτου άξονα είναι απαραίτητο να αφαιρεθούν οι μαγνήτες και να αντικατασταθούν με αέρα. Κατόπιν, ο δρομέας ευθυγραμμίζεται με τον άξονα της φάσης A και τα τυλίγματα των τριών φάσεων τροφοδοτούνται ως εξής:

$$I_a = I \quad (5.57)$$

$$I_b = -0,5 \cdot I \quad (5.58)$$

$$I_c = -0,5 \cdot I \quad (5.59)$$

Με τον τρόπο αυτόν προκύπτει ρεύμα μόνο στον ευθύ άξονα ($I_q = 0$) που υπολογίζεται από το μετασχηματισμό Park:

$$I_d = I \quad (5.60)$$

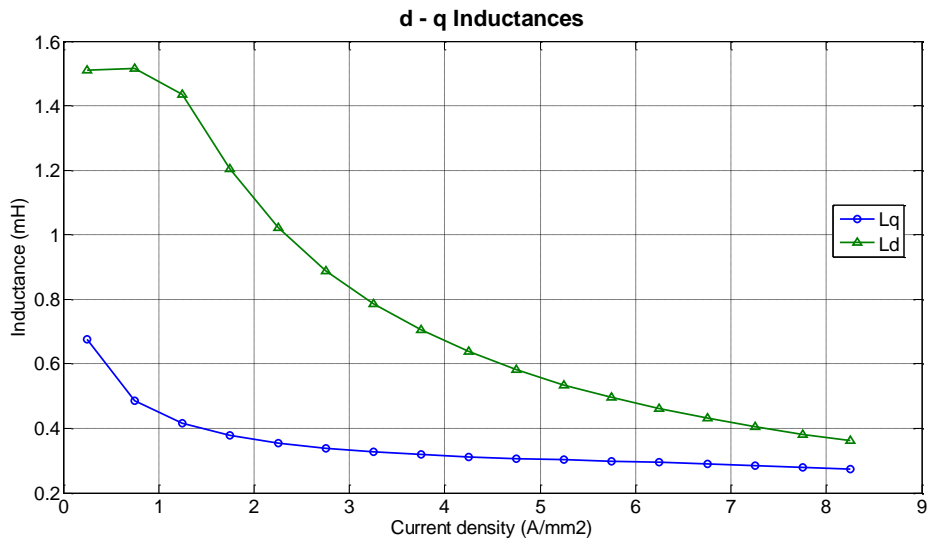
Το ρεύμα μεταβάλλεται από 12,5% έως 200% του ονομαστικού (δηλαδή για πυκνότητα ρεύματος τυλίγματος από 0,5 έως 8 A/mm²).

Στη συνέχεια, μετράται η πεπλεγμένη ροή της φάσης A με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που μετρήθηκε στην εξαγωγή της κυματομορφής της ΗΕΔ. Η αυτεπαγωγή ευθέως άξονα δίνεται από τη σχέση:

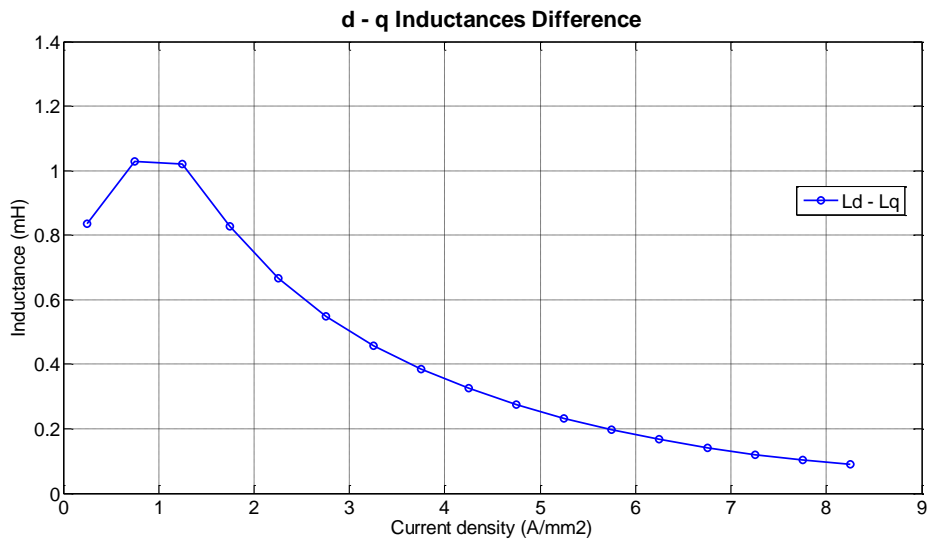
$$L_d = \frac{\Lambda_a}{I_a} = \frac{\Lambda_d}{I_d} \quad (5.61)$$

Διατηρώντας τις σχέσεις των ρευμάτων (5.57), (5.58) και (5.59) και περιστρέφοντας το δρομέα κατά μισό πολικό βήμα, ο άξονας της φάσης A ευθυγραμμίζεται με τον q-άξονα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται όπως προηγουμένως. Η αυτεπαγωγή καθέτου άξονα δίνεται από τη σχέση:

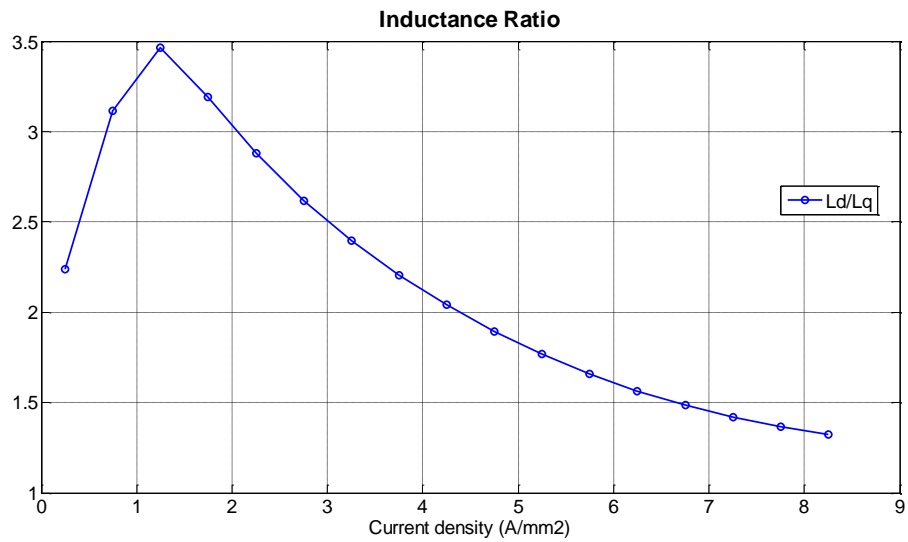
$$L_q = \frac{\Lambda_a}{I_a} = \frac{\Lambda_q}{I_q} \quad (5.62)$$



Σχήμα 5.24. Αυτεπαγωγές ευθέως (πράσινη γραμμή) και καθέτου (μπλέ γραμμή) άξονα της μηχανής A.



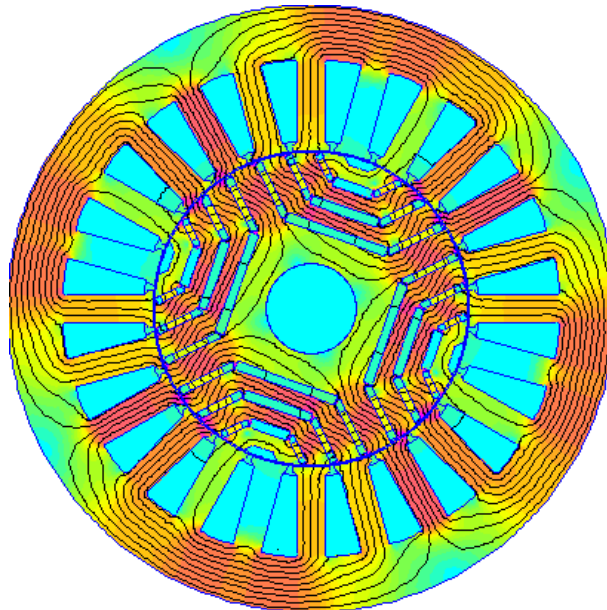
Σχήμα 5.25. Διαφορά αυτεπαγωγών ευθέως και καθέτου άξονα ($L_d - L_q$) της μηχανής A.



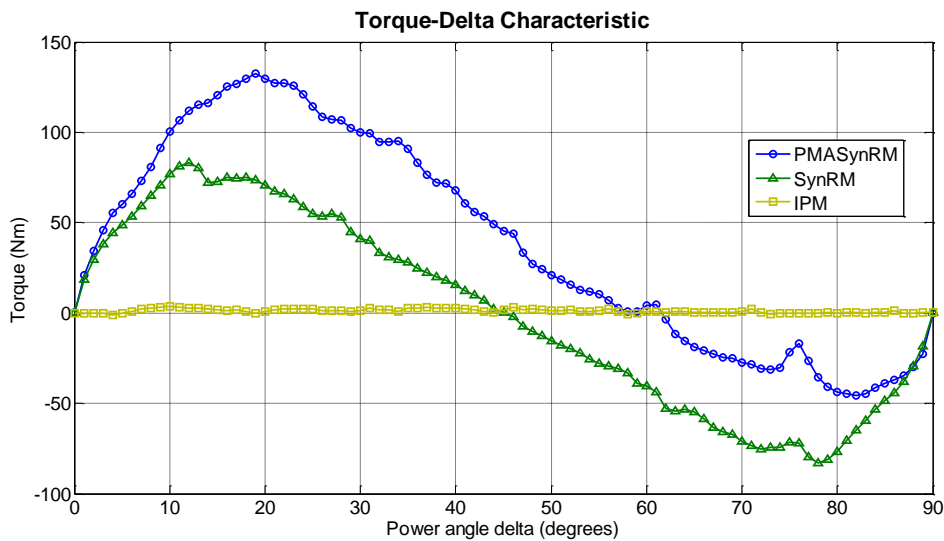
Σχήμα 5.26. Λόγος εκτοπότητας L_d/L_q της μηχανής A.

Από τα παραπάνω σχήματα (Σχήμα 5.24, Σχήμα 5.25 και Σχήμα 5.26) παρατηρείται ότι οι αυτεπαγωγές μειώνονται σημαντικά και απότομα για τιμές πυκνότητας ρεύματος μεγαλύτερες από 2 A/mm^2 , οπότε και επέρχεται κορεσμός του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής.

5.7.2. Προτεινόμενη γεωμετρία δρομέα Β (Μηχανή Β)

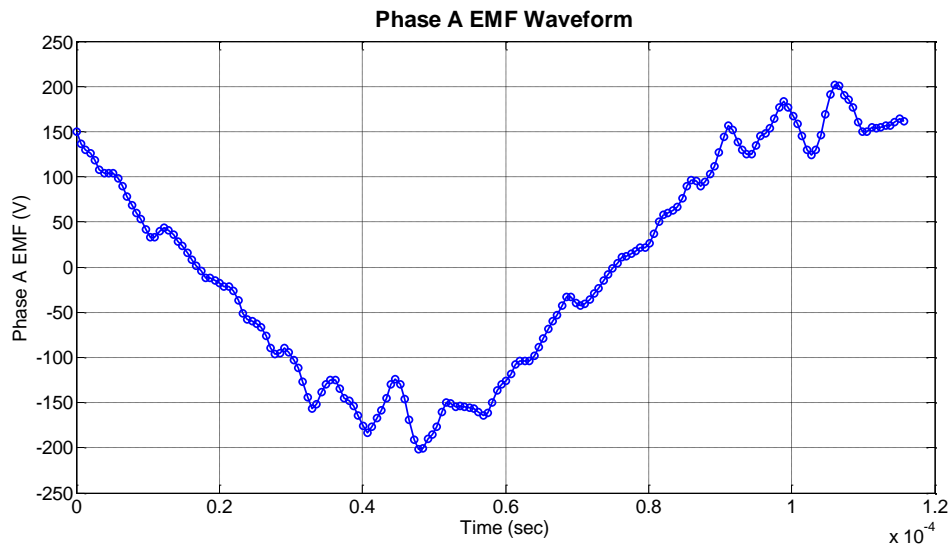


Σχήμα 5.27. Κατανομή μαγνητικού πεδίου της μηχανής Β υπό ονομαστικό φορτίο.



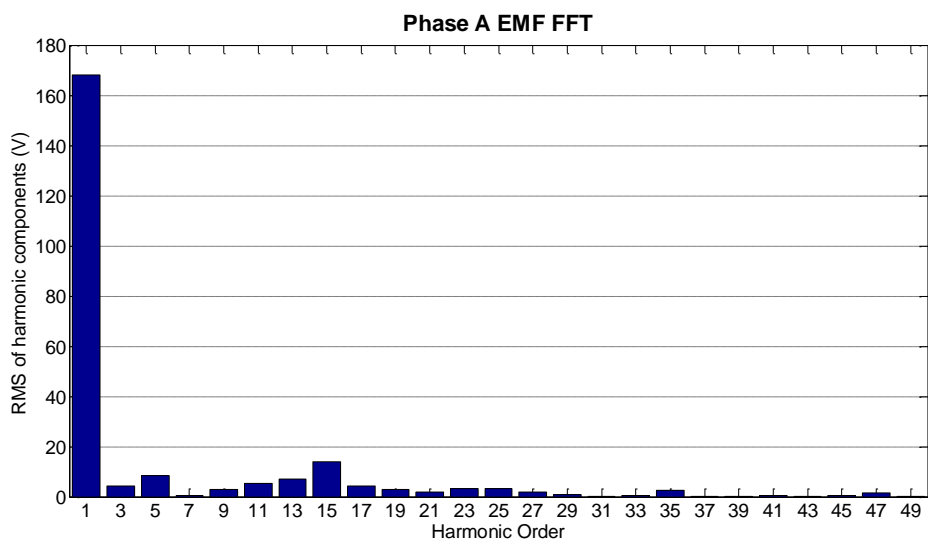
Σχήμα 5.28. Χαρακτηριστικές ροπής-γωνίας για τη σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης (πράσινη γραμμή), τη σύγχρονη μηχανή με εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες (κίτρινη γραμμή) και τη σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης με μόνιμους μαγνήτες (μπλε γραμμή). Η μέγιστη ροπή για τη σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης με μόνιμους μαγνήτες είναι 132Nm και παράγεται σε γωνία 19° μηχανικές ή σε 38° ηλεκτρικές.

5.7.2.1. Ηλεκτρεγερτική δύναμη



Σχήμα 5.29. Κυματομορφή ΗΕΔ της μηχανής B σε ονομαστικό φορτίο.

Από το Σχήμα 5.29 προκύπτει η ύπαρξη αρμονικών υψηλής τάξης, η οποία επιβεβαιώνεται από τη φασματική ανάλυση της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (Σχήμα 5.30).



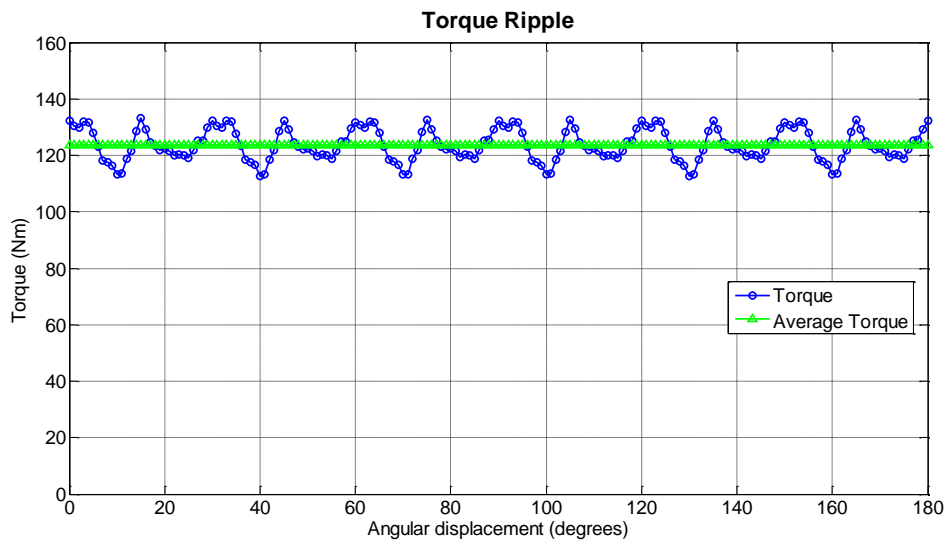
Σχήμα 5.30. Φασματική ανάλυση ΗΕΔ της μηχανής B σε ονομαστικό φορτίο.

Κυρίαρχη αρμονική είναι η 15^η τάξη αρμονική.

Η συνολική αρμονική παραμόρφωση (THD) της μηχανής B υπολογίστηκε ίση με:

$$THD_B = 12,48\%$$

5.7.2.2. Κυμάτωση ροπής



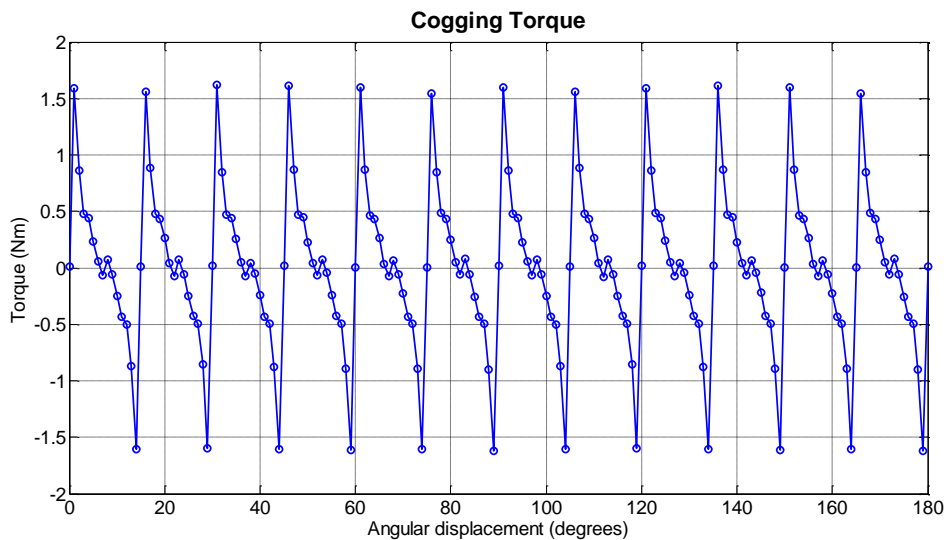
Σχήμα 5.31. Ροπή συναρτήσει της γωνιακής θέσης του δρομέα της μηχανής B σε ονομαστικό φορτίο.

Η κυμάτωση ροπής της μηχανής B υπολογίστηκε ίση με:

$$t_{rp,B} = 16,49\%$$

Για το συγκεκριμένο τύπο μηχανών η τιμή της κυμάτωσης ροπής της μηχανής B θεωρείται καλή.

5.7.2.3. Ροπή ευθυγράμμισης



Σχήμα 5.32. Ροπή ευθυγράμμισης της μηχανής B.

Το μέγεθος της ροπής ευθυγράμμισης από κορυφή σε κορυφή είναι: $3,2 Nm$.

5.7.2.4. Απώλειες χαλκού και πυρήνα

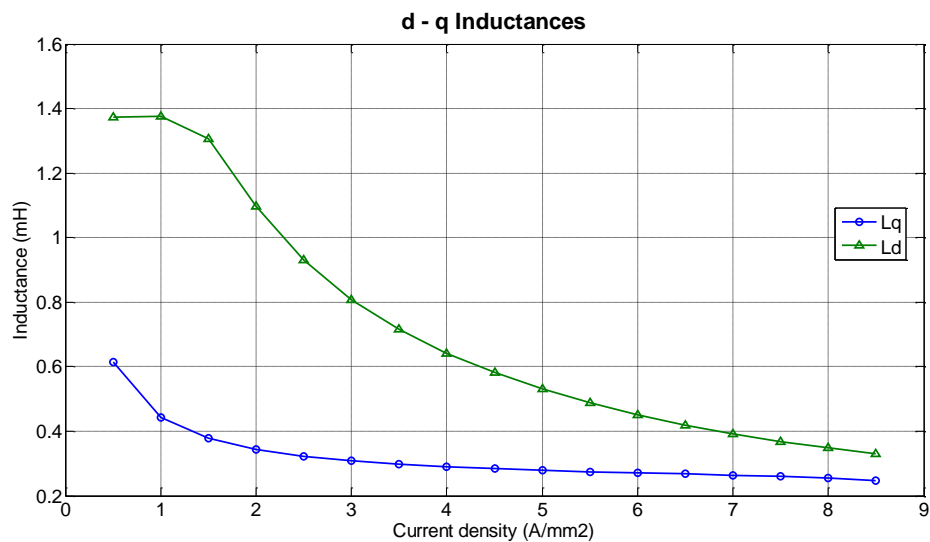
Οι απώλειες χαλκού υπολογίζονται μέσω της σχέσης (5.46) ίσες με:

$$P_{cu,A} = 711,9 W$$

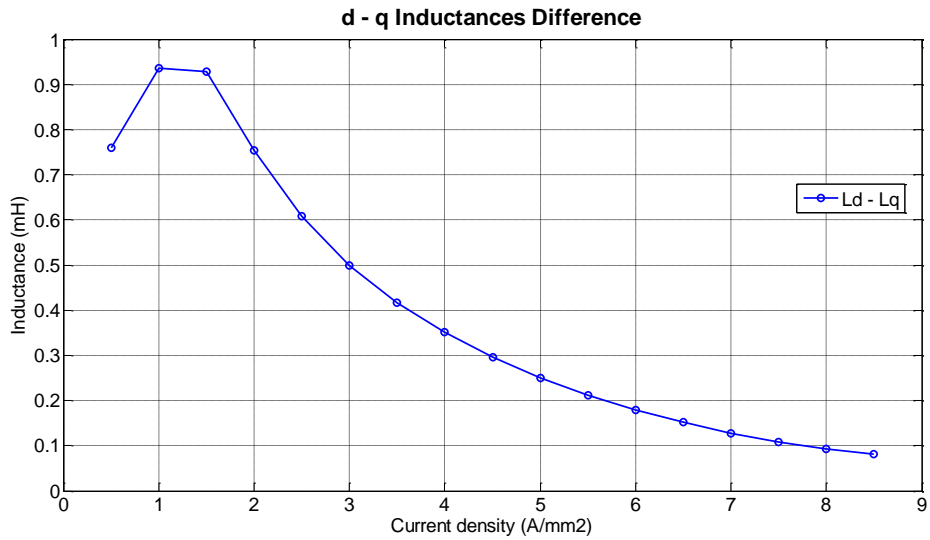
Οι απώλειες πυρήνα με χρήση των εξισώσεων (5.48) και (5.49) υπολογίζονται ίσες με:

$$P_{core,A} = 367,8 W$$

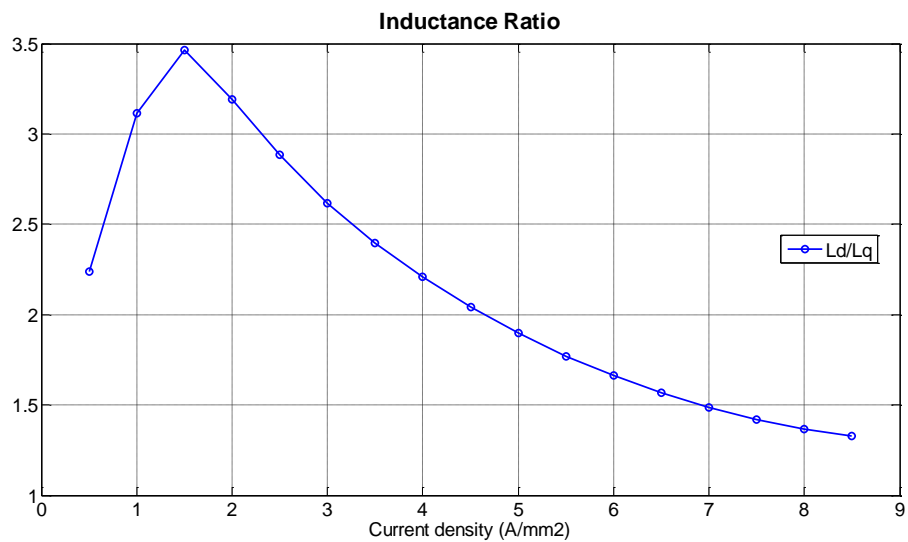
5.7.2.5. Εκτίμηση αυτεπαγωγών ευθέως και καθέτου άξονα



Σχήμα 5.33. Αυτεπαγωγές ευθέως (πράσινη γραμμή) και καθέτου (μπλέ γραμμή) άξονα της μηχανής B.



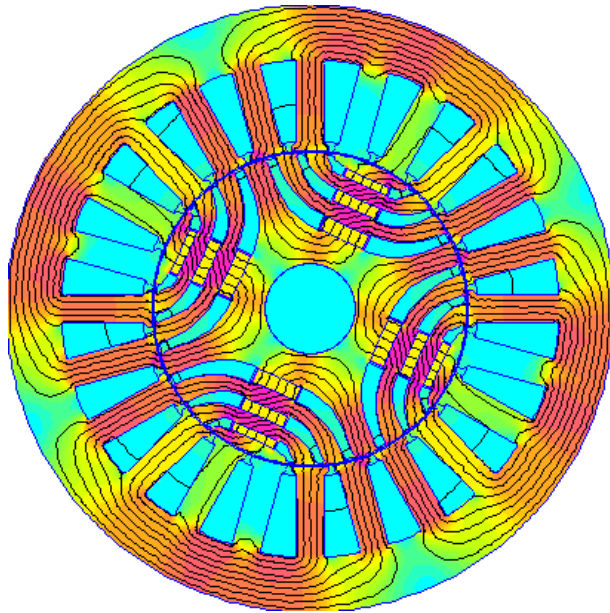
Σχήμα 5.34. Διαφορά αυτεπαγωγών ευθέως και καθέτου άξονα (L_d-L_q) της μηχανής B.



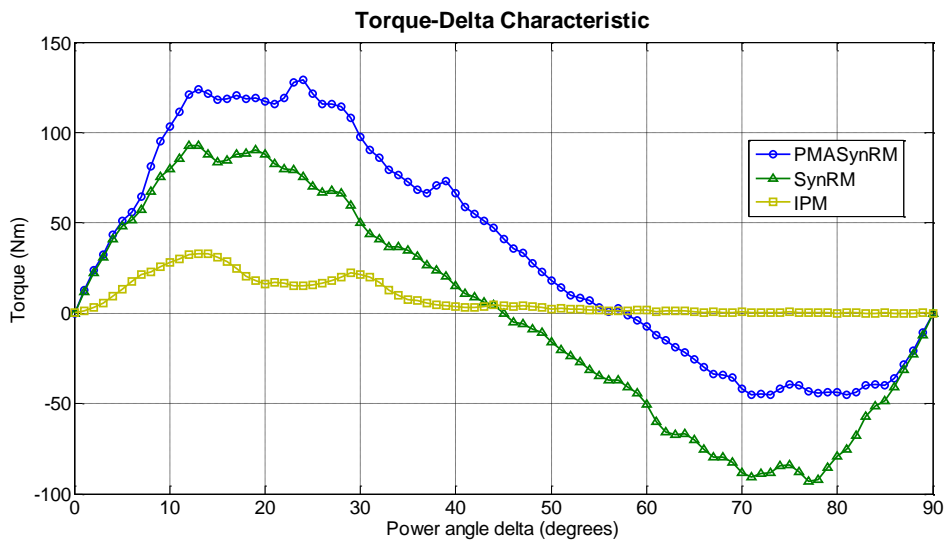
Σχήμα 5.35. Λόγος εκτοπότητας L_d/L_q της μηχανής B.

Από τα παραπάνω σχήματα (Σχήμα 5.33, Σχήμα 5.34 και Σχήμα 5.35) παρατηρείται ότι οι αυτεπαγωγές μειώνονται σημαντικά και απότομα για τιμές πυκνότητας ρεύματος μεγαλύτερες από 2 A/mm^2 , οπότε και επέρχεται κορεσμός του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής.

5.7.3. Προτεινόμενη γεωμετρία δρομέα Γ (Μηχανή Γ)

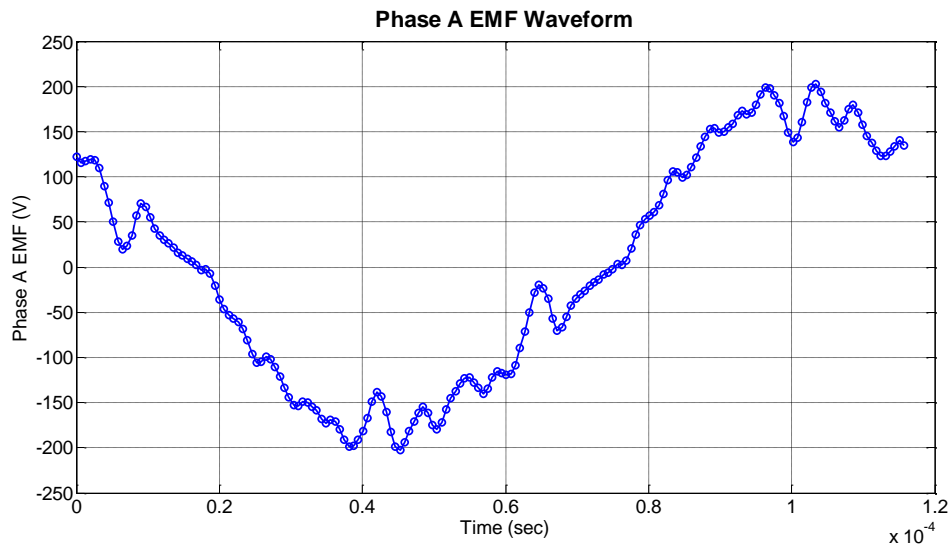


Σχήμα 5.36. Κατανομή μαγνητικού πεδίου της μηχανής Γ υπό ονομαστικό φορτίο.



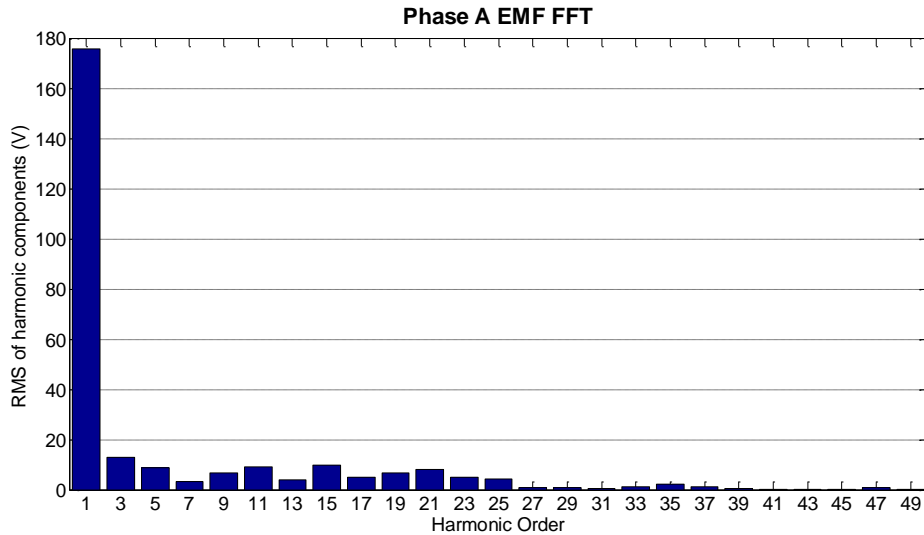
Σχήμα 5.37. Χαρακτηριστικές ροπής-γωνίας για τη σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης (πράσινη γραμμή), τη σύγχρονη μηχανή με εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες (κίτρινη γραμμή) και τη σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης με μόνιμους μαγνήτες (μπλε γραμμή). Η μέγιστη ροπή για τη σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης με μόνιμους μαγνήτες είναι 129Nm και παράγεται σε γωνία 24° μηχανικές ή σε 48° ηλεκτρικές.

5.7.3.1. Ηλεκτρεγερτική δύναμη



Σχήμα 5.38. Κυματομορφή ΗΕΔ της μηχανής Γ σε ονομαστικό φορτίο.

Από το Σχήμα 5.38 προκύπτει η ύπαρξη αρμονικών υψηλής τάξης, η οποία επιβεβαιώνεται από τη φασματική ανάλυση της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (Σχήμα 5.39).



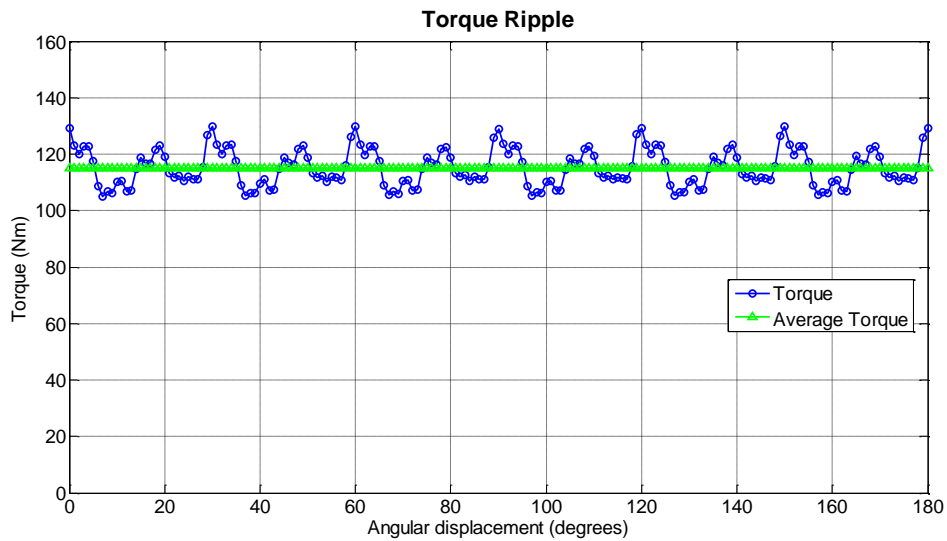
Σχήμα 5.39. Φασματική ανάλυση ΗΕΔ της μηχανής Γ σε ονομαστικό φορτίο.

Αυξημένες είναι οι 3^{ης}, 5^{ης}, 11^{ης}, 15^{ης} και 21^{ης} τάξης αρμονικές με κυρίαρχη την 3^{ης} τάξης αρμονική.

Η συνολική αρμονική παραμόρφωση (THD) της μηχανής Γ υπολογίστηκε ίση με:

$$THD_r = 15,00\%$$

5.7.3.2. Κυμάτωση ροπής



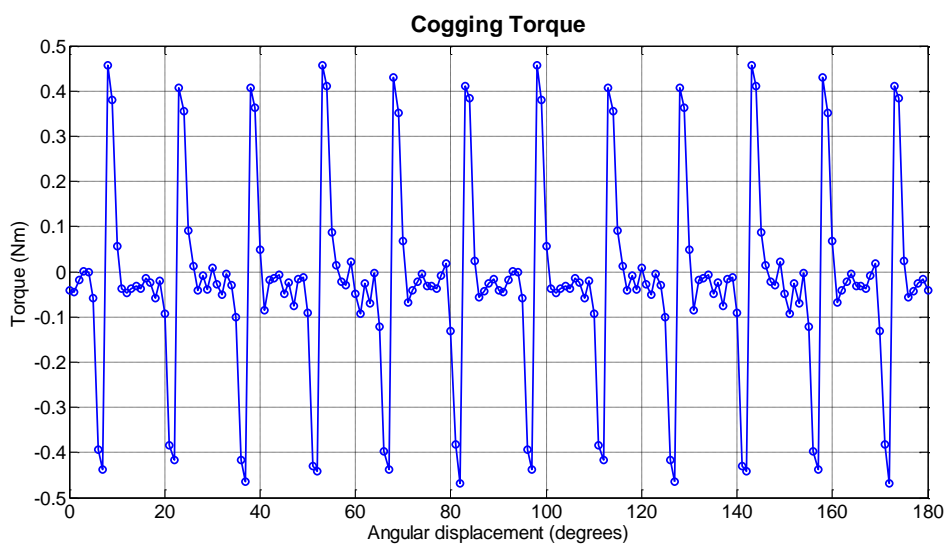
Σχήμα 5.40. Ροπή συναρτήσει της γωνιακής θέσης του δρομέα της μηχανής Γ σε ονομαστικό φορτίο.

Η κυμάτωση ροπής της μηχανής Γ υπολογίστηκε ίση με:

$$t_{rp,\Gamma} = 21,55\%$$

Η τιμή της κυμάτωσης ροπής της μηχανής Γ θεωρείται ικανοποιητική για αυτόν τον τύπο μηχανών.

5.7.3.3. Ροπή ευθυγράμμισης



Σχήμα 5.41. Ροπή ευθυγράμμισης της μηχανής Γ.

Το μέγεθος της ροπής ευθυγράμμισης της μηχανής Γ από κορυφή σε κορυφή είναι: $1,1 Nm$. Αρκετά μειωμένο σε σύγκριση με αυτό των προηγούμενων μηχανών εξαιτίας κυρίως του μεγέθους και της θέσης των μονίμων μαγνητών.

5.7.3.4. Απώλειες

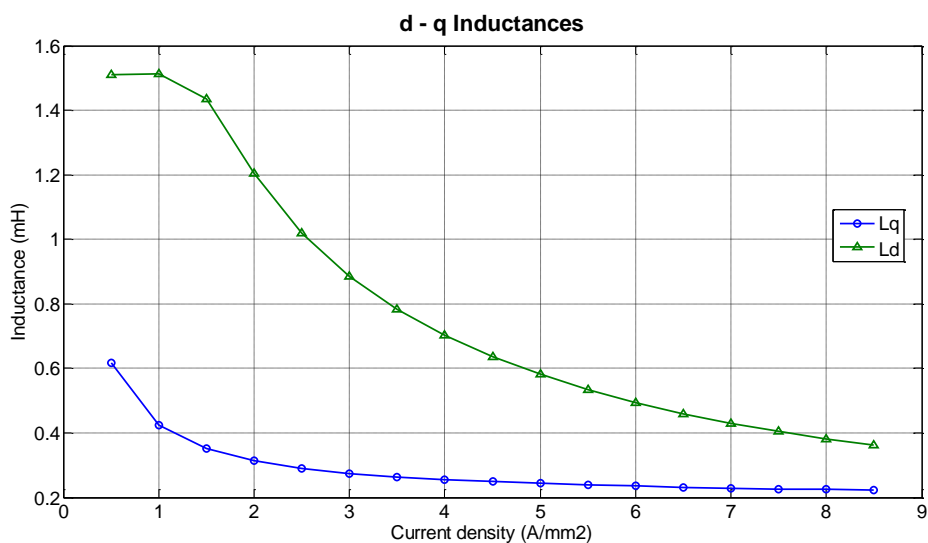
Οι απώλειες χαλκού υπολογίζονται μέσω της σχέσης (5.46) ίσες με:

$$P_{cu,A} = 711,9 W$$

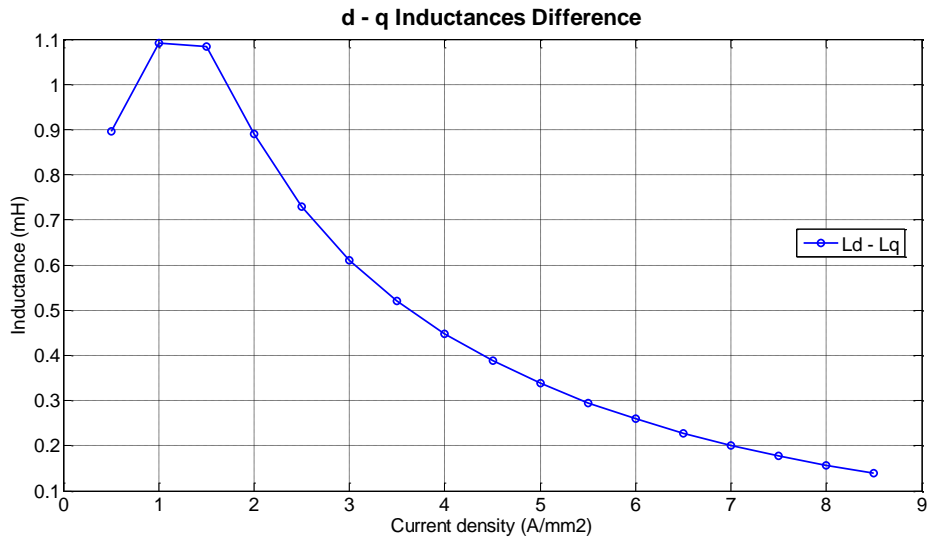
Οι απώλειες πυρήνα με χρήση των εξισώσεων (5.48) και (5.49) υπολογίζονται ίσες με:

$$P_{core,A} = 213,3 W$$

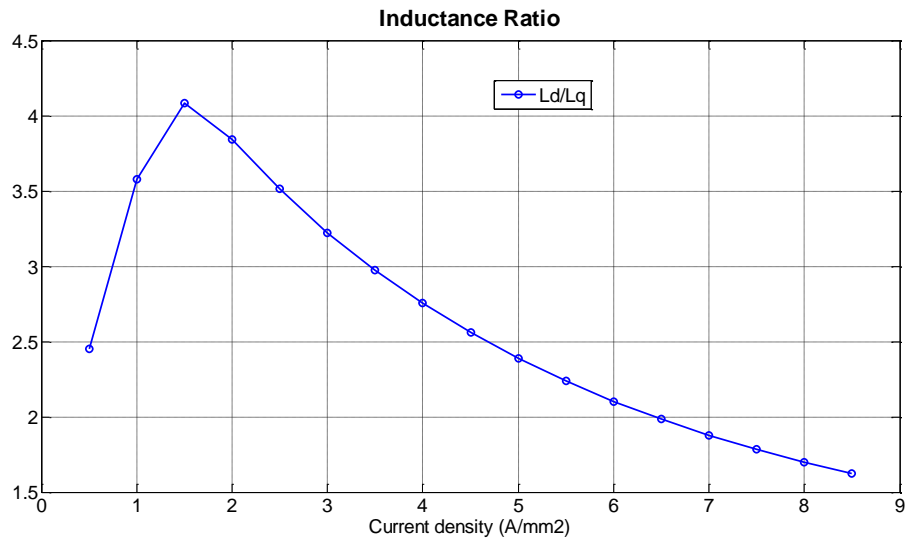
5.7.3.5. Εκτίμηση αυτεπαγωγών ευθέως και καθέτου άξονα



Σχήμα 5.42. Αυτεπαγωγές ευθέως (πράσινη γραμμή) και καθέτου (μπλέ γραμμή) άξονα της μηχανής Γ.



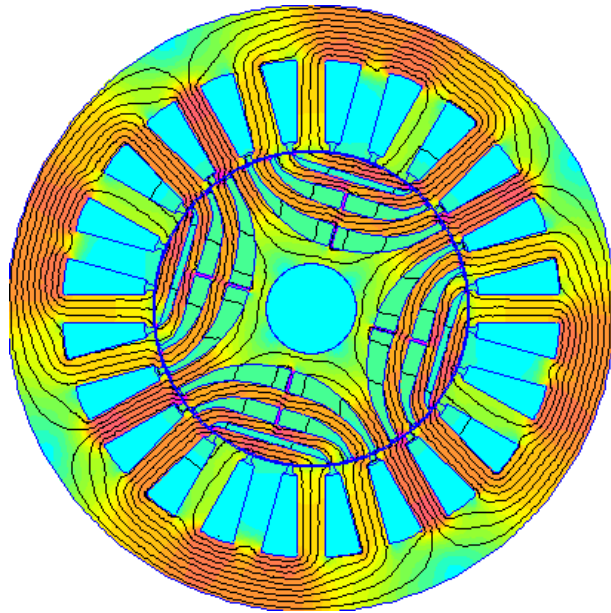
Σχήμα 5.43. Διαφορά αυτεπαγωγών ευθέως και καθέτου άξονα (L_d-L_q) της μηχανής Γ.



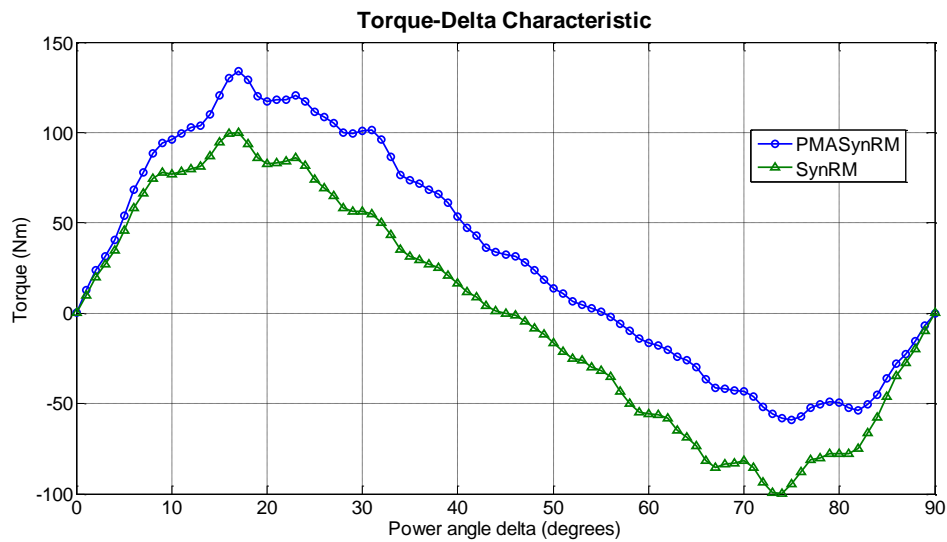
Σχήμα 5.44. Λόγος εκτοπότητας L_d/L_q της μηχανής Γ.

Από τα παραπάνω σχήματα (Σχήμα 5.42, Σχήμα 5.43 και Σχήμα 5.44) παρατηρείται ότι οι αυτεπαγωγές μειώνονται σημαντικά και απότομα για τιμές πυκνότητας ρεύματος μεγαλύτερες από 2 A/mm^2 , οπότε και επέρχεται κορεσμός του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής.

5.7.4. Προτεινόμενη γεωμετρία δρομέα Δ (Μηχανή Δ)

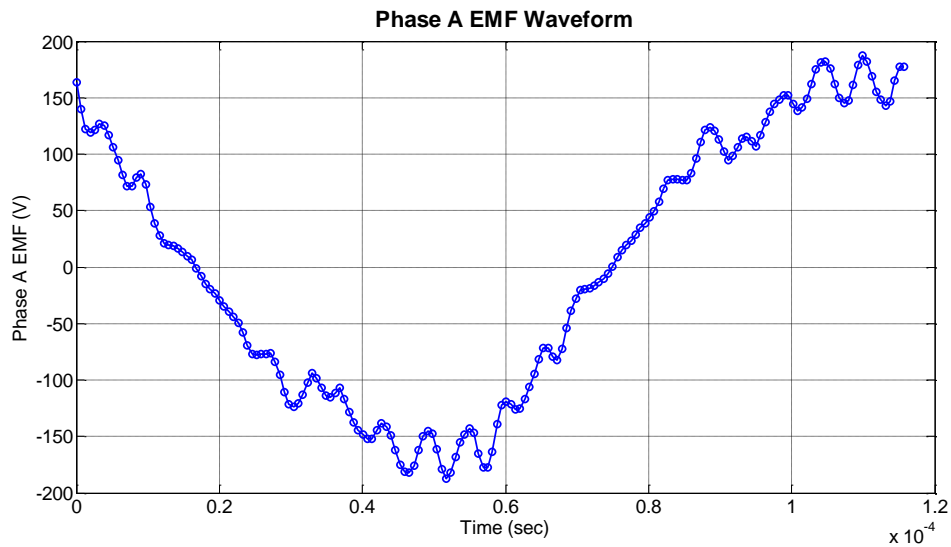


Σχήμα 5.45. Κατανομή μαγνητικού πεδίου της μηχανής Δ υπό ονομαστικό φορτίο.



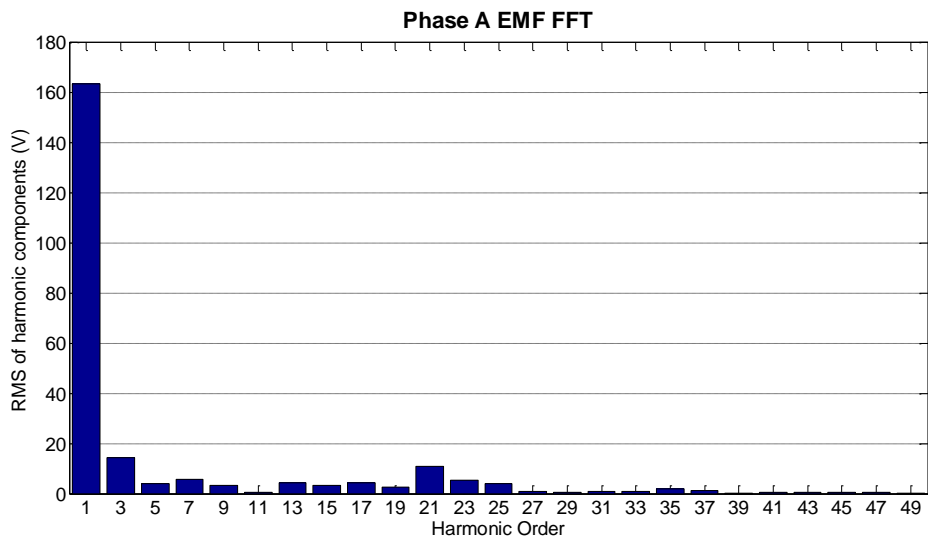
Σχήμα 5.46. Χαρακτηριστικές ροπής-γωνίας για τη σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης (πράσινη γραμμή) και τη σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης με μόνιμους μαγνήτες (μπλε γραμμή). Η μέγιστη ροπή για τη σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης με μόνιμους μαγνήτες είναι 134Nm και παράγεται σε γωνία 17° μηχανικές ή σε 34° ηλεκτρικές.

5.7.4.1. Ηλεκτρεγερτική δύναμη



Σχήμα 5.47. Κυματομορφή ΗΕΔ της μηχανής Δ σε ονομαστικό φορτίο.

Από το Σχήμα 5.47 προκύπτει η ύπαρξη αρμονικών υψηλής τάξης, η οποία επιβεβαιώνεται από τη φασματική ανάλυση της ηλεκτρεγερτικής δύναμης (Σχήμα 5.48).



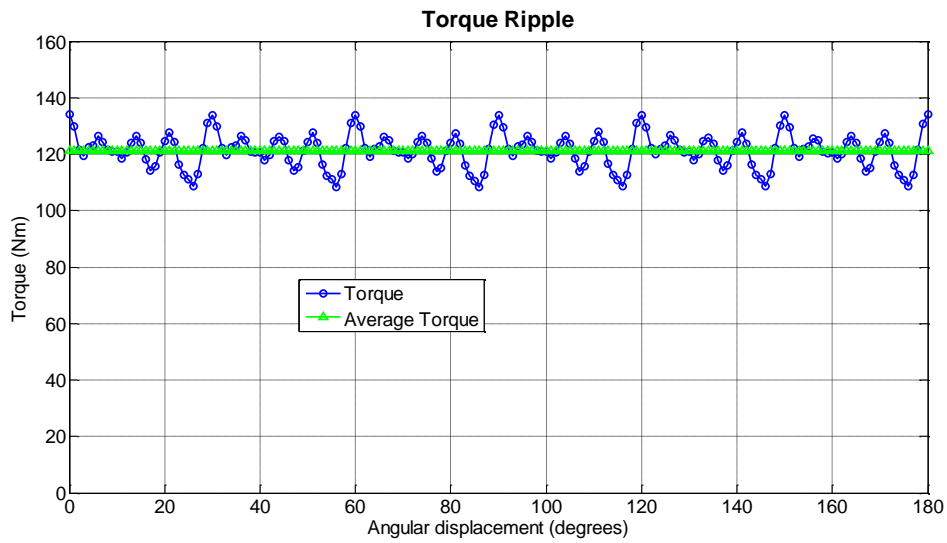
Σχήμα 5.48. Φασματική ανάλυση ΗΕΔ της μηχανής Δ σε ονομαστικό φορτίο.

Κυρίαρχη αρμονική είναι η 3^η τάξης αρμονική.

Η συνολική αρμονική παραμόρφωση (THD) της μηχανής Δ υπολογίστηκε ίση με:

$$THD_{\Delta} = 13,56\%$$

5.7.4.2. Κυμάτωση ροπής



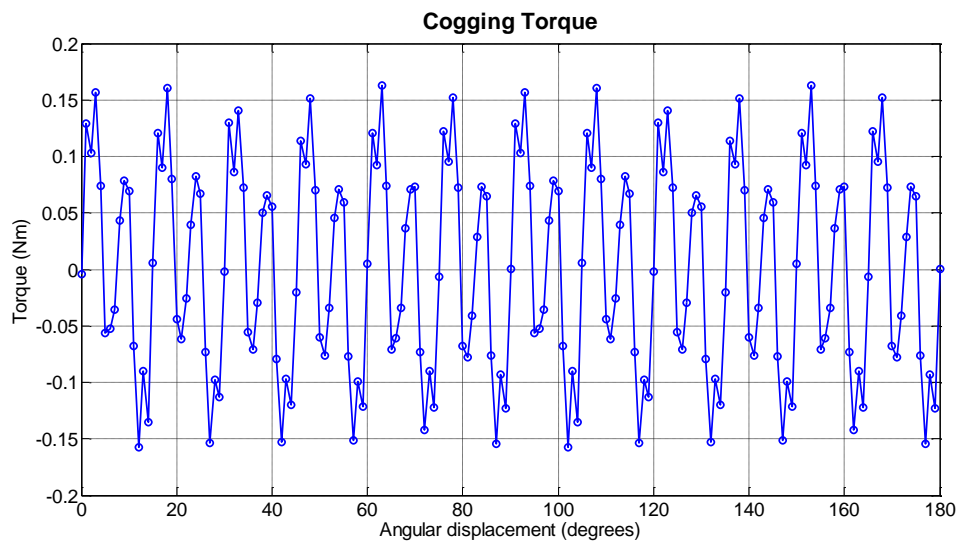
Σχήμα 5.49. Ροπή συναρτήσει της γωνιακής θέσης του δρομέα της μηχανής Δ σε ονομαστικό φορτίο.

Η κυμάτωση ροπής της μηχανής Δ υπολογίστηκε ίση με:

$$t_{rp,\Delta} = 21,07\%$$

Η τιμή της κυμάτωσης ροπής της μηχανής Δ θεωρείται ικανοποιητική.

5.7.4.3. Ροπή ευθυγράμμισης



Σχήμα 5.50. Ροπή ευθυγράμμισης της μηχανής Δ.

Το μέγεθος της ροπής ευθυγράμμισης της μηχανής Δ από κορυφή σε κορυφή είναι: $0,3 Nm$. Αρκετά μειωμένο σε σύγκριση με αυτό των προηγούμενων μηχανών εξαιτίας κυρίως των κατώτερων μαγνητικών ιδιοτήτων του φερρίτη.

5.7.4.4. Απώλειες

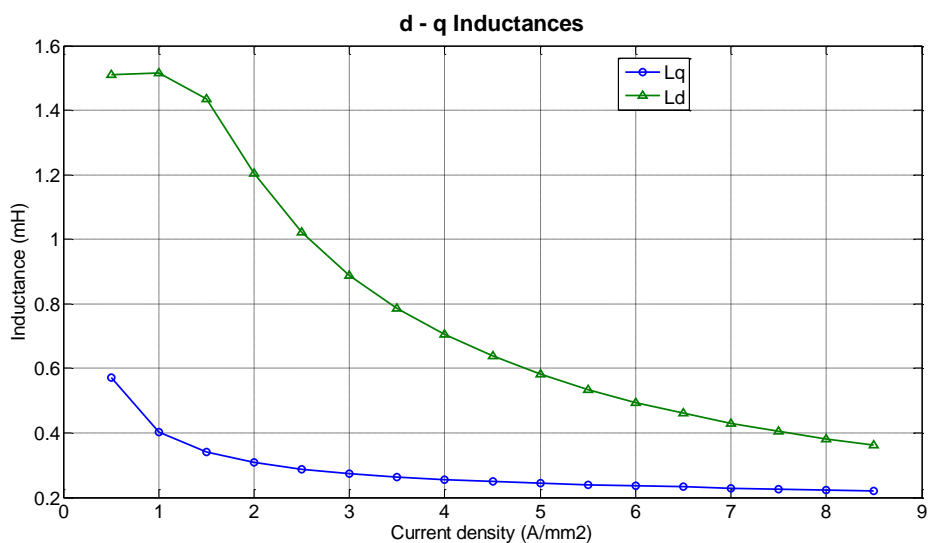
Οι απώλειες χαλκού υπολογίζονται μέσω της σχέσης (5.46) ίσες με:

$$P_{cu,A} = 711,9 W$$

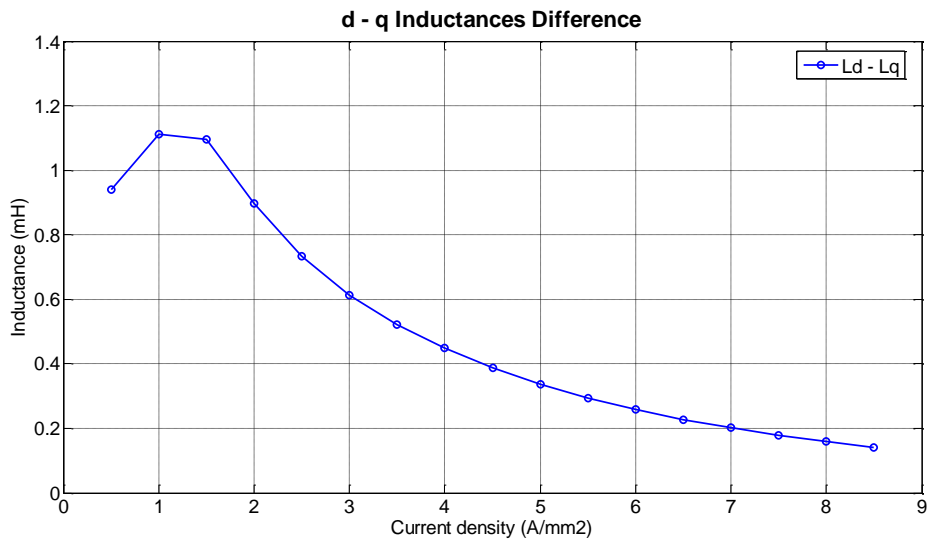
Οι απώλειες πυρήνα με χρήση των εξισώσεων (5.48) και (5.49) υπολογίζονται ίσες με:

$$P_{core,A} = 355 W$$

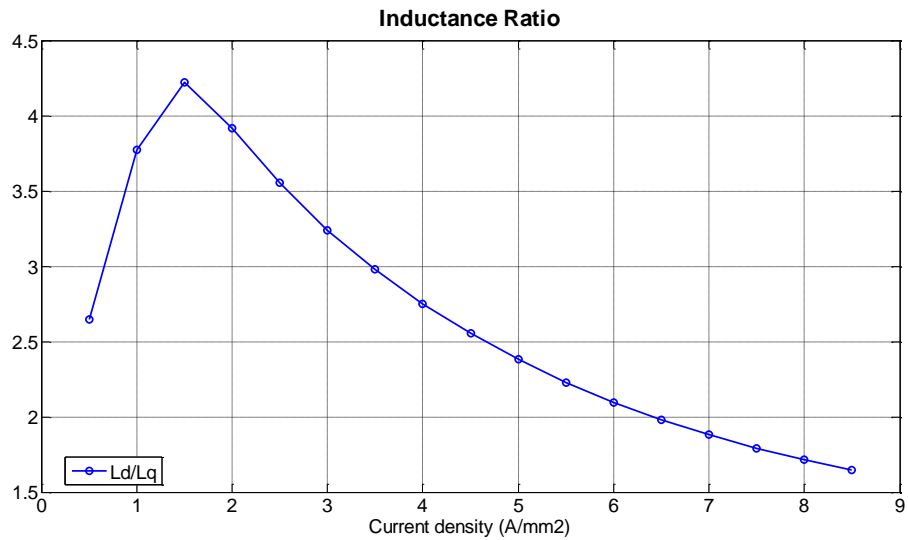
5.7.4.5. Εκτίμηση αυτεπαγωγών ευθέως και καθέτου άξονα



Σχήμα 5.51. Αυτεπαγωγές ευθέως (πράσινη γραμμή) και καθέτου (μπλέ γραμμή) άξονα της μηχανής Δ.



Σχήμα 5.52. Διαφορά αυτεπαγωγών ευθέως και καθέτου άξονα (L_d-L_q) της μηχανής Δ.



Σχήμα 5.53. Λόγος εκτοπότητας L_d/L_q της μηχανής Δ.

Από τα παραπάνω σχήματα (Σχήμα 5.51, Σχήμα 5.52 και Σχήμα 5.53) παρατηρείται ότι οι αυτεπαγωγές μειώνονται σημαντικά και απότομα για τιμές πυκνότητας ρεύματος μεγαλύτερες από 2 A/mm^2 , οπότε και επέρχεται κορεσμός του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής.

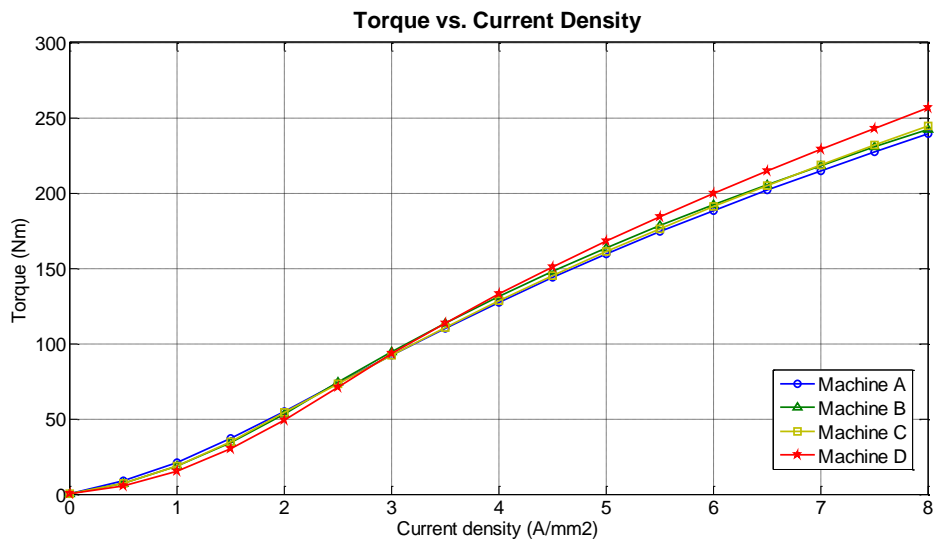
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Σύγκριση και Συμπεράσματα

6.1. Σύγκριση αποτελεσμάτων

6.1.1. Επίδοση

Για την καλύτερη ανάλυση των τεσσάρων μηχανών πραγματοποιήθηκε μελέτη της επίδοσής τους σε ολόκληρο το φάσμα των επιτρεπτών τιμών του ρεύματος. Έτσι, μεταβάλλοντας την πυκνότητα ρεύματος του τυλίγματος στάτη από 0 έως 8 A/mm^2 , μετρήθηκε η ροπή στο μέσο του διακένου. Οι χαρακτηριστικές ροπής-ρεύματος των τεσσάρων μηχανών παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1. Χαρακτηριστικές ροπής-ρεύματος για τις τέσσερις μηχανές.

Είναι φανερό πως οι διαφορές μεταξύ των τεσσάρων χαρακτηριστικών καμπυλών είναι πολύ μικρές. Επίσης, παρατηρείται ότι οι καμπύλες είναι σχεδόν γραμμικές σε όλο το εύρος πυκνότητας ρεύματος. Η χαρακτηριστική καμπύλη της μηχανής Δ

θεωρείται καλύτερη των υπολοίπων για το λόγο ότι σε κατάσταση υπερφόρτισης (8 A/mm^2) η ροπή εξόδου της μηχανής είναι λίγο μεγαλύτερη από 250 Nm .

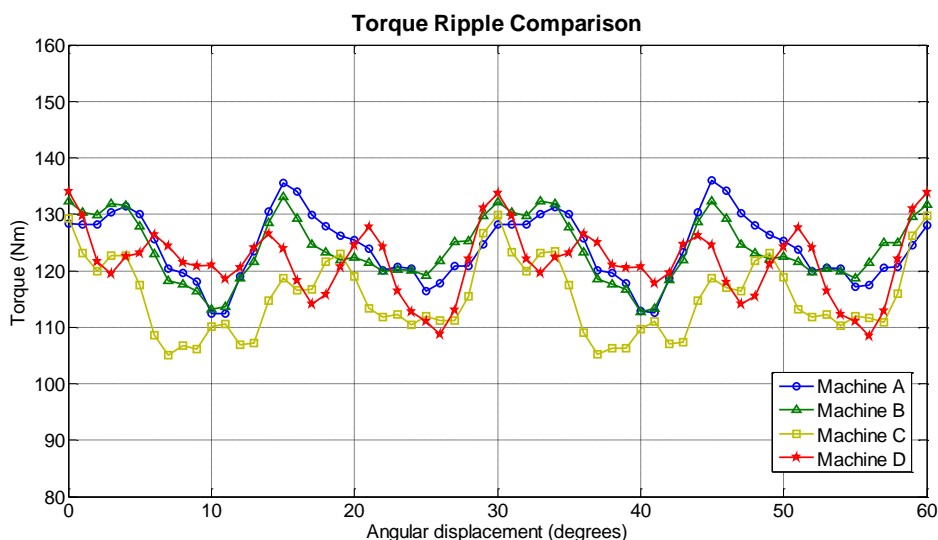
6.1.2. Κυμάτωση ροπής

Η κυμάτωση ροπής προσδιορίζεται από τη μελέτη της σύγχρονης λειτουργίας των μηχανών (σύγχρονη περιστροφή δρομέα και ρευμάτων στάτη κατά ένα καταλλήλως μικρό βήμα). Οι συντελεστές κυμάτωσης υπολογίστηκαν από τη σχέση:

$$t_{rp} = \frac{T_{max} - T_{min}}{\bar{T}} \cdot 100\% \quad (6.1)$$

όπου η μέση ροπή υπολογίστηκε από τη σχέση:

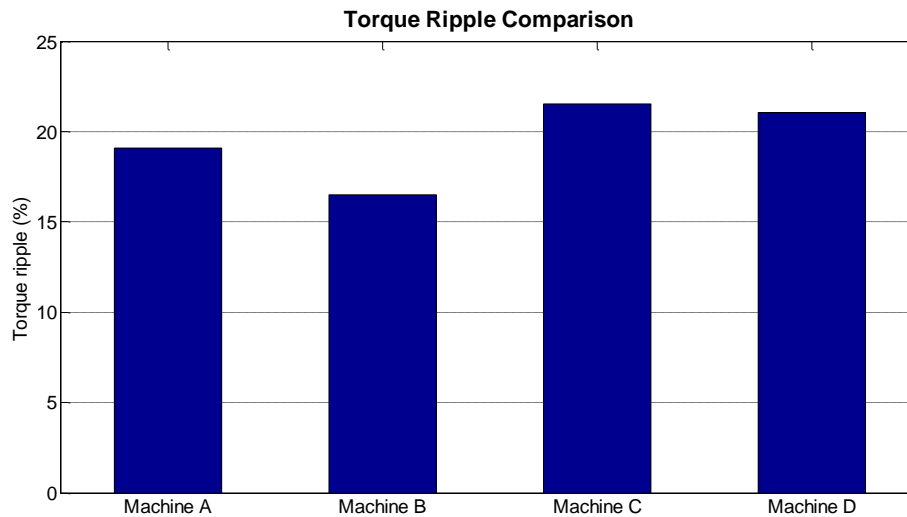
$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N} \quad (6.2)$$



Σχήμα 6.2. Διάγραμμα ροπής συναρτήσει της γωνιακής μετατόπισης του δρομέα για τις τέσσερις μηχανές.

Από το Σχήμα 6.2 παρατηρείται ότι η μηχανή Γ έχει μεγαλύτερη κυμάτωση ροπής στην έξοδο της, ενώ τη μικρότερη κυμάτωση ροπής έχει η μηχανή Β.

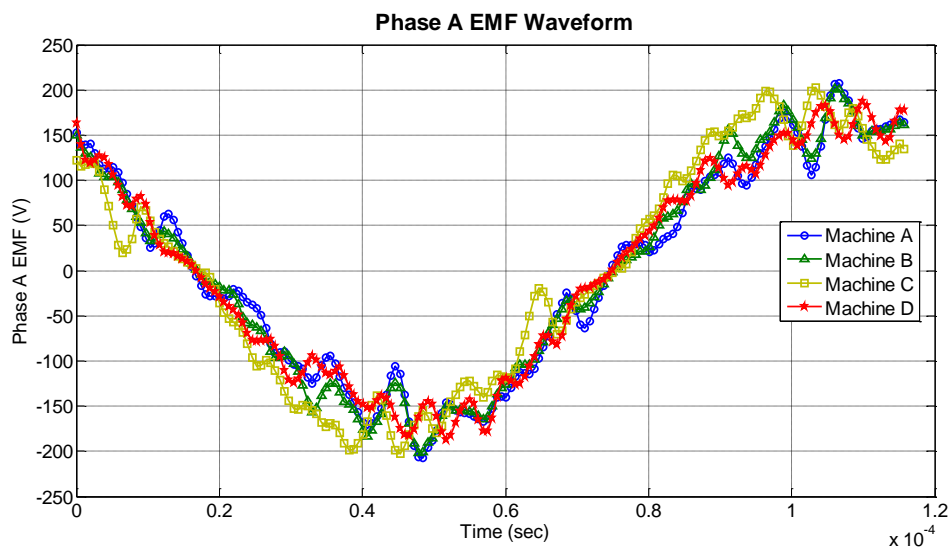
Οι παραπάνω παρατηρήσεις επιβεβαιώνονται και από το συγκριτικό διάγραμμα (Σχήμα 6.3) όπου παρουσιάζονται οι συντελεστές κυμάτωσης ροπής για τις τέσσερις μηχανές.



Σχήμα 6.3. Συντελεστές κυμάτωσης ροπής για τις τέσσερις μηχανές.

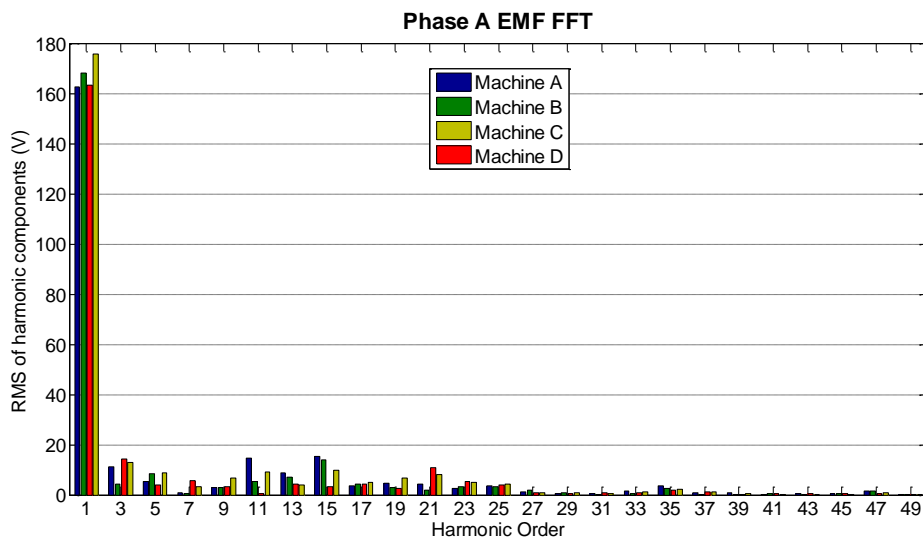
Με βάση τους συντελεστές κυμάτωσης ροπής η καλύτερη σχεδίαση είναι η μηχανή Β για την οποία ο συντελεστής κυμάτωσης ροπής είναι ($\cong 16,5\%$) αρκετά μικρότερος των υπολοίπων σχεδιάσεων.

6.1.3. Ημιτονικότητα ΗΕΔ



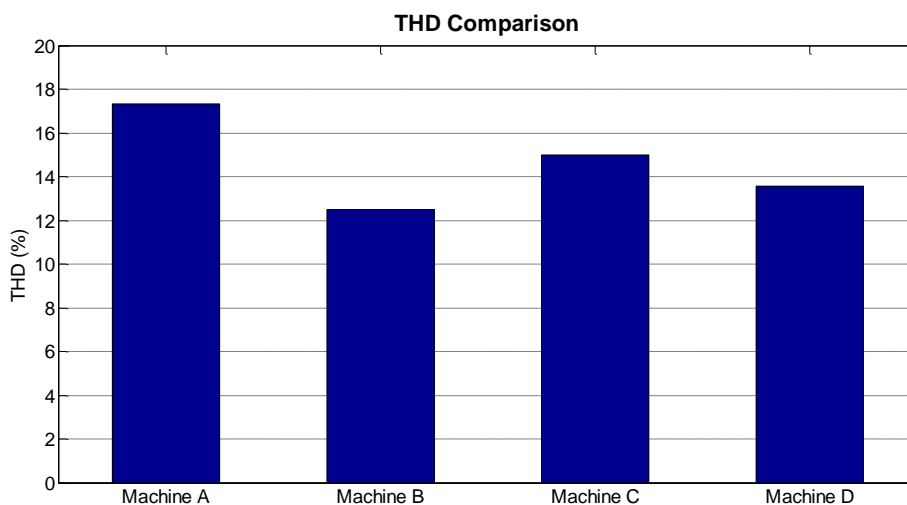
Σχήμα 6.4. Κυματομορφές ΗΕΔ των τεσσάρων μηχανών σε ονομαστικό φορτίο.

Αρκετά καλές θεωρούνται οι κυματομορφές ηλεκτρεγερτικής δύναμης και των τεσσάρων μηχανών.



Σχήμα 6.5. Φασματική ανάλυση ΗΕΔ στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας για τις τέσσερις μηχανές.

Από το παραπάνω σχήμα (Σχήμα 6.5) παρατηρείται ότι στην ονομαστική λειτουργία η μηχανή Α έχει ισχυρές αρμονικές 3^{ης}, 11^{ης}, 13^{ης} και 15^{ης} τάξης. Αντιθέτως, η μηχανή Β έχει ισχυρότερες τις 11^{ης} και 13^{ης} τάξης αρμονικές και οι υπόλοιπες αρμονικές είναι αρκετά πιο ασθενείς.



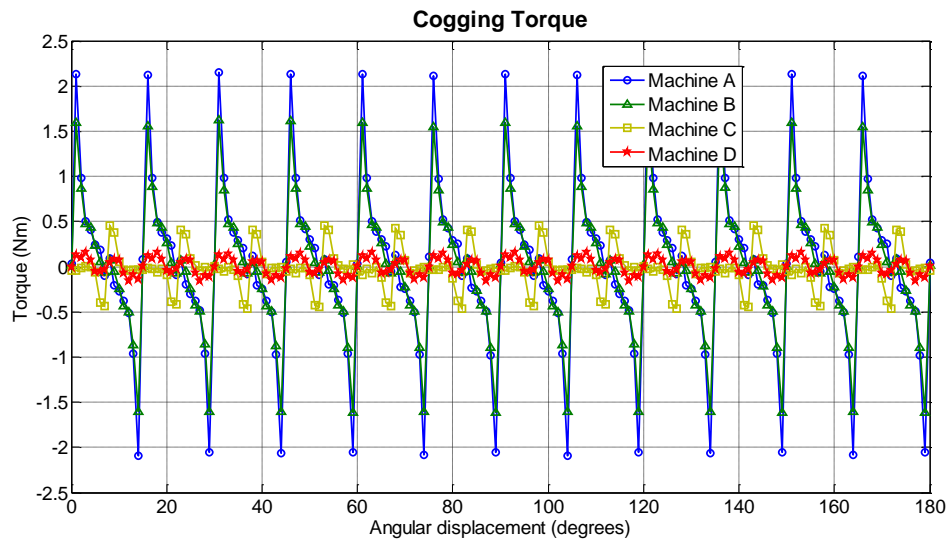
Σχήμα 6.6. Συγκριτικό διάγραμμα των συντελεστών THD για τις τέσσερις μηχανές.

Πίνακας 6.1. Συντελεστές THD για τις τέσσερις μηχανές.

	Μηχανή Α	Μηχανή Β	Μηχανή Γ	Μηχανή Δ
THD (%)	17,34	12,48	15,00	13,56

Συνεπώς, προκύπτει και επιβεβαιώνεται από τον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 6.1) ότι η επαγόμενη τάση της μηχανής Β είναι περισσότερο ημιτονοειδής.

6.1.4. Ροπή ευθυγράμμισης

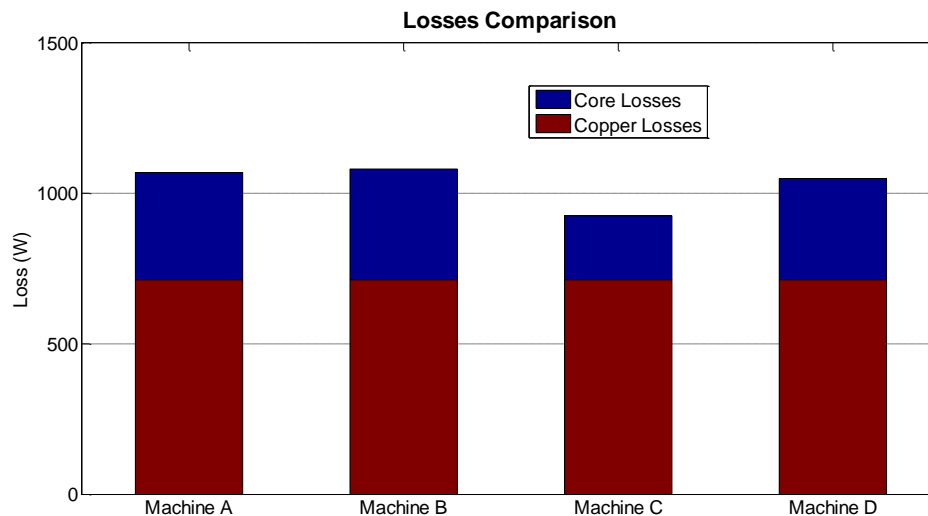


Σχήμα 6.7. Διάγραμμα ροπής ευθυγράμμισης συναρτήσει της γωνιακής θέσης του δρομέα για τις τέσσερις μηχανές.

Από το Σχήμα 6.7 είναι φανερή η εξαιρετικά μεγάλη διαφορά των μεγεθών της ροπής ευθυγράμμισης των μηχανών με μόνιμους μαγνήτες NdFeB από την μηχανή Δ η οποία χρησιμοποιεί φερρίτη ως μόνιμους μαγνήτες.

6.1.5. Απώλειες

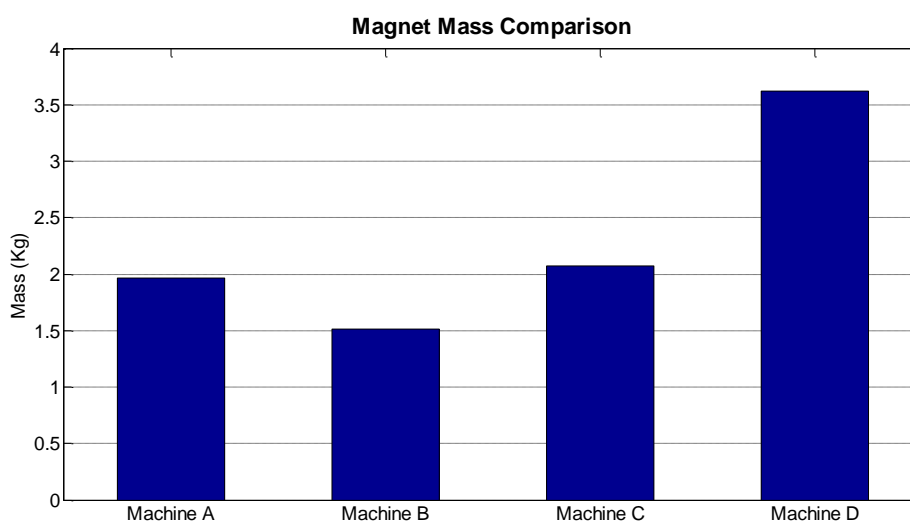
Στο Σχήμα 6.8 παρουσιάζονται οι απώλειες χαλκού και πυρήνα για τις τέσσερις μηχανές στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας όπως μετρήθηκαν κατά την ανάλυση τους.



Σχήμα 6.8. Απώλειες χαλκού και απώλειες πυρήνα για τις τέσσερις μηχανές.

Είναι προφανές ότι επειδή ο στάτης και τα τυλίγματα του είναι ίδια και για τις τέσσερις μηχανές, οι απώλειες χαλκού των τεσσάρων μηχανών είναι ίσες. Από την άλλη πλευρά, οι απώλειες πυρήνα διαφέρουν. Η μηχανή Γ έχει τις μικρότερες απώλειες πυρήνα και συνεπώς, θεωρητικά έχει και το μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

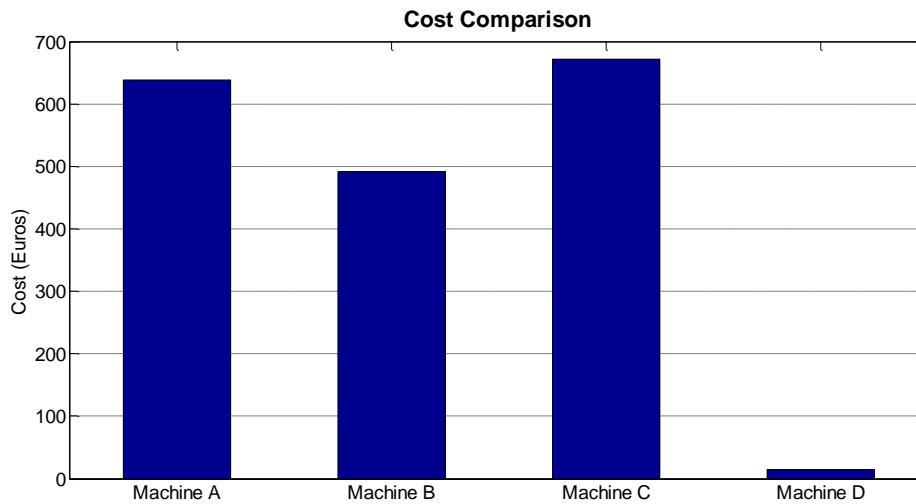
6.1.6. Ποσότητα μαγνήτη



Σχήμα 6.9. Η συνολική μάζα του μαγνήτη που τοποθετείται στον δρομέα της κάθε μηχανής.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι μηχανές Α, Β και Γ έχουν μαγνήτες οι οποίοι αποτελούνται από σπάνιες γαίες (NdFeB) και το κόστος τους είναι αρκετά υψηλό (200-500 \$/Kg). Η ποσότητα μαγνήτη NdFeB της μηχανής Α σε σύγκριση με μια αντίστοιχη σχεδίαση σύγχρονης μηχανής επιφανειακών μονίμων μαγνητών υπολογίζεται ότι είναι μικρότερη κατά 30%.

Επιπροσθέτως, επειδή η ποσότητα του μαγνήτη που απαιτείται από τη γεωμετρία του δρομέα της μηχανής Δ είναι πολύ μεγαλύτερη (400% της ποσότητας μαγνήτη της μηχανής Α), επιλέχθηκε ο μαγνήτης που χρησιμοποιείται για τη μηχανή Δ να είναι πλαστοφερρίτης (BaFeO). Ο πλαστοφερρίτης έχει κατώτερες μαγνητικές ιδιότητες από τους μαγνήτες σπάνιων γαιών αλλά το μεγάλο πλεονέκτημά του είναι το μικρό κόστος του (2-10 \$/Kg).

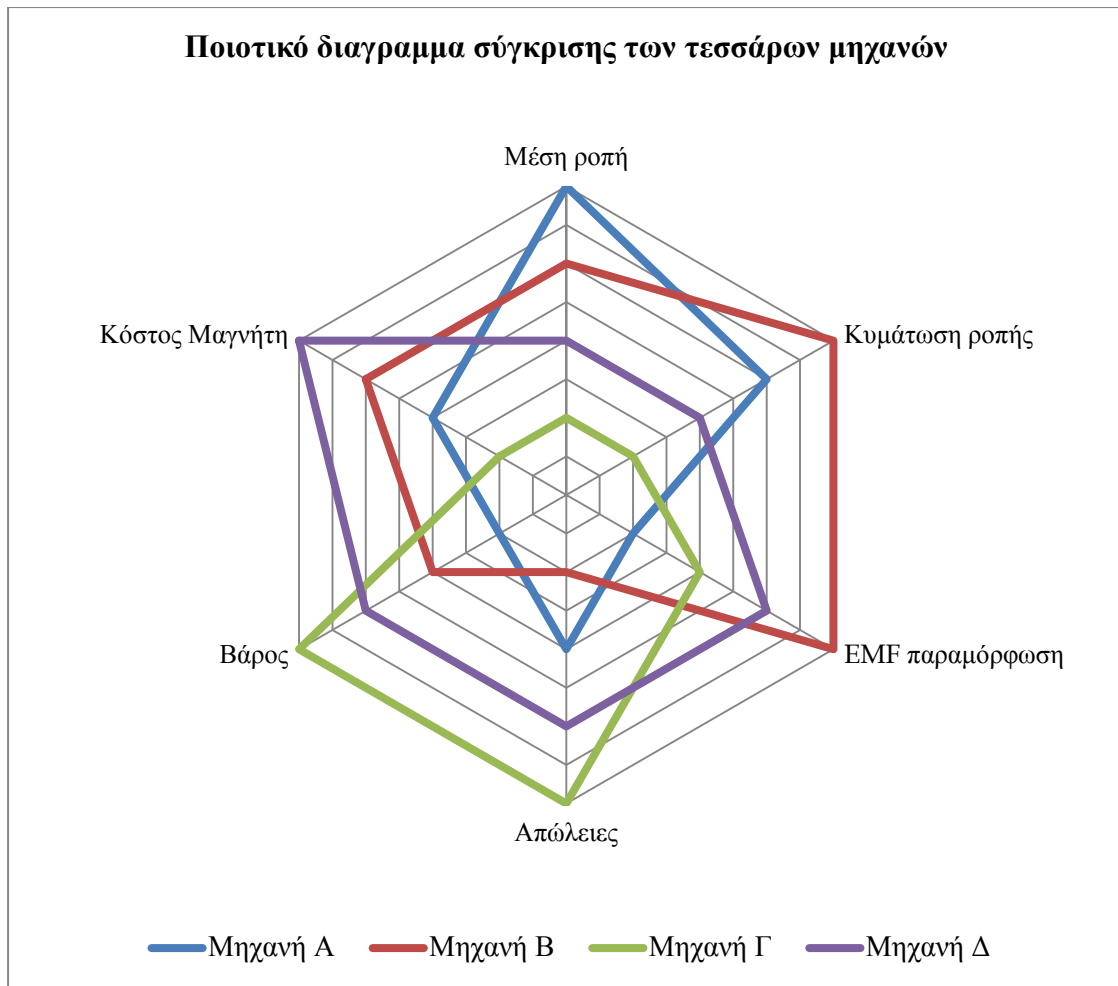


Σχήμα 6.10. Συγκριτικό διάγραμμα για τα κόστη των μαγνητών των τεσσάρων μηχανών.

Συνεπώς, το κόστος του μαγνήτη της μηχανής Δ εκτιμάται ότι μπορεί να είναι μειωμένο κατά 88% έως 97% συγκριτικά με το κόστος των μαγνητών που χρειάζονται οι μηχανές Α, Β ή Γ.

Πίνακας 6.2. Συγκεντρωτικός πίνακας σύγκρισης των τεσσάρων σχεδιάσεων.

Μηχανή	A	B	Γ	Δ
Μέση ροπή (Nm)	124,08	123,75	115,60	121,24
Κυμάτωση ροπής	19,08%	16,49%	21,55%	21,07%
EMF παραμόρφωση	17,34%	12,48%	15,00%	13,56%
Απώλειες πυρήνα (W)	356,8	367,8	213,3	335,0
Βάρος (Kg)	66,823	66,252	65,227	65,704
Είδος Μαγνήτη	NdFeB	NdFeB	NdFeB	Ferrite
Μάζα μαγνήτη (kg)	1,963	1,510	2,069	3,617
Κόστος Μαγνήτη (€)	638	491	672	14



Σχήμα 6.11. Ποιοτικό διαγραμμα αξιολόγησης των τεσσάρων σχεδιάσεων.

6.2. Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση και η σύγκριση τεσσάρων ηλεκτρικών σύγχρονων κινητήρων μαγνητικής αντίστασης με μειωμένη ποσότητα μονίμων μαγνητών και ισχύος 100 kW (134 hp) για εφαρμογή ηλεκτροκίνησης σε ηλεκτρικό όχημα. Αρχικά, σχεδιάστηκε ο στάτης ο οποίος είναι κοινός και για τους τέσσερις ηλεκτρικούς κινητήρες και επιλέχθηκε το τύλιγμα να είναι ακέραιο, απλής στρώσης και διανεμημένο ώστε η κατασκευή να είναι εύκολη και παράλληλα η αντι-HEΔ να είναι αρκετά ημιτονοειδής. Στη συνέχεια, σχεδιάστηκαν τέσσερις διαφορετικές γεωμετρικές δρομέα οι οποίες βελτιώθηκαν μέσω ενός επαναληπτικού αλγορίθμου στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Βασικό κριτήριο του αλγορίθμου βελτίωσης ήταν η μείωση της ποσότητας μαγνήτη και η βελτίωση της ροπής διατηρώντας την απόδοση της μηχανής υψηλά. Για το λόγο αυτόν, έγινε μελέτη απωλειών χαλκού και πυρήνα για όλες τις διαφορετικές γεωμετρικές διαμορφώσεις που προσομοιώθηκαν.

Τα κυριότερα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από την ανάλυση έχουν ως εξής:

- Τα βασικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού κινητήρα μπορούν να προσδιοριστούν ικανοποιητικά μέσω της προκαταρκτικής σχεδίασης θεωρώντας τυπικές τιμές ηλεκτρικής και μαγνητικής φόρτισης και διαστάσεων διακένου.
- Μέσω της παραμετροποιημένης ανάλυσης διαπιστώθηκε ότι οι παράμετροι με τη μεγαλύτερη επίδραση στην επίδοση της μηχανής είναι:
 - 1) Το πλήθος των φραγμάτων μαγνητικής ροής του δρομέα.
Με την αύξηση του πλήθους των φραγμάτων μαγνητικής ροής του δρομέα αυξάνεται η ροπή εξόδου της μηχανής. Η αύξηση της ροπής γίνεται σχεδόν αμελητέα για πλήθος φραγμάτων μαγνητικής ροής μεγαλύτερο από πέντε.
 - 2) Η θέση του πρώτου φράγματος μαγνητικής ροής.
Η επίδραση της θέσης του πρώτου φράγματος μαγνητικής ροής εστιάζεται κυρίως στο μέγεθος της κυμάτωσης ροπής και της αρμονικής παραμόρφωσης.
 - 3) Οι διαστάσεις των μαγνητών.
Όσος περισσότερος μαγνήτης τοποθετηθεί στη μηχανή, τόσο αυξάνεται η ροπή εξόδου και οι απώλειες της μηχανής.
 - 4) Το πλήθος των αυλάκων του στάτη.
Η επίδραση που έχει το πλήθος των αυλάκων του στάτη έρχεται σε συνδυασμό με το πλήθος των φραγμάτων μαγνητικής ροής και τη θέση του πρώτου φράγματος. Γενικός κανόνας δεν υπάρχει. Υπάρχουν, όμως, ορισμένοι συνδυασμοί για τους οποίους η κυμάτωση ροπής και οι απώλειες είναι μειωμένες.

Το πάχος των φραγμάτων μαγνητικής ροής του δρομέα επηρεάζει ελάχιστα έως καθόλου την επίδοση του σύγχρονου κινητήρα μαγνητικής αντίστασης με εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες.

- Η ροπή εξόδου του σύγχρονου κινητήρα μαγνητικής αντίστασης με εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες είναι ανάλογη της διαφοράς των αυτεπαγωγών ευθέως και καθέτου άξονα, όπως περιγράφηκε από την αναλυτική σχέση.
- Η ποσότητα μαγνήτη σπάνιας γαίας (NdFeB) που χρησιμοποιείται για τη κατασκευή ενός σύγχρονου κινητήρα μαγνητικής αντίστασης με εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες είναι μειωμένο σε σύγκριση με έναν αντίστοιχης ισχύος σύγχρονο κινητήρα επιφανειακών μονίμων μαγνητών. Η μείωση του αντίστοιχου κόστους ξεπερνά το 30%.

Η σχεδίαση βασίστηκε στην ιδέα αντικατάστασης του σύγχρονου κινητήρα επιφανειακών μονίμων μαγνητών ο οποίος αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του έργου συνεργασίας «Ανάπτυξη και Δοκιμαστική Λειτουργία Καινοτόμου Υβριδικού Οχήματος Μεταφοράς Προσωπικού Μηδενικής Εκπομπής Ρύπων» από έναν ανταγωνιστικό σύγχρονο κινητήρα μαγνητικής αντίστασης υποβοηθούμενος από μόνιμους μαγνήτες, ίδιων προδιαγραφών αλλά χαμηλότερου κόστους. Για το σκοπό αυτόν ήταν απαραίτητο να κρατηθεί η εξωτερική διάμετρος του κινητήρα ίδια (260 mm) και να αυξηθεί το μήκος του ενεργού μέρους του κινητήρα (220 mm αντί 150 mm). Από την ανάλυση επιβεβαιώθηκε ότι είναι εφικτό να επιτευχθεί η ίδια επίδοση και το κόστος των μονίμων μαγνητών να είναι αρκετά μειωμένο.

- Το κόστος του μαγνήτη μπορεί να είναι μηδαμινό χρησιμοποιώντας μαγνήτες φερρίτη, όπως επιχειρήθηκε στην τέταρτη σχεδίαση.

Όπως εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί από το ποιοτικό αραχνοειδές διάγραμμα (Σχήμα 6.11), οι μηχανές Β και Δ υπερτερούν των μηχανών Α και Γ. Η μηχανή Β διαθέτει περισσότερο διαχειρίσιμα λειτουργικά χαρακτηριστικά, ενώ η μηχανή Δ έχει σχεδόν μηδενικό κόστος μόνιμων μαγνητών.

6.3. Σημεία προαγωγής της επιστήμης

Στην παρούσα εργασία περιλαμβάνονται τα παρακάτω σημεία καινοτόμου συνεισφοράς:

- Αναπτύχθηκε παραμετροποιημένη ανάλυση βελτιστοποίησης γεωμετρίας σύγχρονων μηχανών μαγνητικής αντίστασης με εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες περιλαμβάνοντας τη δυνατότητα εκτίμησης των απωλειών και της επίδοσης.
- Διερευνήθηκαν εναλλακτικές γεωμετρίες κατασκευής του δρομέα μιας σύγχρονης μηχανής μαγνητικής αντίστασης με εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες.
- Πραγματοποιήθηκε συγκριτική μελέτη της γενικότερης λειτουργικής συμπεριφοράς τεσσάρων εναλλακτικών σχεδιάσεων σύγχρονης μηχανής μαγνητικής αντίστασης με εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες.

6.4. Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αναδείχτηκαν τα παρακάτω θέματα τα οποία είναι σκόπιμο να διερευνηθούν μελλοντικά:

- Βελτιστοποίηση του σύγχρονου κινητήρα μαγνητικής αντίστασης με κριτήρια τη μεγιστοποίηση της διαφοράς των αυτεπαγωγών ευθέως και καθέτου άξονα και/ή την ελαχιστοποίηση της κυμάτωσης ροπής.
- Ανάλυση ευαισθησίας ως προς το συνδυασμό του πλήθους των αυλάκων στάτη και τη θέση του πρώτου φράγματος μαγνητικής αντίστασης του δρομέα.
- Εκτενής μελέτη θερμικής συμπεριφοράς με σκοπό τη μείωση του μεγέθους ή τη δυνατότητα υπερφόρτισης για μικρά χρονικά διαστήματα.
- Κατασκευή και πειραματική επιβεβαίωση των λειτουργικών χαρακτηριστικών του σύγχρονου κινητήρα μαγνητικής αντίστασης με εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες.

Παράρτημα Α

Αναλυτικά δεδομένα μηχανών

		Μηχανή Α	Μηχανή Β	Μηχανή Γ	Μηχανή Δ
ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΜΗΧΑΝΗΣ					
Ονομαστική ροπή	Nm	125	125	125	125
Ονομαστική ταχύτητα	rpm	4500	4500	4500	4500
Μέγιστη ταχύτητα	rpm	8500	8500	8500	8500
Μέγιστο φασικό ρεύμα	A	634	634	634	634
Μέγιστη πυκνότητα ρεύματος	A/mm ²	8	8	8	8
Ονομαστική φασική τάση	V	150	150	150	150
ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ					
Πάχος διακένου	mm	0,8	0,8	0,8	0,8
Εσωτερική ακτίνα δρομέα	mm	20	20	20	20
Εξωτερική ακτίνα δρομέα	mm	69,6	69,6	69,6	69,6
Εσωτερική ακτίνα στάτη	mm	70,4	70,4	70,4	70,4
Εξωτερική ακτίνα στάτη	mm	130	130	130	130
Μήκος δοντιού	mm	40	40	40	40
Πλάτος δοντιού	mm	12,5	12,5	12,5	12,5
Πλάτος πέλδλου	mm	16,2	16,2	16,2	16,2
Μήκος σώματος στάτη	mm	19,6	19,6	19,6	19,6
Πάχος ραβδώσεων δρομέα	mm	1	1	1	1
Πάχος 1ου μαγνήτη	mm	-	-	3,75	3
Πάχος 2ου μαγνήτη	mm	4	4	5,25	7,5
Πάχος 3ου μαγνήτη	mm	4	4	6,5	10
Πάχος 4ου μαγνήτη	mm	4	4	-	-
Πλάτος 1ου μαγνήτη	mm	-	-	20,5	-
Πλάτος 2ου μαγνήτη	mm	17,5	7,5	20,5	-
Πλάτος 3ου μαγνήτη	mm	28	12	20,5	-
Πλάτος 4ου μαγνήτη	mm	40,5	17	-	-
Λόγος μόνωσης K _w		0,58	0,58	1	1,35
Λόγος τόξων K _{fb}		0,154	0,154	0,444	0,571
Μήκος ενεργού μέρους	mm	220	220	220	220

		Μηχανή Α	Μηχανή Β	Μηχανή Γ	Μηχανή Δ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ					
Ωμική αντίσταση ανά φάση	mΩ	2,9	2,9	2,9	2,9
d-άξονα αυτεπαγωγή	mH	0,705	0,705	0,703	0,704
q-άξονα αυτεπαγωγή	mH	0,319	0,319	0,255	0,256
ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΑΠΩΛΕΙΩΝ					
Απώλειες χαλκού στην ονομαστική λειτουργία	kW	711,9	711,9	711,9	711,9
Απώλειες σιδήρου στην ονομαστική λειτουργία	kW	356,8	367,8	213,3	335
Απόδοση στην ονομαστική λειτουργία	-	98,2	98,2	98,3	98,2
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ ΣΤΑΤΗ					
Τύπος σύνδεσμολογίας	-	Y	Y	Y	Y
Αριθμός πόλων	-	4	4	4	4
Αριθμός αυλάκων ανά πόλο και φάση	-	2	2	2	2
Ελίγματα ανά αύλακα	-	3	3	3	3
Συντελεστής τυλίγματος	-	0,966	0,966	0,966	0,966
Συντελεστής πληρότητας	-	0,5	0,5	0,5	0,5
ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΑΓΝΗΤΗ					
Σχετική διαπερατότητα	-	1,05	1,05	1,05	1,05
Πυκνότητα μάζας	kg/m ³	7400	7400	7400	3400
ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΛΑΜΑΡΙΝΑΣ					
Σταθερά πυκνότητας απωλειών δινορρευμάτων	Ws ² /kgT ² rad ²	4,47·10 ⁻⁶	4,47·10 ⁻⁶	4,47·10 ⁻⁶	4,47·10 ⁻⁶
Σταθερά Steinmetz	-	2	2	2	2
Σταθερά πυκνότητας απωλειών υστέρησης	Ws ² /kgT ² rad ²	1,387·10 ⁻³	1,387·10 ⁻³	1,387·10 ⁻³	1,387·10 ⁻³
Πυκνότητα μάζας	kg/m ³	7600	7600	7600	7600
ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΧΑΛΚΟΥ					
Ειδική αντίσταση χαλκού στη θερμοκρασία λειτουργίας	nΩm	17,2	17,2	17,2	17,2
Πυκνότητα μάζας	kg/m ³	8920	8920	8920	8920

Παράρτημα Β

Προσδιορισμός βασικών δυνάμεων

Οι βασικές δυνάμεις που ασκούνται σε ένα όχημα περιγράφονται στην εξίσωση (B.1) εφαρμόζοντας απλώς το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα.

$$m_v a = F_{te} - F_{rr} - F_{ad} - F_{hc} \quad (\text{B. 1})$$

όπου a είναι η ευθύγραμμη επιτάχυνση του οχήματος, F_{te} είναι η δύναμη οδήγησης, F_{rr} είναι η αντίσταση κύλισης, F_{ad} είναι η αντίσταση του αέρα, F_{hc} είναι η δύναμη του βάρους και m_v είναι η συνολική μάζα του οχήματος.

Η δύναμη της αντίστασης κύλισης για ολόκληρο το όχημα δίνεται από τη σχέση:

$$F_{rr} = c_{rr} m_v g \quad (\text{B. 2})$$

όπου c_{rr} είναι ο συντελεστής αντίστασης κύλισης και g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Ο συντελεστής αντίστασης κύλισης c_{rr} επηρεάζεται κυρίως από τον τύπο και την πίεση του ελαστικού. Η αντίσταση κύλισης μειώνεται δραστικά με την αύξηση της πίεσης των ελαστικών. Ωστόσο, η ποιότητα κύλισης του οχήματος μειώνεται σημαντικά λόγω της αύξησης των κραδασμών. Τυπικές τιμές του συντελεστή αντίστασης κύλισης c_{rr} είναι μεταξύ 0,015 για συμβατικά ελαστικά και 0,005 για ελαστικά ειδικού τύπου κατασκευασμένα για ηλεκτρικά οχήματα.

Η αεροδυναμική αντίσταση μπορεί να εκφραστεί ως:

$$F_{ad} = \frac{1}{2} c_d A_f \rho_{air} v^2 \quad (\text{B. 3})$$

όπου c_d είναι ο συντελεστής οπισθέλκουσας δύναμης, A_f είναι η μετωπική επιφάνεια, ρ_{air} είναι η πυκνότητα του αέρα και v είναι η ταχύτητα του οχήματος.

Ο συντελεστής c_d μπορεί να μειωθεί με τον κατάλληλο σχεδιασμό του αμαξώματος. Τυπική τιμή του συντελεστή c_d για ένα μέσο οικογενειακό αυτοκίνητο είναι 0,3.

Μερικά ηλεκτρικά οχήματα επιτυγχάνουν τιμές έως και 0,19. Η δυνατότητα μείωσης του συντελεστή c_d είναι ακόμα μεγαλύτερη στα ηλεκτρικά οχήματα καθώς υπάρχει μεγάλη ευελιξία ως προς τη χωροθέτηση των διαφόρων υποσυστημάτων και απαιτείται λιγότερη ψύξη, δηλαδή μειωμένη ροή αέρα κάτω από το αμάξωμα σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα. Ωστόσο, σε οχήματα όπως οι μοτοσυκλέτες και τα λεωφορεία είναι αναπόφευκτη η αύξηση του συντελεστή c_d (τυπική τιμή είναι περίπου 0,7).

Η πυκνότητα του αέρα ρ_{air} μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, το υψόμετρο και την υγρασία. Στις περισσότερες περιπτώσεις λογική θεώρηση είναι τιμές γύρω στο $1,25 \text{ kg/m}^3$.

Η δύναμη του βάρους πρακτικά ισούται με τη συνιστώσα του βάρους του οχήματος που έχει διεύθυνση παράλληλη στη νοητή ευθεία του δρόμου στον οποίο κινείται το όχημα. Υπολογίζεται από τη σχέση:

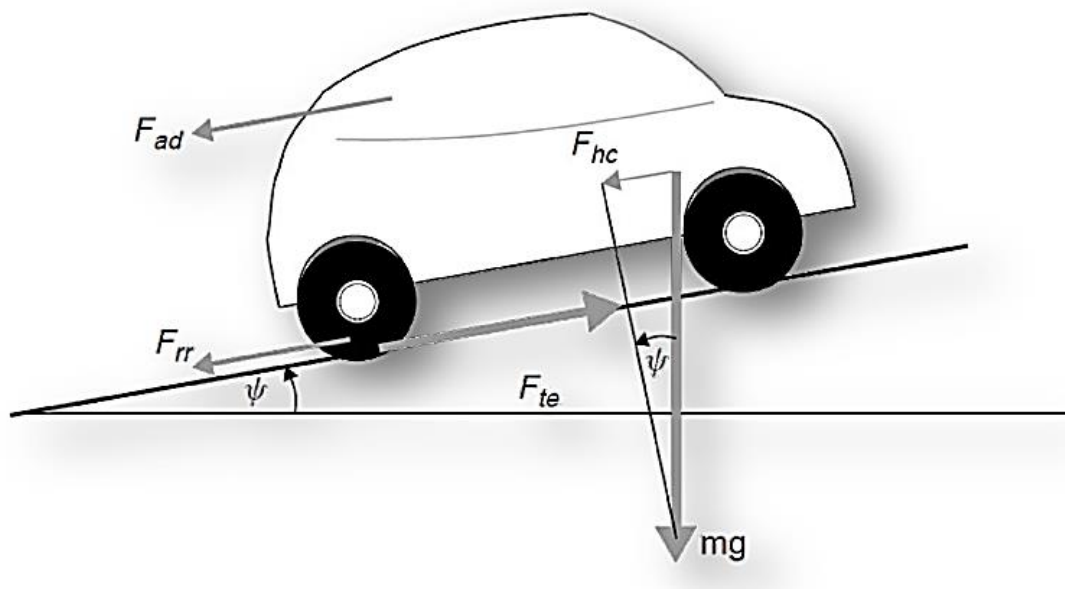
$$F_{hc} = m_v g \sin \psi \quad (\text{B. 4})$$

όπου ψ είναι η γωνία του κεκλιμένου δρόμου.

Η ροπή που απαιτείται για τον κινητήρα μπορεί να εκφραστεί από την εξίσωση:

$$T_m = \frac{1}{t} R \left[m_v a + \frac{1}{2} c_d A_f \rho_{air} v^2 + c_{rr} m_v g + m_v g \sin \psi \right] \quad (\text{B. 5})$$

όπου t είναι η σχέση μετάδοσης και R είναι η ακτίνα του τροχού.



Σχήμα Β.1. Αναπαράσταση δυνάμεων οι οποίες επενεργούν κατά την πρόωση του οχήματος. [3]

Βιβλιογραφία

- [1] Μίνως Μπενιακάρ, «Συγκριτική Μελέτη Τεχνικών Ελέγχου Σύγχρονων Κινητήρων Μαγνητικής Αντίστασης», Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2008
- [2] Κωνσταντίνος Ι. Λάσκαρης, «Σχεδιασμός και Κατασκευή Κινητήρων Μονίμων Μαγνητών για Ηλεκτρικά Οχήματα», Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Δεκέμβριος 2011
- [3] Αντώνιος Κλαδάς, Παναγιώτης Ζάννης, Παναγιώτης Κακοσίμος, Θεμιστοκλής Κεφάλας, Κωνσταντίνος Λάσκαρης, Χαράλαμπος Πάτσιος, Κωνσταντίνος Παύλου, Εμμανουήλ Πολιούδης, Αντώνιος Χανιώτης, «Ερευνητικές Αναφορές για την Πρόοδο της Βιομηχανικής Έρευνας στα Υποσυστήματα της Ηλεκτροκίνησης: Ηλεκτροκινητήρας και Μετατροπέας Οδήγησης», Εργο Συνεργασία 09ΣΥΝ-51-988, Αθήνα, Μάρτιος 2012
- [4] Peyman Niazi, «Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor Design and Performance Improvement», Dissertation, Texas, December 2005
- [5] Reza Rajabi Moghaddam, «Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design», Master Thesis, Stockholm, April 2007
- [6] Florence Libert, «Design, Optimization and Comparison of Permanent Magnet Motors for a Low-Speed Direct-Driven Mixer», Licentiate Thesis, Stockholm, November 2004
- [7] Kashif Saeed Khan, «Design of a Permanent-Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine for a Plug-In Hybrid Electric Vehicle», Licentiate Thesis, Stockholm, December 2011
- [8] Αντώνιος Κλαδάς, «Υποδειγματική Προκαταρκτική Σχεδίαση Γεννήτριας Μονίμων Μαγνητών Ισχύος 25 kW», Σημειώσεις Μαθήματος, Αθήνα, Οκτώβριος 2011
- [9] Peyman Niazi, Hamid A. Toliyat, Dal-Ho Cheong and Jung-Chul Kim, «A Low-Cost and Efficient Permanent-Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor Drive», IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.43, No.2, March/April 2007
- [10] Gianmario Pelligriano, Paolo Guglielmi, Alfredo Vagati and Franco Villata, «Core Losses and Torque Ripple in IPM Machines: Dedicated Modeling and Design Tradeoff», IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.46, No.6, November/December 2010

- [11] Massimo Barcaro, Nicola Bianchi and Freddy Magnussen, «Permanent-Magnet Optimization in Permanent-Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor for a Wide Constant-Power Speed Range», IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.59, No.6, June 2012
- [12] Eric Armando, Michele Pastorelli, Gianmario Pellegrino and Alfredo Vagati, «Performance of IPM-PMASR Motors with Ferrite Injection for Home Appliance Washing Machine», Proceedings of IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, October 2008
- [13] Alfredo Vagati, Mario Chiampi and Maurizio Repetto, «Design Refinement of Synchronous Reluctance Motor Through Finite-Element Analysis», IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.36, No.4, July/August 2000
- [14] Hiroshi Murakami, Yukio Honda, Yuichiro Sadanaga, Yasufumi Ikkai, Shigeo Morimoto and Yoji Takeda, «Optimum Design of Highly Efficient Magnet Assisted Reluctance Motor», Proceedings of Industry Applications Conference, Thirty-Sixth IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2001 IEEE, Vol.4, September/October 2001
- [15] Ion Boldea, Lucian Tutelea and Cristian Ilie Pitic, «PM-Assisted Reluctance Synchronous Motor/Generator (PM-RSM) for Mild Hybrid Vehicles: Electromagnetic Design», IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.40, No.2, March/April 2004
- [16] Gianmario Pellegrino, Alfredo Vagati, Paolo Guglielmi and Barbara Boazzo, «Performance Comparison between Surface-Mounted and Interior PM Motor Drives for Electric Vehicle Application», IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.59, No.2, February 2012
- [17] Gianmario Pellegrino, Alfredo Vagati, Barbara Boazzo and Paolo Guglielmi, «Comparison of Induction and PM Synchronous Motor Drives for EV Application including Design Examples», IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.48, No.6, November/December 2012
- [18] Wen Ouyang, Damir Zarko and T. A. Lipo, «Permanent Magnet Machine Design Practice and Optimization», Proceedings of Industry Applications Conference, Forty-First IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2006 IEEE, Vol.4, October 2006
- [19] Piergiorgio Alotto, Massimo Barcaro, Nicola Bianchi and Massimo Guarnieri, «Optimization of Interior PM Motors with Machaon Rotor Flux Barriers», IEEE Transactions on Magnetics, Vol.47, No.5, May 2011
- [20] Daniel Eggers, Simon Steentjes, and Kay Hameyer, « Advanced Iron-Loss Estimation for Nonlinear Material Behavior», IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 48, No. 11, November 2012

- [21] Άρης-Διονύσιος Πιτταράς, «Σχεδιασμός και μελέτη ηλεκτρογεννήτριας συνδεδεμένης στο αξονικό σύστημα πλοίου», Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Νοέμβριος 2012
- [22] Neodymium (NdFeB) 35SH demagnetization data, https://www.hkcm.de/HKCM_demag_data.php?l=en&gr=35SH
- [23] Electric Motor Winding Calculator, <https://www.emotor.com/edit/windings/>
- [24] Copper Properties, <http://www.cirris.com/testing/temperature/copper.html>
- [25] Core Loss Calculation, David Meeker, <http://www.femm.info/wiki/CoreLossCalculation>
- [26] Neodymium Magnet, Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Neodymium_magnet
- [27] Ferrite Magnet, Wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Ferrite_\(magnet\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Ferrite_(magnet))
- [28] Detroit Electric, Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Detroit_Electric
- [29] EV1, Wikipedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/EV1>
- [30] Audi R8 e-tron at the Frankfurt Motor Show IAA 2011, http://www.autoviva.com/audi_r8_e_tron-photos/version/44034
- [31] Nissan Leaf, <http://www.caradvice.com.au/110596/nissan-leaf-review/>
- [32] Μπαταρίες Ψευδαργύρου-Αέρος, <http://www.treehugger.com/clean-technology/very-promising-zinc-air-battery-could-hold-300-more-energy-than-lithium-ion.html>
- [33] Buick LaCrosse eAssist 2012, <http://www.thetruthaboutcars.com/2012/02/review-2012-buick-lacrosse-eassist/>
- [34] Chevy Spark EV's AC Permanent-Magnet Motor, <http://collisionconcierge.com/auto-body-collision-repair-shop/we-build-the-chevy-spark-ev%E2%80%99s-ac-permanent-magnet-motor/>
- [35] The Hysteresis Loop and Magnetic Properties, <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Physics/HysteresisLoop.htm>
- [36] Ayman M. EL-Refaie, «Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges», IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.57, No.1, January 2010
- [37] Difference between AC and DC Motors, <http://www.precision-elec.com/difference-between-ac-and-dc-motors/>

- [38] Sergio Romero Pérez, «Analysis of a light permanent magnet in-wheel motor for an electric vehicle with autonomous corner modules», Master of Science Thesis, Stockholm, February 2011
- [39] Grades of Ferrite, http://www.ferrite-info.com/ferrite_grades.aspx
- [40] Finite Element Method Magnetics, User's Manual, <http://www.femm.info/Archives/doc/manual.pdf>