



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ηλεκτρομαγνητική Σχεδίαση και Βελτιστοποίηση
Μηχανής Μόνιμων Μαγνητών για Εφαρμογή σε
Ηλεκτρικό Όχημα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Αντώνιου Χ. Πλάτση

Επιβλέπων: Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2025



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

Ηλεκτρομαγνητική Σχεδίαση και Βελτιστοποίηση
Μηχανής Μόνιμων Μαγνητών για Εφαρμογή σε
Ηλεκτρικό Όχημα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Αντωνίου Χ. Πλάτση

Επιβλέπων: Αντώνιος Γ. Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 7^η Ιουλίου 2025 .

.....
Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

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

.....
Αντώνιος Αντωνόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2025

.....

(Αντώνιος Χ. Πλάτσης)

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

© (2025) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. All rights reserved. Πλάτσης Αντώνιος

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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

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

Αφιερώνεται στους γονείς μου και στον παππού μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται την βελτιστοποίηση ενός σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών (PMSM), με στόχο την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, τη μείωση του κόστους κατασκευής και τον περιορισμό της απομαγνήτισης των μαγνητών σε περιπτώσεις σε περιπτώσεις σφάλματος. Το προτεινόμενο μοντέλο αξιοποιεί την τεχνολογία τυλιγμάτων τύπου φουρκέτας (hairpin windings) αντί των κλασικών διανεμημένων τυλιγμάτων, προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη ασφάλεια και ευκολία κατασκευής.

Αρχικά παρουσιάζεται μια σύντομη επισκόπηση των υφιστάμενων τεχνολογιών τυλιγμάτων και δρομέα, καθώς και τα κριτήρια επιλογής των δύο υποψήφιων τοπολογιών ρότορα: Μονού- V (Single-V) και διπλού V (Double-V). Η επιλογή βασίζεται στη μεταξύ τους σύγκριση ως προς τη ροπή, τις απώλειες, την ευστάθεια σε φαινόμενα απομαγνήτισης και το κόστος.

Η μεθοδολογία περιλαμβάνει την ανάπτυξη παραμετρικού μοντέλου σε MATLAB για τη γεωμετρική διαμόρφωση και τον υπολογισμό ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών, σε συνδυασμό με αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων μέσω FEMM. Πραγματοποιείται χαρτογράφηση ροπής, ροής και απωλειών, καθώς και υπολογισμός σημείων λειτουργίας μέγιστης απόδοσης. Επιπλέον, εφαρμόζεται μοντέλο εκθετικής απομαγνήτισης, βασισμένο σε δεδομένα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis - FEA), με στόχο την ποσοτικοποίηση του κινδύνου απομαγνήτισης υπό διαφορετικές θερμικές και ηλεκτρικές συνθήκες.

Ακολουθεί αξιολόγηση των δύο γεωμετριών ως προς την απόδοση, το ποσοστό απομαγνήτισης και τη συνολική συμπεριφορά τους σε λειτουργία σε όχημα. Για την αξιολόγηση αυτή γίνεται ανάλυση ευαισθησίας σε βασικά χαρακτηριστικά της γεωμετρίας της εκάστοτε γεωμετρίας τόσο στον στάτη όσο και στον δρομέα. Ο τελικός κινητήρας που επιλέγεται πληροί τα απαιτούμενα κριτήρια απόδοσης, ασφάλειας και βιομηχανικής εφαρμότητας.

Η ανάλυση πραγματοποιείται αποκλειστικά μέσω εργαλείων MATLAB και FEMM.

Λέξεις-κλειδιά: Ηλεκτρικό όχημα, κινητήρας μονίμων μαγνητών, τυλίγματα τύπου φουρκέτας hairpin windings, απομαγνήτιση, ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, χαρτογράφηση απόδοσης, ρεύμα βραχυκυκλώματος, παραμετρική ανάλυση.

ABSTRACT

This thesis focuses on the redesign of a Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), aiming to improve energy efficiency, reduce manufacturing costs, and limit demagnetization of magnets under short-circuit currents. The proposed design leverages hairpin winding technology instead of traditional distributed windings, in order to enhance manufacturing ease and safety.

The work begins with a brief overview of existing winding and rotor technologies, followed by the selection criteria for two rotor topologies: single-V and double-V. The decision is based on their comparative performance in terms of torque, losses, demagnetization robustness, and cost.

The methodology involves the development of a parametric model in MATLAB to define the geometry and compute electromagnetic quantities, coupled with finite element analysis (FEA) using FEMM. Torque, flux, and loss maps are generated, along with the identification of maximum efficiency operating points. Furthermore, an exponential demagnetization model is applied—based on FEA data to quantify the risk of demagnetization under varying thermal and electrical conditions.

Next, the two candidate geometries are evaluated in terms of efficiency, demagnetization susceptibility, and their overall behavior during vehicle operation. This evaluation includes a sensitivity analysis on key geometric parameters of both the stator and rotor. The final motor design satisfies the required criteria for performance, safety, and industrial feasibility. All analysis is conducted exclusively using MATLAB and FEMM tools.

Keywords: Electric vehicle, permanent magnet motor, hairpin windings, demagnetization, finite element analysis, performance mapping, short-circuit current, parametric analysis

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί το επιστέγασμα μιας μακράς και απαιτητικής πορείας, γεμάτης προκλήσεις, αμφιβολίες, αλλά και βαθιάς προσωπικής εξέλιξης. Κατά τη διάρκεια της, δεν ήμουν ποτέ πραγματικά μόνος αφού είχα μαζί μου ανθρώπους που οφείλω περισσότερα απ' όσα μπορούν να αποτυπωθούν σε μια σελίδα.

Θα ήθελα αρχικά να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Αντώνιο Κλαδά, για την εμπιστοσύνη, την καθοδήγηση και την υπομονή του τόσο στη διάρκεια συγγραφής της διπλωματικής μου αλλά και κατά την διάρκεια των προπτυχιακών μαθημάτων.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες αξίζουν και στους φίλους μου για τις ατελείωτες συζητήσεις, τη στήριξη, την ενθάρρυνση και για όλες εκείνες τις στιγμές που μου υπενθύμιζαν ότι η ζωή δεν είναι μόνο διάβασμα και προσομοιώσεις. Χωρίς το χιούμορ τους, την κατανόηση και την παρουσία τους, το ταξίδι αυτό θα ήταν σίγουρα πολύ πιο μοναχικό.

Τέλος και κυρίως νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένεια μου. Για την αδιάκοπη στήριξή τους, την αγάπη τους, και την πίστη τους σε μένα, ακόμη και όταν εγώ ο ίδιος την έχανα. Ό,τι είμαι σήμερα, το οφείλω σε αυτούς. Χωρίς τη δύναμη και τη σταθερότητά τους στο πλάι μου, τίποτα απ' όλα αυτά δεν θα είχε υπάρξει.

Σε όλους εσάς που σταθήκατε δίπλα μου με τον έναν ή τον άλλο τρόπο, σας ευχαριστώ από καρδιάς.

Αντώνιος Πλάτσης
Ιούνιος 2025

Πίνακας Περιεχομένων

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
1.1	ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	14
1.2	ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	15
2	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	16
2.1	ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ	16
2.2	ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ	18
2.2.1	Μηχανές Μαγνητικής Αντίστασης	18
2.2.2	Μηχανές Συνεχούς ρεύματος	19
2.2.3	Κινητήρες Επαγωγής (AC):	20
2.2.4	Σύγχρονοι Κινητήρες Μονίμων Μαγνητών PMSM	21
2.3	ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ ΣΤΑΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ	24
2.3.1	Κατηγοριοποίηση με βάση τη μορφή των αγωγών	24
2.4	ΤΥΛΙΓΜΑ ΤΥΠΟΥ ΦΟΥΡΚΕΤΑΣ (HAIRPIN WINDING)	27
2.4.1	Διαδικασία Παραγωγής	28
2.4.2	Κανόνες Σχεδίασης Τυλιγμάτων Τύπου Φουρκέτας	29
2.5	ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	31
2.5.1	Απομαγνήτιση Σκληρών Μαγνητικών Υλικών	34
2.6	ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ - ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ dq ΣΥΓΧΡΟ- ΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ	35
2.6.1	Ισοδύναμο Κύκλωμα Σύγχρονης Μηχανής	36
2.6.2	Μετασχηματισμός dq Σύγχρονης Μηχανής	37
2.6.3	Ισοδύναμο Κύκλωμα Στο Πλαίσιο d-q	38
3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕ- ΛΟΠΟΙΗΣΗ	40
3.1	ΜΑΓΝΗΤΟΣΤΑΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	41
3.1.1	Ανάλυση Μαγνητοστατικής με Πεπερασμένα Στοιχεία	42
3.1.2	Οριακές συνθήκες - Συμμετρία	42
3.2	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ	45
3.2.1	Παραμετροποίηση Στάτη και Δρομέα	45

3.3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙ- ΧΕΙΩΝ	48
3.3.1	Ευθυγράμμιση Μαγνητικού Πεδίου Στάτη, Δρομέα	48
3.3.2	Σύγχρονη Περιστροφή	50
3.3.3	Υπολογισμός Απομαγνήτισης	52
3.3.4	Υπολογισμός μάζας διατομής	53
3.3.5	Ορισμός Τυλίγματος Της Μηχανής - Νόμοι Κλιμάκωσης Μη- χανών	54
3.3.6	Νόμοι Κλιμάκωσης Ηλεκτρικών Μηχανών	56
3.3.7	Υπολογισμός Κόστους Μηχανής	57
3.3.8	Υπολογισμός Απωλειών	58
3.3.9	Θερμική Φόρτιση	62
3.3.10	Εξαγωγή Καμπύλης Ροπής-Ταχύτητας	62
3.4	ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ . .	65
3.4.1	Υπολογισμός Ρεύματος Βραχυκυκλώματος σε Σταθερή Κα- τάσταση	65
3.4.2	Μελέτη Μεταβατικού Βραχυκυκλώματος	66
3.4.3	Εκτίμηση Ρεύματος Βραχυκύκλωσης Χειρότερης Περίπτωσης . .	67
3.5	ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ Ε- ΦΑΡΜΟΓΗ	68
3.5.1	Δυναμική Οχήματος	68
3.5.2	Εξαγωγή Σημείων Λειτουργίας Κινητήρα	71
3.5.3	Υπολογισμός Απόδοσης	73
4	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΠΡΟΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗ	75
4.1	ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	75
4.1.1	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Δρομέα	76
4.1.2	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Στάτη	77
4.2	ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ	77
4.2.1	Πυρήνας του Δρομέα και του Στάτη	77
4.2.2	Μόνιμοι Μαγνήτες	78
4.2.3	Τύλιγμα Στάτη	79
4.3	ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ	79
4.3.1	Χαρακτηριστικά Ροπής - Απόδοσης	79
4.3.2	Χαρακτηριστικά Οχήματος	81
4.3.3	Κύρια Χαρακτηριστικά Προς Βελτίωση	82
5	ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΩΝ	84
5.1	ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΔΙΑΤΟΜΩΝ	84
5.1.1	Συνδυασμοί Πόλων και Αυλάκων	85
5.1.2	Τοπολογίες Δρομέα	85
5.1.3	Ενεργό Μήκος και αριθμός ενεργών ελιγμάτων	86
5.2	ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	87
5.2.1	Επίδραση Παραμέτρων στην Απόδοση και το Κόστος	88

5.2.2	Καθορισμός Κριτηρίων Για Τελική Επιλογή Κινητήρα	91
5.3	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΕΛΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ	93
5.3.1	Χαρακτηριστικά Ροπής - Απόδοσης	95
5.3.2	Συμπεριφορά σε Βραχυκύκλωμα	95
6	ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	98
6.1	ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ	98
6.2	Επίδραση Παραμέτρων στη Σχεδίαση	99
6.2.1	Συνδυασμός Πόλων - Αυλάκων	99
6.2.2	Τοπολογία Δρομέα	99
6.2.3	Ενεργά Εν σειρά Ελίγματα	99
6.2.4	Ενεργά Μήκη	99
6.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΡΧΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ	100
6.4	ΠΡΩΤΟΤΥΠΗ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	100
6.5	ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΤΝΗΣΗ	100

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη μελέτη και ανασχεδίαση της ηλεκτρικής μηχανής ενός εμπορικά διαθέσιμου τύπου ηλεκτρικού οχήματος, με σκοπό την επίτευξη ισοδύναμων ή και βελτιωμένων επιδόσεων μέσω εναλλακτικής αρχιτεκτονικής τυλιγμάτων και γεωμετρίας δρομέα.

Συγκεκριμένα, αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η αντικατάσταση των συμβατικών τυλιγμάτων με τυλίγματα τύπου φουρκέτας (Hairpin Windings), τα οποία προσφέρουν προοπτικές για καλύτερη θερμική συμπεριφορά, χαμηλότερη αντίσταση και ενδεχομένως απλοποίηση της διαδικασίας κατασκευής. Η νέα σχεδίαση στοχεύει στη διατήρηση των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών της αρχικής μηχανής, ενώ ταυτόχρονα επιδιώκεται η βελτιστοποίηση ως προς τρεις βασικούς άξονες: την ενεργειακή απόδοση, το κόστος κατασκευής και τη μείωση της απομαγνήτισης.

Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζονται και συγκρίνονται τρεις διαφορετικές τοπολογίες δρομέα: η κλασική μονού V (single-V), η διπλού V (double-V) και η δέλτα (delta). Κάθε τοπολογία αξιολογείται βάσει ηλεκτρομαγνητικών προσομοιώσεων και καθορισμένων σεναρίων λειτουργίας, με στόχο τον εντοπισμό της βέλτιστης λύσης ως προς τα επιθυμητά κριτήρια.

Η μελέτη περιλαμβάνει την ανάλυση της αρχικής ηλεκτρικής μηχανής, η οποία βασίζεται σε εμπορικά διαθέσιμο τύπο κινητήρα ηλεκτρικού οχήματος [22], την παραμετρική σχεδίαση της εναλλακτικής αρχιτεκτονικής, καθώς και τη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Η παρούσα εργασία στοχεύει να συμβάλει στη βελτιστοποίηση των συστημάτων πρόωσης, συνδυάζοντας την ακρίβεια της προσομοίωσης με την πρακτικότητα των βιομηχανικών περιορισμών.

1.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

- **Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή**

Παρουσιάζονται τα κίνητρα της εργασίας, το αντικείμενο μελέτης, καθώς και οι βασικοί στόχοι και περιορισμοί της σχεδίασης. Το κεφάλαιο λειτουργεί ως προσανατολισμός για τον αναγνώστη.

- **Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο**

Περιλαμβάνει τη θεμελίωση των εννοιών που είναι απαραίτητες για την κατανόηση της εργασίας. Αναλύονται συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών οχημάτων, οι κύριοι τύποι ηλεκτρικών μηχανών, τα διαφορετικά είδη τυλιγμάτων, καθώς και βασικές αρχές ηλεκτρομαγνητισμού και λειτουργίας σύγχρονων μηχανών μόνιμων μαγνητών (PMSMs).

- **Κεφάλαιο 3: Ανάλυση με Πεπερασμένα Στοιχεία (FEA)**

Παρουσιάζεται η μεθοδολογία παραμετροποίησης των τοπολογιών μέσω του λογισμικού MATLAB και η αλληλεπίδραση με το λογισμικό FEMM για την υλοποίηση ηλεκτρομαγνητικών προσομοιώσεων. Αναλύονται οι βασικές αρχές των ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων πεπερασμένων στοιχείων, και παρουσιάζεται ο υπολογισμός κρίσιμων μεγεθών όπως οι απώλειες, ο κίνδυνος απομαγνήτισης, οι χάρτες ροής και ροπής, η καμπύλη ροπής-ταχύτητας, η μάζα των εξαρτημάτων κ.ά.

- **Κεφάλαιο 4: Παρουσίαση Μηχανής Αναφοράς**

Παρουσιάζεται ηλεκτρική μηχανή που αναπαράγει τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ευρέως χρησιμοποιούμενου κινητήρα ηλεκτρικού οχήματος [22], προκειμένου να χρησιμεύσει ως σημείο αναφοράς για τις επόμενες παραμετρικές βελτιστοποιήσεις.

- **Κεφάλαιο 5: Βελτιστοποίηση Σχεδίασης**

Περιγράφεται η διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης σχεδίασης. Εφαρμόζονται αναλύσεις ευαισθησίας και αξιολογούνται οι επιδράσεις κρίσιμων παραμέτρων στη συνολική απόδοση. Παρουσιάζεται το βήμα-βήμα πλάνο που οδήγησε στην τελική επιλογή μηχανής.

- **Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα**

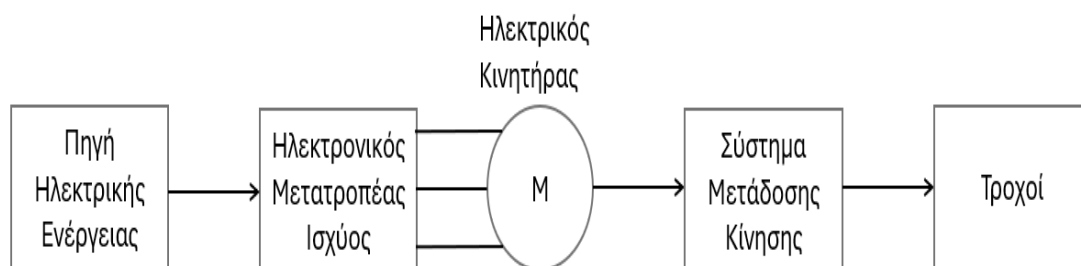
Γίνεται συνοπτική ανασκόπηση των βασικών ευρημάτων της εργασίας, και παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ

Η ηλεκτροκίνηση αποτελεί έναν ταχέως αναπτυσσόμενο τομέα στον χώρο των μεταφορών, καθώς προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα τόσο σε επίπεδο ενεργειακής απόδοσης όσο και σε περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Τα ηλεκτρικά οχήματα (Electric Vehicles – EVs) βασίζονται στην αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας για την κίνησή τους, μειώνοντας σημαντικά τις εκπομπές ρύπων και την εξάρτηση από τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα. Η συνεχής πρόοδος σε τομείς όπως η τεχνολογία των μπαταριών, τα ηλεκτρονικά ισχύος και οι ηλεκτρικοί κινητήρες, έχει οδηγήσει σε βελτιωμένες επιδόσεις, μεγαλύτερη αυτονομία και μειωμένο κόστος παραγωγής. Ως αποτέλεσμα, τα ηλεκτρικά οχήματα αποτελούν πλέον μια ρεαλιστική και βιώσιμη λύση για τη μετάβαση προς πιο καθαρές και αποδοτικές μεταφορές, με την αγορά τους να παρουσιάζει σταθερά αυξητικές τάσεις σε παγκόσμιο επίπεδο.



Σχήμα 2.1: Κυριότερα στοιχεία συστήματος κίνησης ενός ηλεκτρικού οχήματος

- **Πηγή Ηλεκτρικής Ενέργειας**

Η πηγή ενέργειας αποτελεί το θεμέλιο ολόκληρου του συστήματος, παρέχοντας την απαραίτητη ηλεκτρική ισχύ. Στα σύγχρονα ηλεκτρικά οχήματα, ο ρόλος αυτός επιτελείται κυρίως από ηλεκτροχημικούς συσσωρευτές, με τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες να είναι οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος, νικελίου-μετάλλου-υδριδίου (NiMH) και ιόντων λιθίου (Li-ion). Βασικός στόχος κάθε τεχνολογίας είναι η αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας (Wh/kg) και η επέκταση του αριθμού κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης — δύο παράγοντες που παραμένουν κρίσιμες προκλήσεις για την εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης. Η φόρτιση των μπαταριών πραγματοποιείται συνήθως μέσω εξωτερικής παροχής, ακόμη και από οικιακό δίκτυο, με την ισχύ φόρτισης να ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του φορτιστή. Επιπλέον, μέσω της λειτουργίας αναγεννητικής πέδησης, είναι δυνατή η ανάκτηση μέρους της κινητικής ενέργειας των τροχών κατά την επιβράδυνση και η μετατροπή της ξανά σε ηλεκτρική ενέργεια προς αποθήκευση στις μπαταρίες — κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό στα υβριδικά οχήματα, όπου συνδυάζονται ηλεκτρική και θερμική πηγή ενέργειας.

- **Ηλεκτρονικός Μετατροπέας Ισχύος**

Ο μετατροπέας ισχύος αναλαμβάνει τη μετατροπή της συνεχούς τάσης εξόδου της μπαταρίας σε εναλλασσόμενη, με συχνότητα και πλάτος κατάλληλα για την τροφοδοσία του ηλεκτρικού κινητήρα. Παράλληλα, επιτρέπει τον πλήρη έλεγχο της ταχύτητας και της ροπής της μηχανής. Το βασικό του υπόβαθρο είναι μια μονάδα ηλεκτρονικών ισχύος, στην οποία κυριάρχο ρόλο διαδραματίζει ένας τριφασικός αντιστροφέας με ημιγέφυρες, που υποστηρίζει αμφίδρομη ροή ισχύος. Ο έλεγχος του αντιστροφέα πραγματοποιείται μέσω ειδικού μικροελεγκτή ή ψηφιακού επεξεργαστή σήματος (DSP), ο οποίος υλοποιεί τους κατάλληλους αλγορίθμους ελέγχου.

- **Ηλεκτρικός Κινητήρας**

Ο ηλεκτρικός κινητήρας είναι ο βασικός ενεργοποιητής του οχήματος, καθώς μετατρέπει την αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανικό έργο για την πρόωση του αυτοκινήτου. Αποτελεί την «καρδιά» του συστήματος κίνησης και πρέπει να πληροί αυστηρές απαιτήσεις σχετικά με:

- το μέγεθος και το βάρος του,
- τη θερμική και μηχανική του αντοχή,
- την απόδοσή του σε όλο το εύρος λειτουργίας.

Οι πιο κοινές επιλογές ηλεκτρικών κινητήρων σήμερα είναι οι επαγωγικές μηχανές και οι σύγχρονες μηχανές μόνιμων μαγνητών (PMSM). Η μελέτη και βελτιστοποίηση αυτού του υποσυστήματος αποτελεί τον βασικό άξονα της παρούσας εργασίας.

- **Σύστημα Μετάδοσης Κίνησης**

Το μηχανικό σύστημα μετάδοσης αναλαμβάνει τη μεταφορά της ροπής από τον άξονα του κινητήρα στους τροχούς, προσαρμόζοντας κατάλληλα την ταχύτητα και την ροπή. Σε αντίθεση με τα συμβατικά οχήματα, στα ηλεκτρικά δεν απαιτείται συμπλέκτης, καθώς οι ηλεκτρικοί κινητήρες μπορούν να λειτουργούν χωρίς ρίσκο ακόμα και σε μηδενικές στροφές. Έτσι, χρησιμοποιούνται απλοποιημένα κιβώτια ταχυτήτων με σταθερό λόγο μετάδοσης, τα οποία επιτρέπουν τον περιορισμό της ροπής που απαιτείται από τον κινητήρα και κατ' επέκταση την ελάττωση του όγκου και του κόστους του.

2.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Οι ηλεκτρικές μηχανές αποτελούν θεμελιώδη συστατικά των σύγχρονων ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων, επιτελώντας τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική — ή αντίστροφα, ανάλογα με την εφαρμογή. Η συνεχής πρόοδος στην τεχνολογία υλικών, την ακριβή μοντελοποίηση και τον έλεγχο έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη αποδοτικότερων, πιο αξιόπιστων και πιο συμπαγών ηλεκτρικών μηχανών, καθιστώντας τες απαραίτητες σε πληθώρα βιομηχανικών, οικιακών και μεταφορικών εφαρμογών. Οι βασικότερες κατηγορίες ηλεκτρικών μηχανών ανάλογα με τις αρχές λειτουργίας τους παρουσιάζονται παρακάτω.

2.2.1 Μηχανές Μαγνητικής Αντίστασης

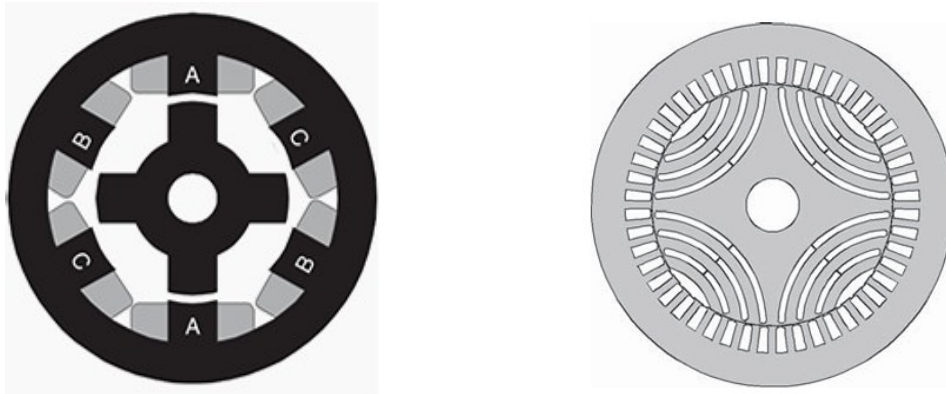
Οι μηχανές μαγνητικής αντίστασης αποτελούν μια ευρύτερη κατηγορία ηλεκτρικών μηχανών που αξιοποιούν την αρχή της ελαχιστοποίησης της μαγνητικής αντίστασης για την παραγωγή ροπής. Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται τόσο οι μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (Switched Reluctance Machines – SRM) όσο και οι σύγχρονες μηχανές μαγνητικής αντίστασης (Synchronous Reluctance Machines – SynRM).

Οι μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης χαρακτηρίζονται από απλό και ανθεκτικό σχεδιασμό, καθώς ο δρομέας τους δεν φέρει τύλιγμα ή μόνιμους μαγνήτες. Η ροπή παράγεται μέσω της ευθυγράμμισης του δρομέα με το ενεργό μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τα τυλίγματα του στάτη, τα οποία ενεργοποιούνται διαδοχικά με κατάλληλη αλληλουχία. Το χαμηλό κόστος κατασκευής, η δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλές θερμοκρασίες και η εξαιρετική μηχανική αντοχή καθιστούν τις μηχανές αυτές ιδανικές για εφαρμογές που απαιτούν αξιοπιστία. Ωστόσο, παρουσιάζουν σημαντική κυμάτωση ροπής (torque ripple) και απαιτούν προηγμένους αλγόριθμους ελέγχου για ομαλή λειτουργία.

Από την άλλη, οι σύγχρονες μηχανές μαγνητικής αντίστασης λειτουργούν σε σύγχρονη ταχύτητα με το πεδίο του στάτη και χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή απόδοση και καλός δυναμικός έλεγχος χωρίς τη χρήση μαγνητών. Διαθέτουν δρομέα με ανισοτροπία μαγνητικής αντίστασης, σχεδιασμένο να κατευθύνει τη μαγνητική ροή μέσα από διαδρομές χαμηλότερης μαγνητικής αντίστασης, γεγονός

που επιτρέπει την παραγωγή ροπής χωρίς ρεύμα διέγερσης. Οι μηχανές αυτές συνδυάζουν υψηλό βαθμό απόδοσης με απλή κατασκευή, ενώ υποστηρίζουν λειτουργία με μετατροπείς μεταβλητής συχνότητας όπως και οι μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.

Παρά τις διαφορές τους, και οι δύο τύποι μηχανών επωφελούνται από την απουσία μαγνητών και την υψηλή αντοχή, ενώ εξελίσσονται διαρκώς μέσω καινοτόμων τεχνικών σχεδιασμού και ελέγχου που στοχεύουν στη μείωση της κυμάτωσης της ροπής και τη βελτίωση της δυναμικής απόδοσης.



Σχήμα 2.2: Αριστερά: Μηχανή Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης, Δεξιά : Σύγχρονη Μηχανή Μαγνητικής Αντίστασης

[1]

2.2.2 Μηχανές Συνεχούς ρεύματος

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC) υπήρξαν από τους πρώτους ηλεκτρικούς κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς, κυρίως σε εφαρμογές ελέγχου κίνησης, τραίνων και βιομηχανικών συστημάτων. Διαθέτουν απλή αρχή λειτουργίας, καθώς η ροπή παράγεται από την αλληλεπίδραση του μαγνητικού πεδίου του στάτη και των αγωγών στον δρομέα, μέσω του συλλέκτη (commutator). Κυριότερες κατηγορίες των μηχανών συνεχούς ρεύματος είναι :

- **Κινητήρες ανεξάρτητης διέγερσης (Separately Excited DC Motors):**

Ο στάτης και ο δρομέας τροφοδοτούνται από ξεχωριστά κυκλώματα.

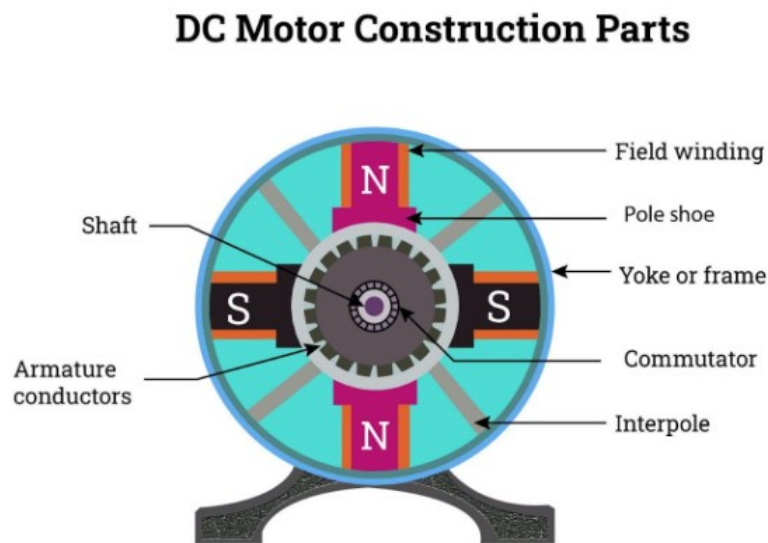
- **Κινητήρες εν σειρά διέγερσης (Series DC Motors):**

Ο στάτης και ο δρομέας συνδέονται σε σειρά, προσφέροντας υψηλή ροπή εκκίνησης

- **Κινητήρες παράλληλης διέγερσης (Shunt DC Motors):**

Ο στάτης και ο δρομέας είναι σε παράλληλη σύνδεση, παρέχοντας σταθερή ταχύτητα.

Παρότι οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος προσφέρουν καλό έλεγχο ταχύτητας και υψηλή ροπή εκκίνησης, έχουν μειονεκτήματα όπως μεγάλες απώλειες, ανάγκη για συντήρηση (φθορά ψηκτρών) και χαμηλή απόδοση. Ως αποτέλεσμα, έχουν αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) στις περισσότερες εφαρμογές.

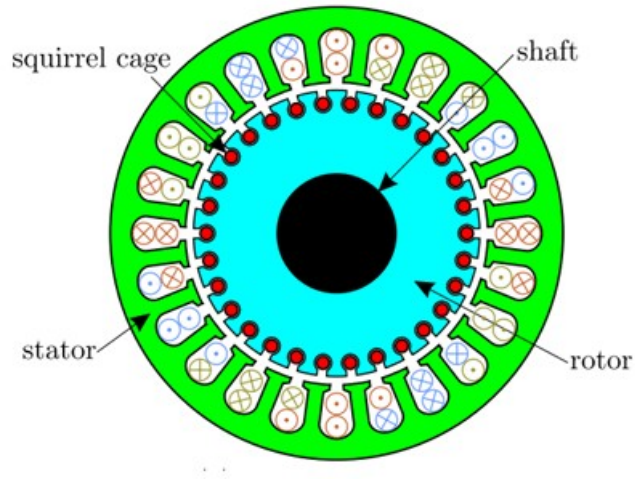


Σχήμα 2.3: Κατασκευαστικά μέρη κινητήρα συνεχούς ρεύματος[20]

2.2.3 Κινητήρες Επαγωγής (AC):

Ο ασύγχρονος κινητήρας, γνωστός και ως κινητήρας επαγωγής, αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες επιλογές στα συστήματα ηλεκτροκίνησης, χάρη στην απλότητα ελέγχου και την υψηλή του αξιοπιστία. Ένα βασικό πλεονέκτημα σε σχέση με άλλες τεχνολογίες είναι ότι δεν απαιτείται σύστημα διέγερσης στον δρομέα, γεγονός που μειώνει την πολυπλοκότητα και το κόστος. Ωστόσο, δεν διαθέτει τη δυνατότητα αυτόματης ρύθμισης του συντελεστή ισχύος και απορροφά μόνιμα άεργο ισχύ. Υπάρχουν δύο κύριες διαμορφώσεις δρομέα στους ασύγχρονους κινητήρες. Στην πρώτη, ο δρομέας φέρει τριφασικό τύλιγμα παρόμοιο με εκείνο του στάτη (κινητήρας τυλιγμένου δρομέα), προσφέροντας δυνατότητα ελέγχου μέσω εξωτερικών αντιστάσεων. Στη δεύτερη – και συνηθέστερη – διαμόρφωση, ο δρομέας αποτελείται από αγωγίμες μεταλλικές ράβδους που είναι βραχυκυκλωμένες στα άκρα τους, σχηματίζοντας το λεγόμενο “τύλιγμα κλωβού”. Για τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής απαιτείται η χρήση

αντιστροφέα (inverter), ο οποίος ρυθμίζει τη συχνότητα της παρεχόμενης τάσης. Η δυνατότητα αυτή καθιστά τους ασύγχρονους κινητήρες κατάλληλους για ευρύ φάσμα εφαρμογών στα σύγχρονα ηλεκτρικά οχήματα.



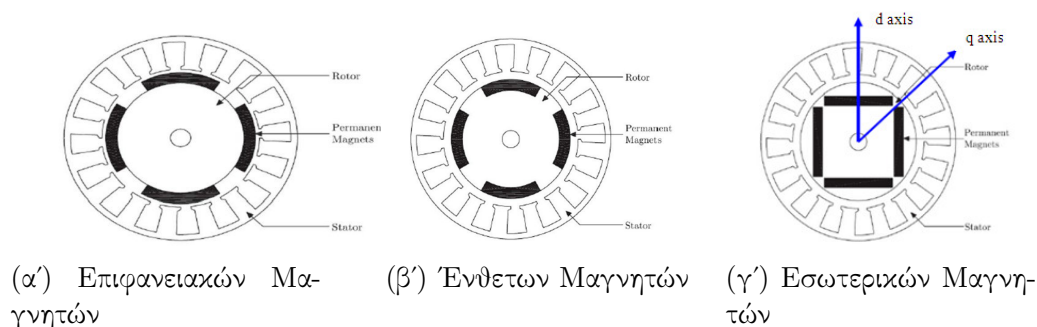
Σχήμα 2.4: Κινητήρας Επαγωγής με Δρομέα Τύπου Κλωβού.

2.2.4 Σύγχρονοι Κινητήρες Μονίμων Μαγνητών PM-SM

Στην πλέον διαδεδομένη κατηγορία σύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών, το τύλιγμα διέγερσης του δρομέα αντικαθίσταται από μόνιμους μαγνήτες, απαλλάσσοντας τη μηχανή από την ανάγκη χρήσης ψυκτρών και μειώνοντας σημαντικά τις απώλειες χαλκού. Παρόλο που το κόστος των μαγνητών είναι υψηλό, οι σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών προσφέρουν εξαιρετικά υψηλό βαθμό απόδοσης τόσο σε χαμηλές όσο και σε υψηλές ταχύτητες. Σε συνδυασμό με την υψηλή πυκνότητα ισχύος, αποτελούν την κορυφαία επιλογή για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των μηχανών αυτών είναι ο κίνδυνος απομαγνήτισης των μαγνητών, ιδιαίτερα σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας ή κατά τη διάρκεια βραχυκυκλωμάτων. Σε αντίθεση με τις μηχανές με διέγερση στον δρομέα, όπου η αντίσταση των τυλιγμάτων περιορίζει το ρεύμα, οι μόνιμοι μαγνήτες δεν διαθέτουν τέτοιο μέσο προστασίας, με αποτέλεσμα να είναι πιο ευάλωτοι σε ρεύματα βραχυκύκλωσης. Ωστόσο, η χρήση μαγνητών Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου (NdFeB), οι οποίοι παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή στην απομαγνήτιση, έχει μειώσει σημαντικά αυτόν τον κίνδυνο.

Ανάλογα με τη θέση τοποθέτησης των μαγνητών, οι σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών διακρίνονται στις εξής βασικές κατηγορίες:



Σχήμα 2.5: Κύρια είδη Σύγχρονων Κινητήρων Μονίμων Μαγνητών [2]

• Μηχανές Επιφανειακών Μαγνητών

Στην εν λόγω τοπολογία, οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται στην επιφάνεια του κυλινδρικού δρομέα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5(α). Οι κινητήρες επιφανειακών μαγνητών (SPM) ξεχωρίζουν για την απλότητα στην κατασκευή τους, προσφέροντας παράλληλα υψηλή πυκνότητα ισχύος και εξαιρετική απόδοση. Λόγω του ότι η μαγνητική διαπερατότητα των μαγνητών είναι παρόμοια με αυτή του αέρα, η μοναδική συνιστώσα ροπής που αναπτύσσεται είναι η ηλεκτρομαγνητική ροπή, η οποία οφείλεται στην αλληλεπίδραση του μαγνητικού πεδίου του δρομέα με αυτό του στάτη. Ωστόσο, η τοπολογία αυτή παρουσιάζει το σημαντικό μειονέκτημα της αυξημένης ευαισθησίας σε αποκόλληση των μαγνητών, ιδίως σε υψηλές ταχύτητες, εξαιτίας των σημαντικών φυγόκεντρων δυνάμεων που αναπτύσσονται και της απουσίας μηχανικής στήριξής τους. Για την αποφυγή αυτού του φαινομένου, εφαρμόζεται συχνά ένας συγκρατητικός μανδύας (retaining sleeve), ο οποίος περιβάλλει τους μαγνήτες και τους συγκρατεί στη θέση τους. Επιπλέον, η τοποθέτηση των μαγνητών κοντά στο διάκενο αποτελεί δίκοπο μαχαίρι: από τη μία πλευρά προσφέρει υψηλή πυκνότητα ισχύος, από την άλλη όμως καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη τη μείωση της μαγνητικής ροής του δρομέα — κάτι επιθυμητό κατά τη λειτουργία σε πολύ υψηλές ταχύτητες. Η περιορισμένη ικανότητα αποαποδιέγερσης του πεδίου αναγκάζει το σύστημα να χρησιμοποιεί αυξημένα ρεύματα αποδιαίγερσης, γεγονός που συνεπάγεται υψηλότερες απώλειες και μειωμένη απόδοση σε τέτοιες συνθήκες. [3]

• Μηχανές Ένθετων Μαγνητών

Στην τοπολογία ένθετων μαγνητών (Inset Permanent Magnet – IPM), οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται εντός εσοχών στην επιφάνεια του δρομέα, και τα διάκενα μεταξύ τους καλύπτονται από γέφυρες σιδήρου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5(β). Η διαμόρφωση αυτή προσδίδει στον κινητήρα ένα υβριδικό χαρακτήρα, καθώς πέρα από την ηλεκτρομαγνητική ροπή (που προκύπτει από την αλληλεπίδραση πεδίων), αναπτύσσεται και μία επιπλέον συνιστώσα ροπής εκτυπότητας (reluctance torque) λόγω της ασυμμετρίας στη μαγνητική διαπερατότητα του δρομέα.

Η συνύπαρξη των δύο αυτών μηχανισμών ροπής μπορεί να βελτιώσει τη συνολική ροπή του κινητήρα, ιδιαίτερα σε μέσες και χαμηλές ταχύτητες. Παρόλα αυτά, η εισαγωγή των σιδηρών γεφυρών και η παρουσία περισσότερου σιδηρομαγνητικού υλικού κοντά στους μαγνήτες αυξάνει τη μαγνητική σκέδαση και περιορίζει εν μέρει τη συγκέντρωση της ροής στο διάκενο. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση της καθαρής ηλεκτρομαγνητικής ροπής σε σύγκριση με μια τοπολογία επιφανειακών μαγνητών. Επιπλέον, η κατασκευή είναι πιο σύνθετη, αλλά προσφέρει ένα καλό συμβιβασμό μεταξύ μηχανικής αντοχής, ροπής και ελέγχου του πεδίου. [3]

• Μηχανές Εσωτερικών Μαγνητών

Στην τοπολογία αυτή (βλ. Σχήμα 2.5(γ) , οι μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται εντός του σιδηρομαγνητικού υλικού του δρομέα, πλήρως περικλεισμένοι από αυτό. Πρόκειται για την πλέον διαδεδομένη μορφή σύγχρονων μηχανών μόνιμων μαγνητών σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, χάρη στην υψηλή απόδοση και ευελιξία τους. Η εσωτερική τοποθέτηση των μαγνητών επιτρέπει την εκμετάλλευση τόσο της ηλεκτρομαγνητικής ροπής όσο και της ροπής εκτυπότητας, λόγω της ανομοιομορφίας στη μαγνητική διαπερατότητα του δρομέα. Αν και η ηλεκτρομαγνητική συνιστώσα μειώνεται, καθώς οι μαγνήτες βρίσκονται σε σχετική απόσταση από το διάκενο, η ροπή εκτυπότητας ενισχύεται σημαντικά, επιτρέποντας υψηλότερη συνολική απόδοση, ιδιαίτερα σε συνθήκες μεταβλητού φορτίου. Η τοπολογία αυτή προσφέρει μεγάλη σχεδιαστική ευελιξία, με αρκετές παραλλαγές όπως η τοποθέτηση μαγνητών σε σχήμα μονού ή διπλού V, διάταξη τύπου Δέλτα, πολυστρωματικές διατάξεις με φράγματα αέρα κ.ά. Αυτές οι διαμορφώσεις επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση της ροπής, του βαθμού απόδοσης και της μηχανικής αντοχής. Ένα βασικό πλεονέκτημα των εσωτερικών μαγνητών είναι η ικανότητα λειτουργίας σε ευρύ φάσμα ταχυτήτων, με δυνατότητα εξασθένησης πεδίου (field weakening) για λειτουργία σε υψηλές ταχύτητες, χωρίς την ανάγκη υπερβολικών ρευμάτων. Ωστόσο, μειονεκτήματα της τοπολογίας αποτελούν η αυξημένη πολυπλοκότητα στην κατασκευή, καθώς και οι αυξημένες απώλειες πυρήνα, λόγω της συνεχούς μαγνήτισης του σιδηρομαγνητικού υλικού από τους εσωτερικά τοποθετημένους μαγνήτες. [3]

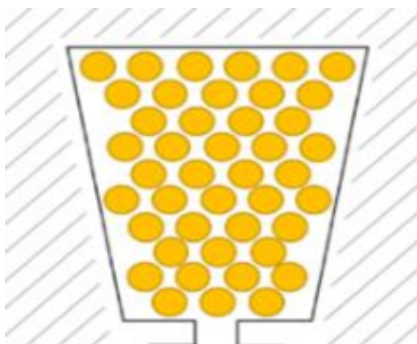
Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αντικείμενο μελέτης αποτελούν οι σύγχρονες μηχανές με εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες (Interior Permanent Magnet – IPM). Η επιλογή αυτής της τοπολογίας βασίζεται στη μεγάλη διείσδυσή της σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης, λόγω της υψηλής απόδοσης, της ικανότητας λειτουργίας σε ευρύ φάσμα ταχυτήτων και της δυνατότητας αξιοποίησης τόσο της ηλεκτρομαγνητικής ροπής όσο και της ροπής εκτυπότητας. Στόχος της εργασίας είναι η ανάλυση, αξιολόγηση και βελτιστοποίηση μηχανών σχεδιασμένων με βάση την συγκεκριμένη τοπολογία για εφαρμογή σε ένα σύγχρονο ηλεκτρικό αυτοκίνητο.

2.3 ΤΥΛΙΓΜΑΤΑ ΣΤΑΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Το τύλιγμα του στάτη αποτελεί ένα από τα βασικά στοιχεία που επηρεάζουν άμεσα την απόδοση, την πυκνότητα ρεύματος και τις απώλειες της σύγχρονης ηλεκτρικής μηχανής. Η ταξινόμηση των τυλιγμάτων μπορεί να γίνει με διάφορα κριτήρια. Στην παρούσα ενότητα εξετάζονται δύο κύριες κατηγοριοποιήσεις:

- Κατηγοριοποίηση με βάση τη μορφή των αγωγών
- Κατηγοριοποίηση με βάση τη διανομή του τυλιγματος

2.3.1 Κατηγοριοποίηση με βάση τη μορφή των αγωγών



(α') Τύλιγμα με Πολύκλινα Καλώδια



(β') Τύλιγμα τύπου Φουρκέτας (Hairpin)

- Τύλιγμα με αγωγούς τύπου φουρκέτας (Hairpin Windings)

Αποτελείται από ορθογώνιους, συμπαγείς αγωγούς (συνήθως από χαλκό) μεγάλης διατομής, τοποθετημένους με ακρίβεια στις αυλακώσεις του στάτη. Τα τυλίγματα τύπου φουρκέτας έχουν σχήμα 'U', που διέρχονται από δύο αύλακες του στάτη και εν συνεχεία ενώνονται στα άκρα τους με συγκόλληση. Η κατασκευή αυτή είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για εφαρμογές υψηλών ρευμάτων και προσφέρει χαμηλότερες ωμικές απώλειες και αυξημένη πυκνότητα ρεύματος. Ωστόσο, η μεγάλη διατομή των συμπαγών αγωγών οδηγεί σε σημαντική αύξηση δινορρευμάτων εντός των ίδιων των αγωγών σε υψηλές συχνότητες, ιδιαίτερα λόγω του επιδερμικού φαινομένου (skin effect) και του φαινομένου γειτνίασης (προξими́тψ εφφесτ). Τα φαινόμενα αυτά προκαλούν ανομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος στην διατομή των αγωγών, αυξάνοντας έτσι τις συνολικές απώλειες εναλλασσομένου ρεύματος (AC losses). Για τον λόγο αυτό, σε υψηλές

συχνότητες ή απαιτητικές εφαρμογές, προτιμάται η χρήση πολλαπλών λεπτών μπάρων με μόνωση μεταξύ τους.

- **Τύλιγμα με πολύκλιωνα καλώδια (stranded windings)**

Αποτελείται από πολλούς λεπτούς, μονωμένους μεταξύ τους κλώνους χαλκού, πλεγμένους ή συστρεμμένους ώστε να σχηματίζουν έναν ενιαίο αγωγό. Η μικρή διάμετρος κάθε κλώνου μειώνει σημαντικά τις απώλειες δινορρευσμάτων στις υψηλές συχνότητες και περιορίζει τόσο το επιδερμικό φαινόμενο (skin effect) όσο και το φαινόμενο γειτνίασης (proximity effect), καθώς το ρεύμα κατανέμεται πιο ομοιόμορφα σε όλους τους κλώνους. Σημαντικό μειονέκτημα ωστόσο του πολύκλιωνου τυλίγματος είναι η σημαντική μείωση της μέγιστης επιφάνειας του χαλκού που μπορεί να χωροθετηθεί μέσα στην αύλακα για δεδομένη διατομή μειώνοντας τον συντελεστή πληρότητας αύλακος της και αυξάνοντας τις ωμικές απώλειες. Παρότι τα πολύκλιωνα τυλίγματα προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα από πλευράς μείωσης απωλειών δινορρευσμάτων και βελτίωσης της κατανομής ρεύματος, παρουσιάζουν σοβαρές προκλήσεις στον αυτοματισμό της κατασκευής τους. Ο μεγάλος αριθμός λεπτών αγωγών που πρέπει να εισαχθούν, να ευθυγραμμιστούν και να μονωθούν σωστά μέσα στη αύλακα καθιστά την πλήρη αυτοματοποίηση της διαδικασίας εξαιρετικά πολύπλοκη. Συχνά απαιτείται χειρωνακτική επέμβαση, τόσο στη φάση τοποθέτησης όσο και στη σύνδεση των αγωγών, γεγονός που αυξάνει τον κίνδυνο λαθών, την επαναληψιμότητα και το κόστος παραγωγής.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιλέγεται η χρήση τυλιγμάτων τύπου φουρκέτας (Hairpin windings) για τον στάτη του κινητήρα. Η επιλογή αυτή βασίζεται σε μια σειρά από πλεονεκτήματα που τα καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικά για εφαρμογές υψηλών επιδόσεων. Πιο συγκεκριμένα, τα τυλίγματα φουρκέτας παρουσιάζουν πολύ καλή θερμική συμπεριφορά λόγω της μεγαλύτερης διατομής τους, επιτρέποντας έτσι την καλύτερη απαγωγή θερμότητας και τη μεταφορά υψηλότερων ρευμάτων χωρίς υπερθέρμανση. Επίσης, επιτρέπουν την επίτευξη υψηλής πυκνότητας ρεύματος, καθιστώντας τα ιδανικά για εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή ισχύς σε περιορισμένο όγκο.

Παράλληλα, διευκολύνουν τον προγραμματισμένο σχεδιασμό των αυλάκων, προσφέροντας μεγαλύτερη γεωμετρική ακρίβεια και απλότητα σε σχέση με τα πολύκλιωνα τυλίγματα. Αν και συνοδεύονται από φαινόμενα όπως το επιδερμικό (skin effect) και αυτό της γειτνίασης (proximity effect), η μείωση των απωλειών χαλκού σε συνδυασμό με το γεγονός ότι, τα τυλίγματα μπάρας τείνουν να είναι πιο φιλικά προς τον αυτοματισμό της παραγωγής, σε σχέση με τα πολύκλιωνα, είναι χαρακτηριστικά που συνάδουν με τις απαιτήσεις της βιομηχανικής κλίμακας παραγωγής.

Κατηγοριοποίηση με βάση τη διανομή του τυλίγματος

- **Συγκεντρωμένο Τύλιγμα Πλήρους Βήματος**

Στο συγκεκριμένο τύλιγμα οι σπείρες μίας φάσης διέρχονται από ένα μόνο αυλάκι ανά πόλο. Η διαμόρφωση αυτή είναι η απλούστερη κατασκευαστικά επιτρέποντας την μεγιστοποίηση του συντελεστή πληρότητας αύλακος διαμόρφωση τυλίγματος ωστόσο δεν προτιμάται συχνά αφού έχει κακή απόδοση σ ως πριν την κυμάτωση της ροπής

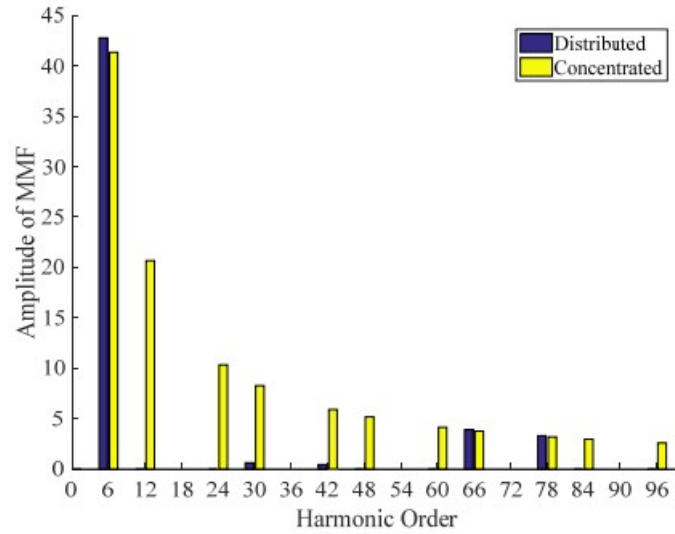
- **Κατανεμημένο Τύλιγμα Πλήρους Βήματος**

Το κατανεμημένο τύλιγμα πλήρους βήματος είναι η βελτιωμένη εκδοχή του συγκεντρωμένου τυλίγματος πλήρους βήματος. Στο τύλιγμα αυτό οι σπείρες μια φάσης ανά πόλο δεν περιορίζονται σε ένα μόνο αυλάκι αλλά **κατανέμονται** σε περισσότερες από μία διαδοχικές αύλακες. Έτσι αν για παράδειγμα στο συγκεντρωμένο τριφασικό τύλιγμα θέσουμε 3 αυλάκια ανά πόλο και φάση, κάθε πόλος θα έχει 9 αυλάκια, τα οποία θα χωρίζονται ομοιόμορφα στις τρεις φάσεις που ανήκουν στον πόλο. Έτσι θα έχουμε 3 στη φάση Α, 3 στη φάση -Γ (το - δηλώνει την κατεύθυνση του ρεύματος) και 3 στη φάση Β. Το αρμονικό περιεχόμενο της συγκεκριμένης τοπολογίας τυλίγματος είναι σημαντικά μειωμένο, προσεγγίζοντας έτσι καλύτερα την ημιτονικότητα του πεδίου, μειώνοντας ωστόσο τη θεμελιώδη συνιστώσα του πεδίου. Η μείωση αυτή περιγράφεται από τον συντελεστή πλάτους του τυλίγματος.

$$k_d = \frac{\sin(\frac{q\gamma}{2})}{q \cdot \sin(\frac{\gamma}{2})} \quad (2.1)$$

Όπου :

- $Q = m \cdot q \cdot p$, ο συνολικός αριθμός των αυλάκων της μηχανής
- q , ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση
- p , ο αριθμός των πόλων της μηχανής
- γ , το βήμα αύλακος σε ηλεκτρικές μοίρες



Σχήμα 2.7: Σύγκριση Αρμονικού Περιεχομένου σε Κατανεμημένο και Συγκεντρωμένο τύλιγμα

- **Κατανεμημένο Τύλιγμα Κλασματικού Βήματος**

Στη τοπολογία αυτή γίνεται κατανομή των πηνίων μίας φάσης σε πολλά στρώματα μέσα σε κάθε αύλακα. Αυτό επιτρέπει την εισαγωγή της έννοιας του κλασματικού βήματος δηλαδή την τοποθέτηση των πηνίων ανώτερων στρωμάτων 'μετατοπισμένα' σε σχέση με τα αντίστοιχα κατώτερων στρωμάτων. Έτσι δύναται στο ίδιο αυλάκι να υπάρχουν τυλίγματα απο διαφορετικές φάσεις. Η διαμόρφωση αυτή μπορεί να μειώσει περαιτέρω το αρμονικό περιεχόμενο του πεδίου, μειώνοντας όμως τη θεμελιώδη συνιστώσα πεδίου κατά την τιμή του συντελεστή βήματος.

$$k_p = \cos\left(\frac{\pi - \rho}{2}\right) \quad (2.2)$$

Όπου ρ , η γωνία του κλασματικού βήματος σε ηλεκτρικές μοίρες.

Έτσι ο συνολικός συντελεστής τυλίγματος είναι:

$$K_w = K_d \cdot K_p \quad (2.3)$$

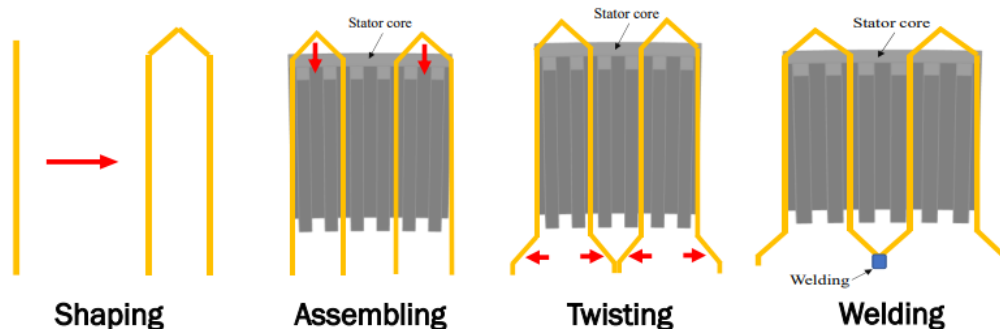
2.4 ΤΥΛΙΓΜΑ ΤΥΠΟΥ ΦΟΥΡΚΕΤΑΣ (HAIRPIN WINDING)

Σε αντίθεση με τα συμβατικά τυλίγματα με πολλαπλές σπείρες ανά αύλακα, τα Ηαιρπιν ωινδινγκς (τυλίγματα μπάρας σε σχήμα U) παρουσιάζουν σημαντικούς περιορισμούς στην τοποθέτηση και στον τρόπο κατανομής τους.

2.4.1 Διαδικασία Παραγωγής

Υπάρχουν δύο βασικές τεχνικές εισαγωγής των ηαίρπιν αγωγών στο στάτη

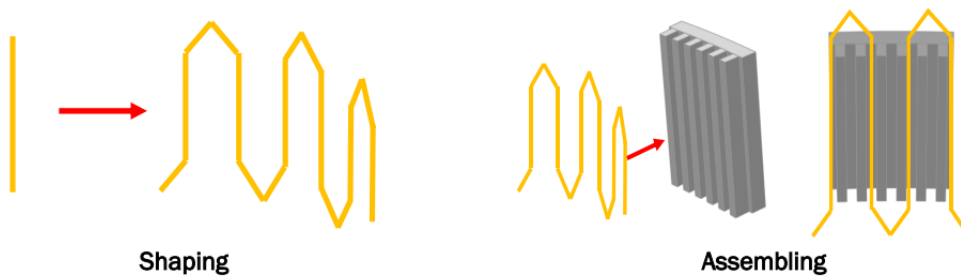
- Αξονική (axial) Εισαγωγή



Σχήμα 2.8: Αξονική εισαγωγή τυλίγματος [6]

Στην περίπτωση της αξονικής εισαγωγής, οι αγωγοί σε σχήμα “U” τοποθετούνται κατά μήκος του άξονα του στάτη και στη συνέχεια οι άκρες τους συγκολλούνται ώστε να σχηματιστούν τα πλήρη πηνία. Η συγκόλληση αυτή είναι απαραίτητη για τη σύνδεση μεταξύ διαφορετικών hairpin και απαιτεί ακρίβεια και χρόνο. Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των αγωγών και των στρώσεων τυλίγματος, η διαδικασία γίνεται όλο και πιο χρονοβόρα και πολύπλοκη. Έτσι, ένα πρακτικό ανώτατο όριο για αυτή τη μέθοδο φαίνεται να είναι περίπου 72 αύλακες με έως 8 στρώσεις τυλίγματος, πέραν των οποίων η κατασκευή γίνεται δυσχερής.

- Ακτινική (radial) Εισαγωγή



Σχήμα 2.9: Ακτινική εισαγωγή τυλίγματος [6]

Στην ακτινική εισαγωγή χρησιμοποιούνται προδιαμορφωμένοι αγωγοί που εισέρχονται ακτινικά μέσα στις αύλακες και σχηματίζουν συνεχόμενα πηνία χωρίς την ανάγκη συγκόλλησης μεταξύ τους — εξού και η ονομασία συνεχής

φουρκέτα "continuous hairpin". Η μέθοδος αυτή καθιστά ευκολότερη την υλοποίηση τυλιγμάτων με μεγαλύτερο αριθμό αύλακων και στρώσεων, με την πράξη να δείχνει ότι είναι εφικτά έως και 10-12 στρώσεις τυλίγματος. Ωστόσο, η συγκεκριμένη προσέγγιση απαιτεί ανοιχτή γεωμετρία αύλακας, γεγονός που επηρεάζει τον σχεδιασμό του στάτη και μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη μαγνητική απόδοση ή την κατακράτηση των τυλιγμάτων.

2.4.2 Κανόνες Σχεδίασης Τυλιγμάτων Τύπου Φουρκέτας

Η σχεδίαση τυλιγμάτων του τύπου αυτού διέπεται από αυστηρούς κανόνες προκειμένου να διασφαλιστεί η συμμετρική λειτουργία της μηχανής και να ελαχιστοποιηθούν ανεπιθύμητες επιδράσεις, όπως ανομοιομορφίες στην τάση και στην κατανομή των ρευμάτων. Οι σημαντικότεροι από αυτούς συνοψίζονται παρακάτω:

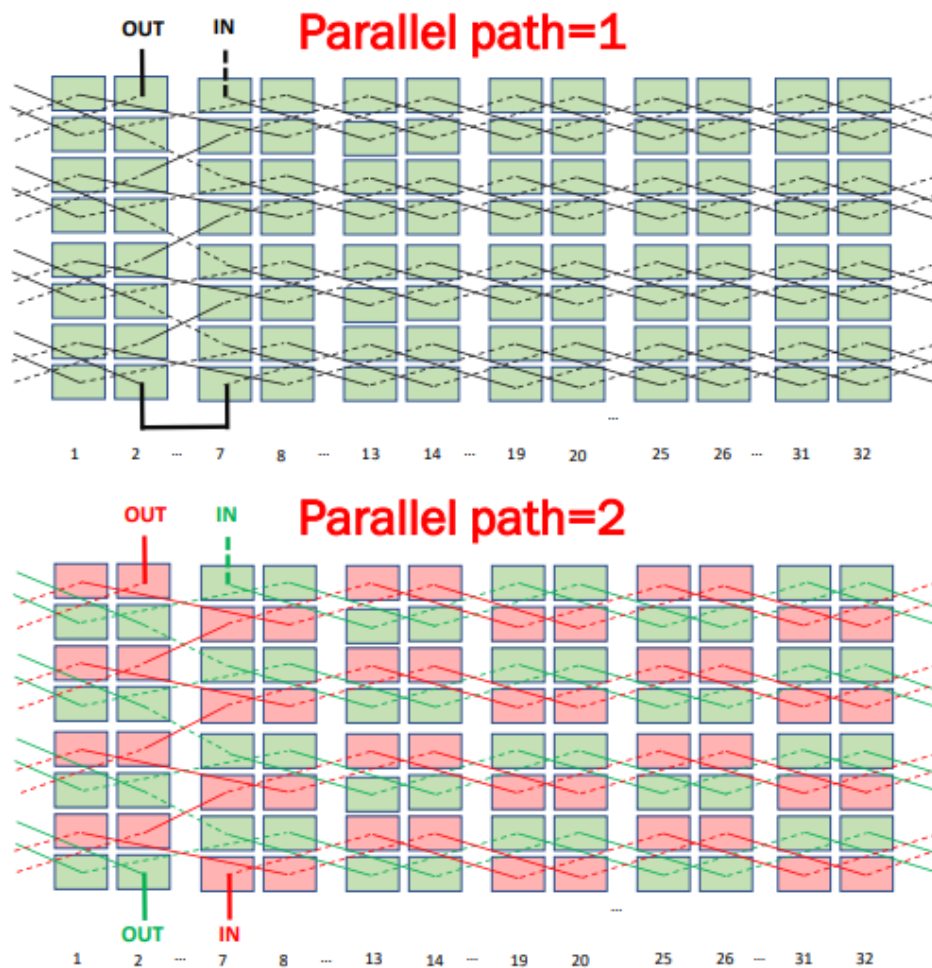
- Ο αριθμός των στρώσεων τυλίγματος πρέπει να είναι άρτιος. Ο παραπάνω κανόνας είναι απαραίτητος αφού είναι lap winding

- Οι αγωγοί που ανήκουν στην ίδια διαδρομή (path) πρέπει να καλύπτουν όλες τις στρώσεις της αύλακας

Αυτός ο κανόνας εξασφαλίζει ότι κάθε διαδρομή έχει την ίδια σύννηετη αντίσταση. Αν μια διαδρομή "αγγίζει" μόνο τις εξωτερικές ή τις εσωτερικές στρώσεις, θα έχει διαφορετική απόσταση από το διάκενο από τις υπόλοιπες και συνεπώς διαφορετική αυτεπαγωγή, κάτι που προκαλεί ανισοκατανομή ρεύματος μεταξύ παράλληλων διαδρομών και αυξημένες απώλειες.

- Οι αγωγοί που ανήκουν στην ίδια διαδρομή πρέπει να καλύπτουν όλα τα αυλάκια ανά πόλο για κάθε φάση

Αυτός ο κανόνας αποσκοπεί στην εξισορρόπηση της επαγόμενης ηλεκτρεγερτικής δύναμης (Back - EMF). Αν οι διαδρομές κάθε φάσης δεν καλύπτουν το ίδιο εύρος αυλακώσεων, τότε οι αγωγοί "βλέπουν" διαφορετικό χρονικό προφίλ του μαγνητικού πεδίου — ιδιαίτερα στις άκρες του πόλου — οδηγώντας σε ανισόρροπες τάσεις και επιβαρυντική κυκλοφορία ρευμάτων (circulating currents) μεταξύ των παράλληλων αγωγών. [4]



Σχήμα 2.10: Κατανομή τυλίγματος [4]

Σημείωση: Όταν αναφερόμαστε σε “στρώματα” (layers) στο πλαίσιο του τυλίγματος φουρκέτας, εννοούμε τον αριθμό των αγωγών της ίδιας φάσης που τοποθετούνται καθ’ ύψος στην ίδια αύλακα slot. Αυτό δεν πρέπει να συγχέεται με τη διάταξη των αγωγών σε διαφορετικές αύλακες με κλασματικό βήμα (fractional pitch), όπου η κάθε στροφή του πηνίου καταλαμβάνει διαφορετικές αύλακες για τη μείωση των αρμονικών της μαγνητεγερτικής δύναμης. Εδώ τα στρώματα αφορούν την κατακόρυφη τοποθέτηση αγωγών της ίδιας διαδρομής (parallel path) εντός της ίδιας αύλακας για λόγους συμμετρίας επαγωγών και ισοκατανομής ρεύματος.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιλέγεται η χρήση κατανεμημένου τυλίγματος πλήρους βήματος (full-pitch distributed winding) για την υλοποίηση του τυλίγματος. Ο λόγος είναι ότι η εφαρμογή κλασματικού βήματος (fractional slot winding), αν

και μπορεί να προσφέρει πλεονεκτήματα στην απόσβεση αρμονικών, καθιστά την κατασκευή τυλίγματος τύπου φουρκέτας εξαιρετικά δύσκολη. Αυτό συμβαίνει επειδή, λόγω των αυστηρών κανόνων σχεδιασμού, απαιτείται οι σπείρες να κατανέμονται συμμετρικά σε όλες τις θέσεις μέσα στις αύλακες. Η απαίτηση αυτή, σε συνδυασμό με τη γεωμετρική ακαμψία των hairpins, τονίζει τη δυσκολία υλοποίησης πιο περίπλοκων σχεδίων όπως τα fractional-slot windings.

2.5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Ο σχεδιασμός και η απόδοση ενός ηλεκτρικού κινητήρα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα υλικά που επιλέγονται για την κατασκευή των βασικών του στοιχείων. Κάθε υλικό φέρει διαφορετικές μαγνητικές, ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες, οι οποίες επηρεάζουν κρίσιμους παράγοντες, όπως η ροπή, οι απώλειες, η απόδοση και η ικανότητα ψύξης του κινητήρα.

Η μαγνητική συμπεριφορά των υλικών παίζει καθοριστικό ρόλο, ειδικά στα στοιχεία του στάτη και του δρομέα. Για τον σκοπό αυτό, επιλέγονται υλικά με υψηλή σχετική μαγνητική διαπερατότητα, όπως οι ηλεκτρικές λαμαρίνες πυριτίου, οι οποίες ελαχιστοποιούν τις απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων. Αντίστοιχα, οι μόνιμοι μαγνήτες που χρησιμοποιούνται στον δρομέα αποτελούνται από υλικά σπάνιων γαιών, όπως το νεοδύμιο, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλή μαγνητική ενέργεια και ισχυρή μαγνήτιση.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα βασικά υλικά που χρησιμοποιούνται για τη μαγνητική δομή του κινητήρα, καθώς και τα κύρια χαρακτηριστικά τους, ώστε να αιτιολογηθεί η επιλογή τους με βάση τις απαιτήσεις του εκάστοτε σχεδιασμού.

Η μαγνητική συμπεριφορά κάθε υλικού εξαρτάται από τη τιμή της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας του. Η σχετική μαγνητική διαπερατότητα είναι ένα μέγεθος το οποίο προσδιορίζει το πόσο εύκολα μπορεί ένα υλικό να μαγνητιστεί σε σχέση με το κενό :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.4)$$

Όπου :

- μ η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού
- $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

Η τιμή της μαγνητικής διαπερατότητας επίσης μπορεί να αντληθεί και από την καμπύλη μαγνήτισης του μαγνητικού υλικού. Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να γίνει διάκριση μεταξύ της απόλυτης (absolute) και της διαφορικής (incremental) διαπερατότητας. Κοιτώντας την καμπύλη BH η απόλυτη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού

για ένα σημείο φόρτισης είναι ο λόγος της μαγνητικής επαγωγής και της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο σημείο αυτό. Η διαφορική μαγνητική διαπερατότητα, δηλώνει την κλίση της εφαπτομένης της καμπύλης BH στο σημείο αυτό.

$$\mu_{abs} = \frac{B}{H} \quad (2.5)$$

$$\mu_{inc} = \frac{dB}{dH} \quad (2.6)$$

Η διαφορική μαγνητική διαπερατότητα αποδεικνύεται πολλές φορές μέγεθος χρησιμότερο σε σχέση με την απόλυτη μαγνητική διαπερατότητα αφού μας δίνει πληροφορία για το πόσο αλλάζει η πυκνότητα της μαγνητικής ροής στο υλικό, με αλλαγή στην ένταση του μαγνητικού πεδίου. Έτσι από το μέγεθος της διαφορικής μαγνητικής διαπερατότητας μπορούμε να καταλάβουμε αν βρισκόμαστε στην περιοχή του κορεσμού όπου περαιτέρω αύξηση του επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου δεν οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση της πυκνότητας της μαγνητικής ροής και επομένως δεν είναι συμφέρουσα.

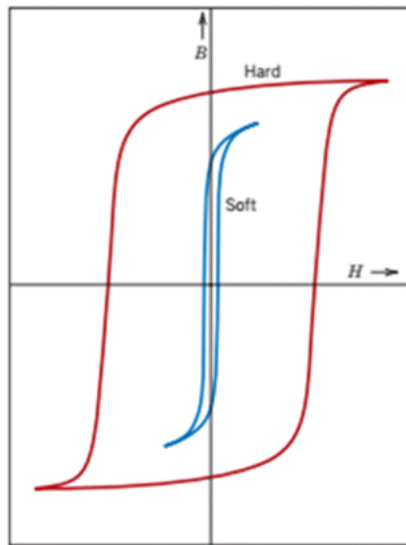
Τα σιδηρομαγνητικά υλικά διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- **Τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά**

Τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά, μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα.

- **Τα σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά**

Αντίθετα, τα σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά, όπως για παράδειγμα οι μαγνήτες νεοδυμίου, σιδήρου και βαρίου (NdFeB), δεν απομαγνητίζονται εύκολα, και διατηρούν τις μαγνητικές τους ιδιότητες σχηματίζοντας μόνιμους μαγνήτες.



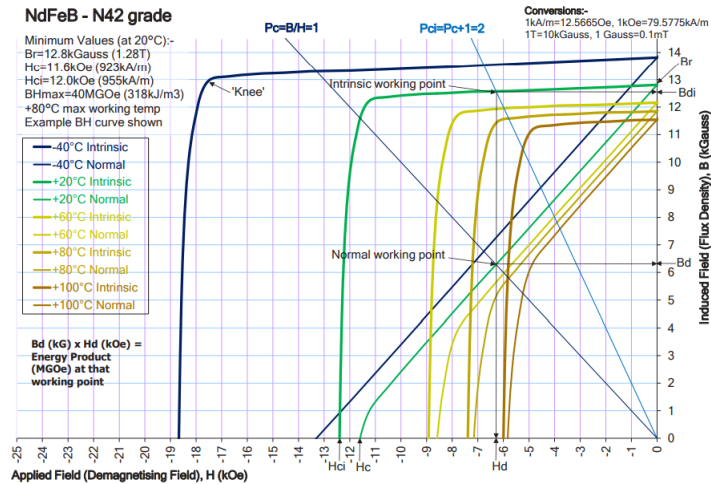
Σχήμα 2.11: Καμπύλες Μαγνήτισης Σκληρού και Μαλακού Σιδηρομαγνητικού Υλικού [7]

Όπως φαίνεται και στο σχήμα (2.11) τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά χαρακτηρίζονται από χαμηλό παραμένοντα μαγνητισμό. Αυτό σημαίνει ότι όταν η ένταση του μαγνητικού πεδίου μηδενιστεί, η μαγνητική επαγωγή μειώνεται δραστικά και τείνει προς το μηδέν. Η καμπύλη μαγνήτισης αυτών των υλικών εμφανίζει γραμμική συμπεριφορά μέχρι ένα ορισμένο επίπεδο έντασης του πεδίου, γεγονός που επιτρέπει την προσέγγιση της μαγνητικής διαπερατότητας ως σταθερής εντός αυτού του εύρους. Επιπλέον, λόγω της μεγάλης κλίσης της καμπύλης, ο βρόχος υστέρησης είναι πολύ στενός, άρα και οι απώλειες υστέρησης είναι περιορισμένες. Για τους λόγους αυτούς, τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά αποτελούν την κύρια επιλογή για την κατασκευή των μαγνητικών πυρήνων του στάτη και του δρομέα σε ηλεκτρικές μηχανές.

Σε εφαρμογές με περιορισμένες απαιτήσεις απόδοσης, είναι δυνατή η χρήση συμπαγούς σιδήρου ως υλικό για τον στάτη και τον δρομέα. Ωστόσο, λόγω της εμφάνισης δινορρευσμάτων στο εσωτερικό του υλικού τα οποία προκαλούν σημαντικές απώλειες η πρακτική αυτή αποφεύγεται. Αντ' αυτού, ο πυρήνας κατασκευάζεται από λεπτές ηλεκτρικές λαμαρίνες, μονωμένες μεταξύ τους, ώστε να περιορίζεται η αγώγιμη διαδρομή των δινορρευσμάτων και, κατά συνέπεια, οι σχετικές απώλειες.

Τα σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά, από την άλλη, παρουσιάζουν υψηλές τιμές παραμένοντος μαγνητισμού και μεγάλη αντίσταση στην απομαγνήτιση. Αυτή η ιδιότητα τα καθιστά κατάλληλα για χρήση ως μόνιμοι μαγνήτες σε ηλεκτρικές μηχανές, καθώς μπορούν να διατηρούν ισχυρό μαγνητικό πεδίο χωρίς συνεχή εξωτερική διέγερση.

2.5.1 Απομαγνήτιση Σκληρών Μαγνητικών Υλικών



Σχήμα 2.12: Καμπύλες Απομαγνήτισης στο Δεύτερο Τεταρτημόριο Μαγνήτη N42 [8]

Όπως προαναφέρθηκε, τα σκληρά μαγνητικά υλικά επιλέγονται για χρήση μόνιμων μαγνητών λόγω της υψηλής παραμένουσας μαγνήτισής τους, δηλαδή την μαγνήτιση τους αφού απομακρυνθεί από αυτά το εξωτερικά επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Σε πρακτικές εφαρμογές, οι μαγνήτες είναι ήδη μαγνητισμένοι, οπότε μας ενδιαφέρει περισσότερο η συμπεριφορά της καμπύλης μαγνήτισης του μαγνήτη στο δεύτερο τεταρτημόριο.

Στο συγκεκριμένο τεταρτημόριο, το επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο από τα τυλίγματα του στάτη, (H) τείνει να αντιστρέψει την μαγνήτιση του μαγνήτη, οδηγώντας πολλές φορές σε μερική ή ολική απομαγνήτιση. Για τη μελέτη του φαινομένου αυτού δύο καμπύλες αποκτούν ιδιαίτερη σημασία.

- **Η κανονική καμπύλη απομαγνήτισης (Normal Curve)**

Η κανονική καμπύλη περιγράφει τη συνολική μαγνητική επαγωγή:

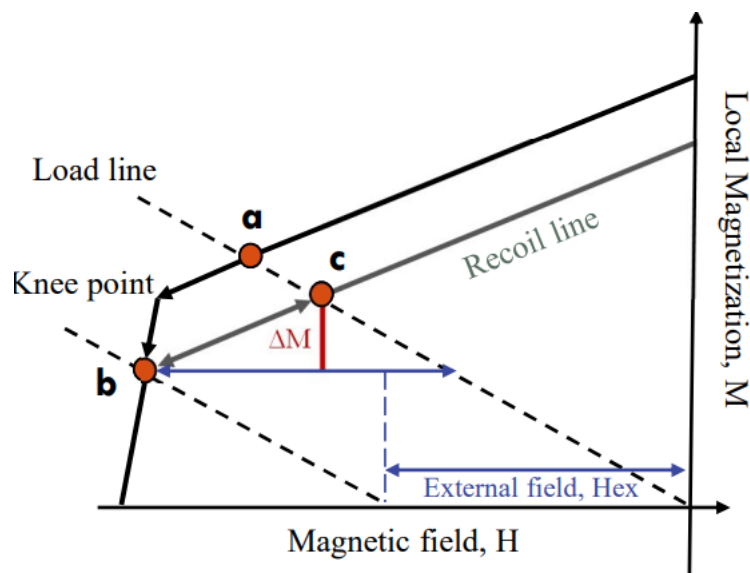
$$B = \mu_0(H + M) \quad (2.7)$$

Περιγράφει δηλαδή το συνδυασμένο αποτέλεσμα του εξωτερικού πεδίου και της εσωτερικής μαγνήτισης του υλικού.

- **Η ενδογενής καμπύλη απομαγνήτισης (Intrinsic Curve)**

Η ενδογενής Καμπύλη αντίθετα παρουσιάζει την επίδραση του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου στην εσωτερική μαγνήτιση του υλικού (M-H Καμπύλη ή J-H καμπύλη).

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα οι καμπύλες αυτές είναι χαρακτηριστικές για το κάθε υλικό και είναι διαφορετικές ανάλογα με την θερμοκρασία στην οποία εκτίθεται το υλικό. Η τιμή που μας ενδιαφέρει για την αποφυγή της απομαγνήτισης είναι το γόνατο της ενδογενούς καμπύλης. Αν ο μαγνήτης εκτεθεί σε τιμές αντίθετου μαγνητικού πεδίου ώστε να οδηγήσουν τον μαγνήτη κάτω από το γόνατο (Knee στο σχήμα 2.12) ο μαγνήτης τείνει μετά την απομάχρυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου να επιστρέψει ξανά στη θέση $H=0$ ακολουθώντας την κλίση που είχε η καμπύλη πριν το γόνατο. Έτσι αν εκθέσουμε τον μαγνήτη σε αρκετά ισχυρό αντίθετο μαγνητικό πεδίο ώστε να τον οδηγήσουμε μετά το γόνατο, η παραμένουσα μαγνήτιση του θα είναι μειωμένη. Ενδιαφέρον έχει και η τιμή του Intrinsic Coercivity (H_{ci}) όπου είναι η τιμή πέρα από την οποία ο μαγνήτης βρίσκεται σε κατάσταση ολικής απομαγνήτισης και δεν έχει δηλαδή καθόλου παραμένουσα μαγνήτιση. [5]



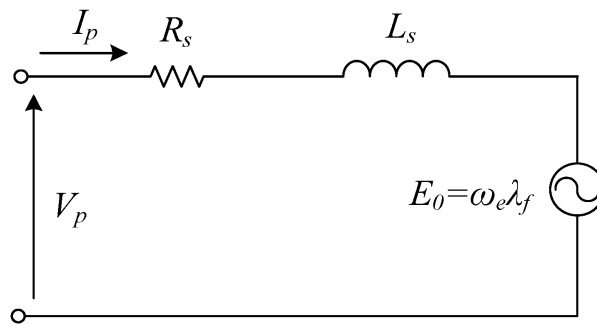
Σχήμα 2.13: Γραμμή Επαναφοράς (Recoil Line) Μόνιμου Μαγνήτη

2.6 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ - ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ dq ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

Η ανάλυση και μοντελοποίηση μιας σύγχρονης μηχανής απαιτεί την κατανόηση της δυναμικής της συμπεριφοράς τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στη συχνότητα. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται ένα ισοδύναμο κύκλωμα ανά φάση καθώς και ο μετασχηματισμός Park, ο οποίος επιτρέπει την αναπαράσταση των μεταβαλλόμενων τριφασικών μεγεθών σε ένα ακίνητο ή περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς δύο διαστάσεων

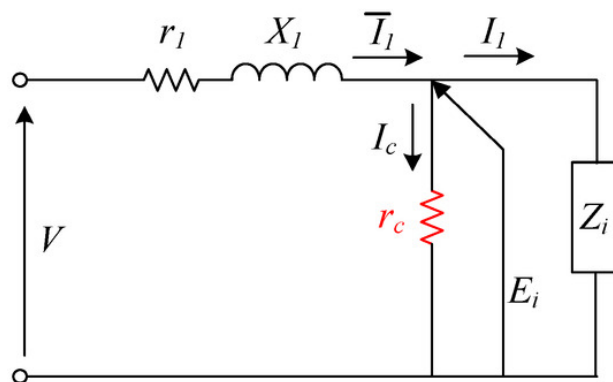
2.6.1 Ισοδύναμο Κύκλωμα Σύγχρονης Μηχανής

Το απλούστερο εργαλείο για την ανάλυση της συμπεριφοράς της σύγχρονης μηχανής είναι το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα της:



Σχήμα 2.14: Ισοδύναμο Κύκλωμα Σύγχρονης Μηχανής [9]

Στο σχήμα 2.14 μπορούμε να διακρίνουμε την ανά φάση ισοδύναμη αντίσταση R_a την φασική αυτεπαγωγή L_s ενώ τέλος διακρίνουμε την ΗΕΔ διεγέρσεως. Ωστόσο στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής θα χρησιμοποιηθεί μια εξελιγμένη μορφή του ισοδύναμου κυκλώματος στο οποίο λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις των απωλειών πυρήνα και του μέρους της αντίστασης τυλίγματος που αφορούν τις απώλειες λόγω της χρήσης εναλλασσόμενης τάσης - ρεύματος. Το ισοδύναμο κύκλωμα αυτό φαίνεται παρακάτω :



Σχήμα 2.15: Ισοδύναμο Κύκλωμα Σύγχρονης Μηχανής Με Απώλειες Πυρήνα [9]

Ουσιαστικά το 'βελτιωμένο' αυτό ισοδύναμο κύκλωμα είναι ίδιο με αυτό που παρουσιάστηκε προηγουμένως με την μόνη διαφορά ότι έχει προστεθεί ένας παράλληλος

κλάδος της αντίστασης απωλειών πυρήνα R_c και ότι πλέον η ανα φάση αντίσταση είναι το άθροισμα της ωμικής αντίστασης και της αντίστασης εναλλασσόμενου ρεύματος (AC Resistance) συνιστώσα η οποία προέρχεται απο το επιδερμικό φαινόμενο και το φαινόμενο γειτνίασης στην επιφάνεια του τυλίγματος. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι ένα μικρό ποσοστό ρευμάτων (I_c) δεν χρησιμοποιείται στην έξοδο για παραγωγή ισχύος ροπής, αλλά 'σπαταλάται' στις απώλειες του πυρήνα. Η αντίσταση r_c στην πραγματικότητα δεν είναι σταθερή για όλα τα σημεία λειτουργίας της μηχανής αλλά μεταβλητή, ανάλογα με το ρεύμα και την ταχύτητα του σημείου λειτουργίας.

2.6.2 Μετασχηματισμός dq Σύγχρονης Μηχανής

Η περιγραφή των τριφασικών μεγέθων μιας σύγχρονης μηχανής, είναι συχνά μια διαδικασία πολύπλοκη και χρονοβόρα αφού εμπεριέχει διαφορικές εξισώσεις με μεταβαλλόμενα ρεύματα και τάσεις. Εδώ είναι χρήσιμος ο μετασχηματισμός dq. Ο μετασχηματισμός dq γνωστός και ως μετασχηματισμός Park επιτρέπει την αναπαράσταση όλων των τριφασικών μεγεθών που ανήκουν στις φάσεις a,b,c σε δύο σταθερές συνιστώσες, οι οποίες στρέφονται σύγχρονα με τα πεδία του στάτη και του δρομέα. Οι δύο άξονες αυτοί ονομάζονται ευθύς (Direct), είναι ο άξονας ευθυγραμμισμένος με το πεδίο του δρομέα και ορθός (Quadrature) ο οποίος είναι ο άξονας κάθετος στον d. Με τον τρόπο αυτό:

- Οι μεταβαλλόμενες τριφασικές τάσεις και ρεύματα μετατρέπονται σε σταθερά DC μεγέθη στο σύστημα αναφοράς του δρομέα.
- Απλοποιείται η δυναμική ανάλυση του κινητήρα και επιτρέπεται ο ευκολότερος έλεγχος του.

Στην πραγματικότητα ο μετασχηματισμός αποτελείται από δύο βασικά στάδια:

1. Τον μετασχηματισμό Clarke. ($abc \rightarrow \alpha\beta$) Ο μετασχηματισμός είναι :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

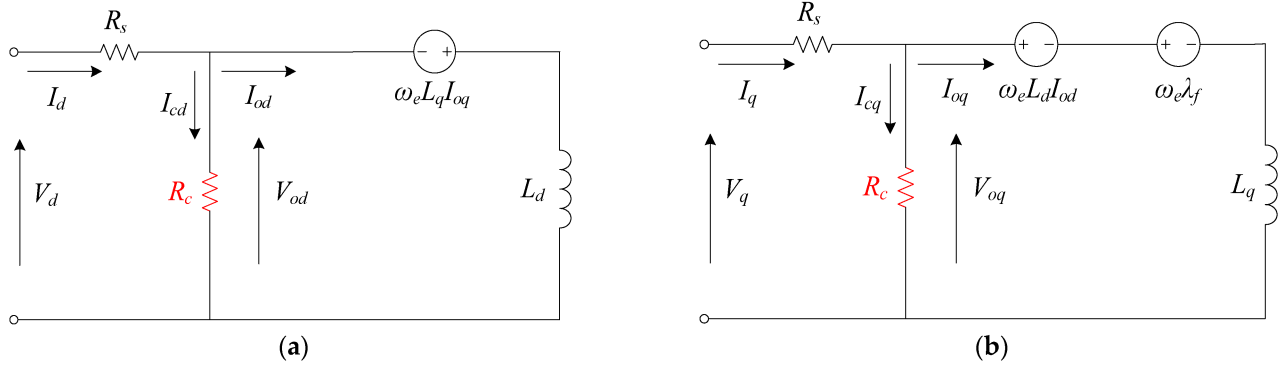
2. Τον μετασχηματισμό Park. Ο μετασχηματισμός είναι :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

Όπου $\theta = \frac{P}{2} \cdot \theta_m$ είναι η ηλεκτρική γωνία του δρομέα σε σχέση με τον άξονα της φάσης α.

2.6.3 Ισοδύναμο Κύκλωμα Στο Πλαίσιο d-q

Γίνεται επομένως η μετατροπή του ισοδύναμου κυκλώματος του σχήματος 2.15 στο σύστημα dq.



Σχήμα 2.16: Ισοδύναμο Κύκλωμα Σύγχρονης Μηχανής με Απώλειες Πυρήνα στο Σύστημα dq [9]

Οι θεμελιώδεις κυκλωματικές σχέσεις της μηχανής που ισχύουν στο dq πλαίσιο είναι :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{od} \\ V_{oq} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\begin{bmatrix} V_{od} \\ V_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_e L_d \\ -\omega_e L_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{od} \\ I_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \lambda_f \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{od} \\ I_{oq} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\begin{bmatrix} I_{od} \\ I_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_{cd} \\ I_{cq} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\begin{bmatrix} I_{cd} \\ I_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\omega_e L_q I_{oq}}{R_c} \\ \frac{\omega_e (L_d I_{od} + \lambda_f)}{R_c} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Τέλος αξίζει να σημειωθεί και ο τύπος υπολογισμού της ροπής στο πλαίσιο dq :

$$\begin{aligned} T_{dq} &= \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (\lambda_d I_q - \lambda_q I_d) \rightarrow \\ &= \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot ([\Lambda_m + L_d I_d] \cdot I_q - \Lambda_q I_q I_d) \rightarrow \\ &= \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \Lambda_m \cdot I_q + (L_d - L_q) \cdot I_d I_q \end{aligned} \quad (2.12)$$

Στην εξίσωση 2.12 παρατηρούμε το άθροισμα δύο όρων :

- Ο πρώτος όρος είναι ο όρος της ηλεκτρομαγνητικής ροπής ο οποίος οφείλεται στην αλληλεπίδραση του πεδίου του στάτη και του δρομέα.
- Ο δεύτερος όρος αφορά τη ροπή εκτυπότητας (ή ροπή ευθυγράμμισης), η οποία οφείλεται στην τάση των μαγνητικών γραμμών να ακολουθούν τη διαδρομή με τη μικρότερη μαγνητική αντίσταση. Η συνεισφορά της είναι σημαντική κυρίως σε μηχανές με ανισοτροπία επαγωγών, ενώ σε μηχανές με επιφανειακούς μαγνήτες είναι συνήθως αμελητέα. ($L_d \simeq L_q$)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Η μελέτη της απόδοσης μιας σύγχρονης ηλεκτρικής μηχανής απαιτεί την ακριβή εξαγωγή βασικών ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών, όπως η παραγόμενη ροπή, οι απώλειες, η πυκνότητα ροής, καθώς και τα διανυσματικά μεγέθη στο επίπεδο του δρομέα και του στάτη. Η εξαγωγή αυτών των μεγεθών δεν μπορεί να γίνει αναλυτικά με υψηλή ακρίβεια, ιδιαίτερα σε τοπολογίες πολύπλοκης γεωμετρίας και με μη γραμμικά μαγνητικά υλικά.

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη μοντελοποίηση και την αριθμητική προσομοίωση της ηλεκτρικής μηχανής, καθώς και η διαδικασία εξαγωγής των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών της μέσω της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEA). Παρουσιάζεται ο παραμετρικός ορισμός της γεωμετρίας, οι παραδοχές που λαμβάνονται κατά τη διαδικασία προσομοίωσης, καθώς και τα μεγέθη που καταγράφονται ή υπολογίζονται, όπως οι μαγνητικές ροές, τα κυκλώματα διέγερσης, οι ροπές και οι απώλειες. Όλη η διαδικασία υλοποιείται μέσω παραμετρικού μοντέλου που έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον MATLAB και αλληλεπιδρά με το λογισμικό FEMM, αυτοματοποιώντας τη δημιουργία γεωμετρίας, την ανάθεση υλικών, το Post-Processing και τελικά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

3.1 ΜΑΓΝΗΤΟΣΤΑΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Τα μαγνητοστατικά προβλήματα ανήκουν στην κατηγορία των στατικών ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων, όπου οι χρονικές μεταβολές παραλείπονται ($\partial/\partial t = 0$). Υπό αυτές τις συνθήκες, το μαγνητικό πεδίο περιγράφεται από τους νόμους του Μαξγουελ ως:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.2)$$

Η μαγνητική επαγωγή $\mathbf{B}$ σχετίζεται με την ένταση του μαγνητικού πεδίου $\mathbf{H}$ μέσω της μαγνητικής διαπερατότητας μ :

$$\mathbf{B} = \mu(\mathbf{B})\mathbf{H} \quad (3.3)$$

Σε φερρομαγνητικά υλικά, η διαπερατότητα μ δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από το μέτρο του $\mathbf{B}$, οδηγώντας σε μη γραμμική συμπεριφορά, όπως περιγράφεται από τη χαρακτηριστική καμπύλη $B - H$.

Για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων μέσω αριθμητικών μεθόδων, είναι χρήσιμη η εισαγωγή του διανυσματικού μαγνητικού δυναμικού $\mathbf{A}$, ώστε:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (3.4)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση του Ampère, προκύπτει η γενική διαφορική εξίσωση του μαγνητοστατικού προβλήματος:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(|\nabla \times \mathbf{A}|)} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (3.5)$$

Σε περίπτωση γραμμικού και ισότροπου υλικού με σταθερή μ , και εάν το $\mathbf{A}$ έχει μόνο μία μη μηδενική συνιστώσα (π.χ. στον άξονα z), η εξίσωση απλοποιείται στη μορφή Poisson:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} = -\mathbf{J} \quad (3.6)$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί τη βάση για την αριθμητική επίλυση μαγνητοστατικών προβλημάτων με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Η μη γραμμικότητα της διαπερατότητας μ οδηγεί στην ανάγκη επαναληπτικής επίλυσης, όπου η τιμή της μ ενημερώνεται σε κάθε βήμα μέχρι τη σύγκλιση.

Μέσω της λύσης του προβλήματος εξάγονται κρίσιμα μαγνητικά μεγέθη, όπως η κατανομή της επαγωγής $\mathbf{B}$, οι μαγνητικές ροές και οι μαγνητικές απώλειες, τα οποία αποτελούν θεμελιώδη στοιχεία για την περαιτέρω ανάλυση της ροπής και της απόδοσης της ηλεκτρικής μηχανής.

3.1.1 Ανάλυση Μαγνητοστατικής με Πεπερασμένα Στοιχεία

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η λύση των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν το πρόβλημα στο σύνολο της γεωμετρίας κατευθείαν, είναι εξαιρετικά πολύπλοκη ακόμη και αν οι διαφορικές εξισώσεις είναι μικρές. Ο λόγος ύπαρξης της δυσκολίας αυτής είναι η σύνθετη γεωμετρία που χαρακτηρίζει το πρόβλημα. Έτσι η γεωμετρία αυτή χωρίζεται σε μικρότερες γεωμετρίες (στοιχεία) συνήθως τριγωνικού σχήματος, τα οποία αν και περισσότερα σε αριθμό κάνουν πολύ εύκολη την λύση των διαφορικών. Στη συνέχεια, οι λύσεις σε κάθε στοιχείο συντίθενται για να βρεθεί η συνολική λύση του προβλήματος.

Στην παρούσα εργασία, ασχολούμαστε με προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής φύσεως, ενώ όλη η εξαγωγή των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών των μηχανών γίνεται μέσω αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων της μαγνητοστατικής. Συγκεκριμένα, υιοθετείται μια προσέγγιση βασισμένη σε στιγμιότυπα (snapshots) μαγνητοστατικής φύσεως, αγνοώντας χρονικά μεταβαλλόμενα φαινόμενα και επαγωγές. Η ανάλυση βασίζεται στη χρήση του προγράμματος FEMM, το οποίο επιλύει τις εξισώσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) και εφαρμόζει επαναληπτικές μεθόδους για την εύρεση συνεπών λύσεων στο διανυσματικό δυναμικό A , λαμβάνοντας υπόψη τη μη-γραμμικότητα της μαγνητικής διαπερατότητας των υλικών. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει υψηλή ακρίβεια στα αποτελέσματα, χωρίς την υπολογιστική επιβάρυνση μιας πλήρους χρονικής (transient) επίλυσης.

3.1.2 Οριακές συνθήκες - Συμμετρία

Για την επίτευξη των στόχων της παρούσας εργασίας, απαιτείται η σχεδίαση και ανάλυση ενός μεγάλου αριθμού ηλεκτρικών μηχανών. Επομένως, καθίσταται κρίσιμη η ανάγκη ελαχιστοποίησης των υπολογιστικών πόρων που απαιτούνται για την προσομοίωση κάθε εξεταζόμενης περίπτωσης. Για τον σκοπό αυτό, αξιοποιείται η συμμετρία της μηχανής ώστε να αποφεύγεται η σχεδίαση της πλήρους γεωμετρίας, επιτρέποντας τη μοντελοποίηση μόνο του ελάχιστου απαιτούμενου γεωμετρικού τμήματος.

Συγκεκριμένα, αντί να αναπαρίσταται ολόκληρη η τοπολογία της μηχανής, επιλύεται

μόνο ένα συμμετρικό τμήμα της, το οποίο είναι αρκετό για να περιγράψει με ακρίβεια τη συνολική της λειτουργία. Το ελάχιστο αυτό γεωμετρικό τμήμα ορίζεται από το κλάσμα:

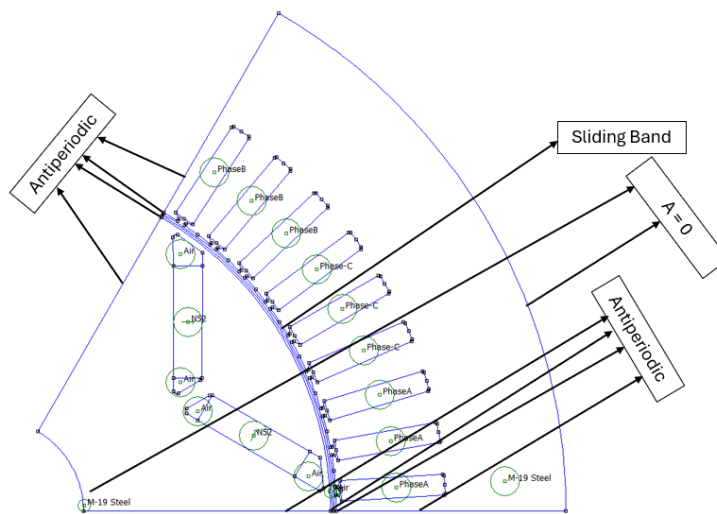
$$\frac{1}{\text{GCD}(N_{\text{πόλων}}, N_{\text{αυλάκων}})}$$

όπου **GCD - ΜΚΔ** είναι ο Μέγιστος Κοινός Διαιρέτης του πλήθους των πόλων και των αυλάκων της μηχανής.

Ανάλογα με τη θέση στο μοντέλο και τη φυσική περιοχή (στάτης, δρομέας, διάκενο), εφαρμόζονται κατάλληλες συνοριακές συνθήκες ώστε να αναπαρασταθεί η πραγματική λειτουργία της μηχανής:

- **Συνθήκη Dirichlet** ($A = 0$): Εφαρμόζεται στην εξωτερική επιφάνεια του στάτη και στον άξονα του δρομέα, αναπαριστώντας τις ηλεκτρομαγνητικά γειωμένες περιοχές.
- **Περιοδικές συνοριακές συνθήκες**: Χρησιμοποιούνται όταν προσομοιώνεται ζυγός αριθμός πόλων, ώστε να διατηρηθεί η περιοδικότητα του μαγνητικού πεδίου μεταξύ των άκρων της γεωμετρίας.
- **Αντιπεριοδικές συνοριακές συνθήκες**: Εφαρμόζονται όταν προσομοιάζεται μονός αριθμός πόλων, εξασφαλίζοντας την αντισυμμετρική κατανομή του διανυσματικού δυναμικού στο μοντέλο.
- **Ζώνη Ολίσθησης (Sliding Band)**: Πρόκειται για μια ειδική περιοδική συνθήκη που εφαρμόζεται σε μια κυκλική περιοχή εντός του διακένου ανάμεσα στον στάτη και τον δρομέα. Μέσω αυτής της συνθήκης, καθίσταται δυνατή η προσομοίωση της σχετικής περιστροφής του δρομέα χωρίς την ανάγκη επαναδημιουργίας του πλέγματος για κάθε νέα θέση.

Η παραπάνω μεθοδολογία προσφέρει σημαντική μείωση στον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο και μνήμη, ενώ διατηρεί υψηλή ακρίβεια στην ηλεκτρομαγνητική ανάλυση κάθε γεωμετρίας.



Σχήμα 3.1: Συμμετρία - Περιοδικές Συνθήκες σε Μηχανή 6 Πόλων - 48 Αυλάκων

Η χρήση συνοριακών συνθηκών όχι μόνο απλοποιεί τη διαδικασία προσομοίωσης εξορίζοντας την ανάγκη για πλήρη μοντελοποίηση του ρότορα σε κάθε θέση, αλλά προσφέρει και εντυπωσιακά οφέλη στην υπολογιστική απόδοση.



Σχήμα 3.2: Στοιχεία πλέγματος σε (α) Πλήρη Γεωμετρία και (β) Μειωμένη Γεωμετρία

Για Παράδειγμα στο Σχήμα 3.2, ο αριθμός των στοιχείων του πεπερασμένου πλέγματος μειώνεται δραστηκώς — από περίπου 111.120 σε μόλις 18.000.

3.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

Για την επίτευξη του σκοπού της εργασίας, θα χρειαστεί η σχεδίαση και ανάλυση ενός μεγάλου αριθμού μηχανών. Το γεγονός αυτό καθιστά αναγκαία την παραμετροποίηση των χαρακτηριστικών του στάτη και του δρομέα κάθε μηχανής με σκοπό να παράγεται οποιαδήποτε γεωμετρία, εύκολα και γρήγορα.

Για τη μελέτη και τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών μιας ηλεκτρικής μηχανής, η διαδικασία σχεδίασης διαχωρίζεται σε δύο βασικά βήματα:

- Αρχικά, καθορίζονται οι γεωμετρικές παράμετροι της εγκάρσιας διατομής, δηλαδή η μορφολογία του στάτη και του δρομέα.
- Στη συνέχεια, προσδιορίζεται το ενεργό μήκος του μαγνητικού κυκλώματος, καθώς και ο αριθμός των αγωγών που τοποθετούνται στις αυλάκες του στάτη.

Αυτός ο διαχωρισμός βασίζεται σε δύο θεμελιώδεις παρατηρήσεις:

- Τα αποτελέσματα της μαγνητικής ανάλυσης για μία μονάδα μήκους μπορούν να κλιμακωθούν για οποιοδήποτε επιθυμητό ενεργό μήκος. Αυτό συμβαίνει επειδή το μαγνητικό πεδίο δεν μεταβάλλεται σημαντικά κατά μήκος του άξονα της μηχανής και οι φυσικές ποσότητες που προκύπτουν από τη μετεπεξεργασία, όπως η ροπή, μεταβάλλονται αναλογικά με το ενεργό μήκος.
- Κατά την επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος μέσω μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, το λογισμικό δεν λαμβάνει υπόψη τα ελίγματα ανά αύλακα, αλλά μόνο την πυκνότητα ρεύματος. Συνεπώς, διατηρώντας σταθερή αυτή την πυκνότητα και μεταβάλλοντας τον αριθμό των αγωγών, μπορούν να αξιολογηθούν εναλλακτικές εκδόσεις της ίδιας βασικής γεωμετρίας αλλά με διαφορετικό τύλιγμα.

3.2.1 Παραμετροποίηση Στάτη και Δρομέα

Για την παραμετροποίηση του στάτη και του δρομέα είναι σκόπιμος ο ορισμός κάποιων ανεξάρτητων μεταβλητών, η μεταβολή των οποίων θα μπορούν να δώσουν οποιαδήποτε γεωμετρία εμείς θέλουμε. Παρακάτω είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές που έχουν χρησιμοποιηθεί για την παραμετροποιημένη σχεδίαση του δρομέα και του στάτη.

- Παραμετροποίηση Στάτη

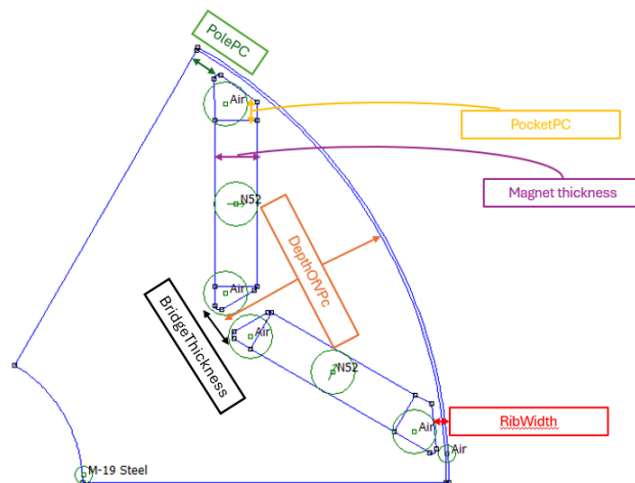
Ανεξάρτητες Μεταβλητές Σχεδίασης Στάτη	
Rso	Εξωτερική Ακτίνα Στάτη
q	Αριθμός αυλάκων ανά πόλο και φάση
Yoke2Tooth	Λόγος του σώματος του στάτη και του πάχους του δοντιού
Tooth2Slot	Ποσοστό πλάτους δοντιού σε σχέση με το συνολικό βήμα αυλάκων
ToothTips	Πλάτος των άκρων δοντιών ως ποσοστό του συνολικού βήματος αύλακας
Tips2Tooth	Ύψος άκρων δοντιού ως ποσοστό του συνολικού μήκους δοντιού
SplitRatio	Λόγος μεταξύ της εσωτερικής ακτίνας με την εξωτερική ακτίνα του στάτη
ToothParallelization	Καθορίζει την κλίση των πλευρών της αύλακας
rEdge	Ακτίνα του fillet στις γωνίες του δοντιού και της αύλακας

Στη συνέχεια μέσω κατάλληλων υπολογισμών, μπορούν να υπολογιστούν όλες οι εξαρτημένες μεταβλητές που χρειάζονται για την σχεδίαση του στάτη.

- **Παραμετροποίηση Δρομέα**

1. **Δρομέας Μονού V**

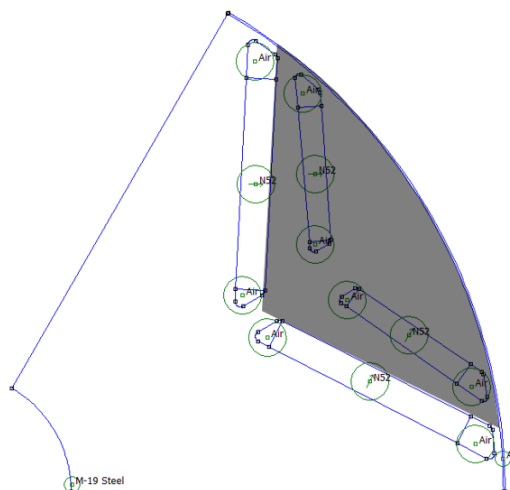
Ανεξάρτητες Μεταβλητές Σχεδίασης Στάτη	
Rri	Εσωτερική Ακτίνα Δρομέα
RibWidth	Απόσταση άκρης μαγνητικής κοιλότητας από το διάκενο
MagnetThickness	Πάχος μαγνητών του δρομέα
BridgeThickness	Απόσταση μεταξύ των μαγνητικών κοιλοτήτων του ίδιου πόλου
DepthOfV	Ορίζει το βάθος της κάτω άκρου των υποδοχών των μαγνητών
PolePC	Ποσοστό κάθε πόλου που επικαλύπτεται από μαγνητικές υποδοχές
PocketPc	Ποσοστό διαθέσιμου χώρου της κάθε υποδοχής που καλύπτεται από τον μαγνήτη
MagnetEdge	Ακτίνα του καμπυλόματος (fillet) στις γωνίες του μαγνήτη



Σχήμα 3.3: Παραμετροποίηση Δρομέα Τύπου Μονού V

2. Δρομέας Διπλού V

Η παραμετροποίηση του διπλού V είναι πανομοιότυπη με αυτή του μονού V με την μόνη διαφορά ότι τα ποσοστά του εσωτερικού V αναφέρονται στην πλέον διαθέσιμη περιοχή, τα όρια της οποίας καθορίζονται από το εξωτερικό V.



Σχήμα 3.4: Με σκούρο χρώμα ο πλέον διαθέσιμος χώρος μετά την τοποθέτηση του μονού V

Αφού ολοκληρωθεί η σχεδίαση της γεωμετρίας του στάτη και του δρομέα, το επόμενο βασικό βήμα είναι η αντιστοίχιση υλικών σε κάθε περιοχή του μοντέλου. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς οι ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών επηρεάζουν άμεσα την απόδοση της μηχανής. Στο FEMM, κάθε περιοχή — είτε πρόκειται για τον πυρήνα του στάτη, το πίσω σίδερο του δρομέα, τους μόνιμους μαγνήτες, το διάκενο ή τα ελίγματα — πρέπει να οριστεί με το κατάλληλο υλικό. Η επιλογή των υλικών καθορίζεται με βάση τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής, όπως η επιθυμητή πυκνότητα ισχύος, η απόδοση, τα θερμικά όρια και το κόστος. Η ορθή αντιστοίχιση υλικών είναι κρίσιμη για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και για την αξιόπιστη αξιολόγηση βασικών χαρακτηριστικών της μηχανής, όπως η κατανομή της μαγνητικής ροής, η ροπή, οι απώλειες στον πυρήνα και ο κίνδυνος απομαγνήτισης.

3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΕ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

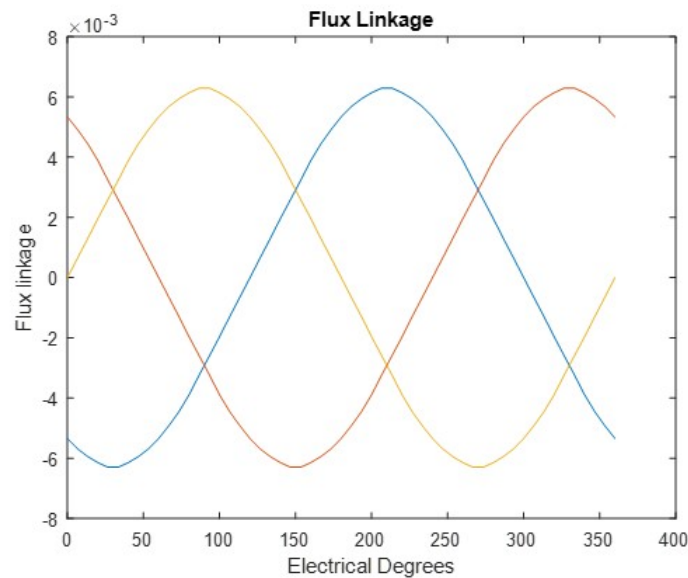
Όπως προαναφέρθηκε, η ανάλυση στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων γίνεται αρχικά ανα μονάδα ενεργού μήκους και για ένα μόνο έλιγμα τοποθετημένο στη κάθε αύλακα. Η επιλογή αυτή γίνεται αφού στη συνέχεια τα μεγέθη που εξάγονται από το λογισμικό ανά μονάδα μήκους, μπορούν να αναχθούν σε οποιοδήποτε ενεργό μήκος ή αριθμό ελιγμάτων επιθυμούμε, κάνοντας διαδικασία ανάλυσης ενός μεγάλου όγκου μηχανών πολύ πιο αποδοτική. Η διαδικασία εξαγωγής όλων των απαραίτητων για τη μετεπεξεργασία, μεγεθών παρουσιάζεται παρακάτω.

3.3.1 Ευθυγράμμιση Μαγνητικού Πεδίου Στάτη, Δρομέα

Η σωστή ανάλυση μιας ηλεκτρικής μηχανής απαιτεί τη μελέτη της σχετικής θέσης του στάτη και του δρομέα. Αρχικά ο d Άξονα του δρομέα και ο άξονας της φάσης A του στάτη (φάση αναφοράς) βρίσκονται σε τυχαία μεταξύ τους θέση αφού η γεωμετρία αρχικά σχεδιάζεται χωρίς συγκεκριμένο προσανατολισμό. Ωστόσο για να λειτουργούμε σε ένα κοινό πλαίσιο αναφοράς, είναι απαραίτητο να ευθυγραμμίσουμε το μαγνητικό πεδίο του στάτη με αυτό του δρομέα. Για τον λόγο αυτό σε κάθε νέα μηχανή που σχεδιάζεται, το πρώτο βήμα είναι η ευθυγράμμιση του d άξονα του μαγνητικού πεδίου του δρομέα με τον άξονα που ορίζει η φάση A του στάτη, εξασφαλίζοντας έτσι ότι το σύστημα βρίσκεται στη θέση αναφοράς $\theta=0$.

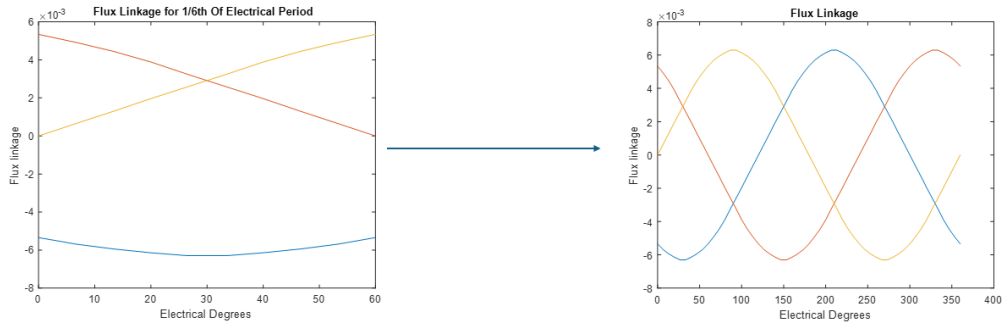
Για την ευθυγράμμιση του μαγνητικού πεδίου απαιτείται η εξαγωγή των πεπλεγμένων ροών των τριών φάσεων του στάτη για μια πλήρη ηλεκτρική περίοδο καθώς ο δρομέας περιστρέφεται σε διαφορετικές γωνίες. Η διαδικασία εξαγωγής της πεπλεγμένης ροής περιγράφεται παρακάτω. Η ανάλυση ολόκληρης της ηλεκτρικής περιόδου ωστόσο μπορεί να είναι χρονοβόρα, οπότε η διαδικασία ευθυγράμμισης επιταχύνεται χρησιμο-

ποιώντας τις συμμετρίες των ροών που εμπλέκουν τις τρεις φάσεις του στάτη. Έτσι, αντί να λύσουμε το ηλεκτρομαγνητικό πρόβλημα για μία πλήρη ηλεκτρική περίοδο μπορούμε να εξετάσουμε μόνο το 1/6 της ηλεκτρικής περιόδου. Αυτό σημαίνει ότι η ανάλυση γίνεται με τον δρομέα να στρέφεται σε 6-10 επιλεγμένα σημεία τα οποία ανήκουν στο 1/6 της ηλεκτρικής περιόδου, ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τις κυματομορφές των τριών φάσεων, μπορούμε να ανακατασκευάσουμε την ροή για την πλήρη ηλεκτρική περίοδο.



Σχήμα 3.5: Συμμετρία των ροών των τριών φάσεων

Αφού ανακατασκευαστεί η πλήρης κυματομορφή της πεπλεγμένης ροής, μετατρέπουμε τις τοές από το τριφασικό σύστημα αναφοράς, στο στρεφόμενο σύστημα αναφοράς dq μέσω του μετασχηματισμού Clarke - Park. Από τις μεταβαλλόμενες τιμές των ροών στο dq σύστημα (λόγω της ύπαρξης ανώτερων αρμονικών), παίρνουμε τον μέσο όρο τους κρατώντας μόνο την θεμελιώδη συνιστώσα της ροής.



Σχήμα 3.6: Ανακατασκευή της ροής απο το 1/6 της περιόδου

Η γωνία στην οποία μεγιστοποιείται η θεμελιώδης της ροής της φάσης Α είναι η γωνία σε ηλεκτρικές μοίρες που πρέπει να στραφεί ο δρομέα, έτσι ώστε να βρισκόμαστε στην γωνία $\theta=0$, όπου έχουμε και μηδενική παραγωγή ροπής.

Εξαγωγή Πεπλεγμένης Ροής

Η ροή στο τύλιγμα υπολογίζεται εύκολα αφού το λογισμικό FEMM προσδίδει την δυνατότητα υπολογισμού της μέσης τιμής του μαγνητικού δυναμικού οπουδήποτε στην γεωμετρία προς ανάλυση και άρα και μέσα στις αύλακες. Αυτό είναι χρήσιμο αφού η τιμή του διανυσματικού δυναμικού στην οποία εκτίθεται κάθε τύλιγμα, πολλαπλασιασμένη με το ενεργό μήκος της μηχανής (το οποίο στη συγκεκριμένη φάση του μοντέλου μας δεν είναι ακόμη γνωστό) μας δείνει την ροή που δέχεται ο κάθε αγωγός, και επομένως ο πολλαπλασιασμός της τιμής αυτής με τον αριθμό των αυλάκων που αναλογούν στη κάθε φάση, μας δίνει την τιμή της ροής της κάθε φάσης[21]. Τα παραπάνω αποτυπώνονται μαθηματικά με τις παρακάτω σχέσεις :

$$\text{Διανυσματικό Δυναμικό: } B = \nabla \times A$$

$$\text{Ολοκλήρωμα Ροής: } \Phi = \iint_S B \cdot ds$$

$$\text{Θεώρημα του Stokes: } \iint_S (\nabla \times F) \cdot \hat{n} ds = \oint_{\partial S} F \cdot dl$$

$$\text{Και τελικά: } \Phi = \oint_c A \cdot dl = 2 \cdot \text{MotorLength} \cdot \langle A \rangle_{\text{@Slot}}$$

3.3.2 Σύγχρονη Περιστροφή

Έχοντας πλέον ευθυγραμμισμένο το πεδίο του δρομέα με αυτό του στάτη, λύνουμε την μηχανή σε πολλές καταστάσεις λειτουργίας της. Για την διαδικασία της ανάλυσης λειτουργούμε στο στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς dq. Έτσι κάθε στιγμιότυπο

(‘Snapshot’) χαρακτηρίζεται από μία πυκνότητα ρεύματος στον d άξονα, μία πυκνότητα ρεύματος στον q άξονα και μία μηχανική θέση του δρομέα. Για τον ακριβή προσδιορισμό όλων των μεγεθών που χαρακτηρίζουν την μηχανή, για κάθε ζεύγος πυκνότητας ρευμάτων (J_d, J_q) ο δρομέας περιστρέφεται σε 30 μηχανικές γωνίες στο μισό της ηλεκτρικής περιόδου. Στη πραγματικότητα, για την πλήρη εξαγωγή των αρμονικών του πεδίου της μηχανής είναι αναγκαία η ανάλυση της μηχανής σε περισσότερες από 30 μηχανικές γωνίες ωστόσο για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής, η ανάλυση κάθε μηχανής με τόσα σημεία για τη μηχανική θέση του δρομέα θα ήταν υπολογιστικά ασύμφορο. Σε κάθε στιγμιότυπο, αποθηκεύονται τιμές οι οποίες είναι απαραίτητες για τον χαρακτηρισμό της κάθε μηχανής. Έτσι αποθηκεύουμε :

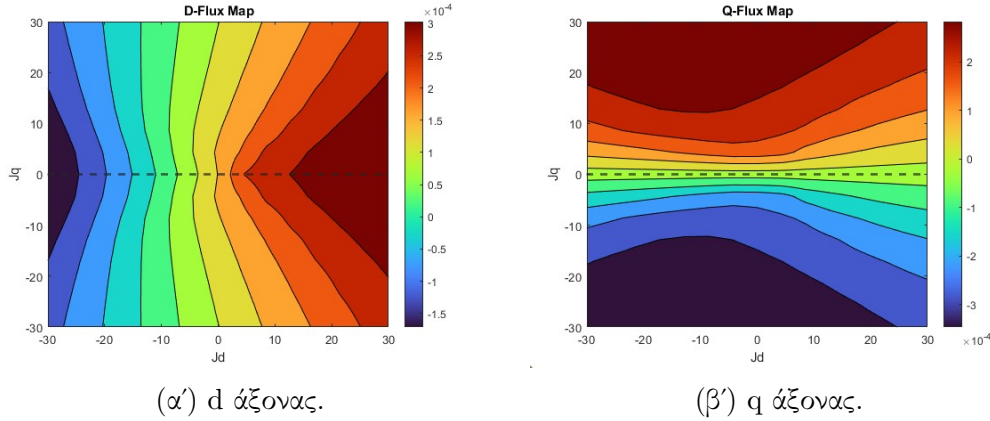
- Τις ροές που εμπλέκουν τις τρεις φάσεις του στάτη.
- Τις τιμές του διανυσματικού δυναμικού A για κάθε στοιχείο του πλέγματος στους μαγνήτες.
- Τις τιμές της έντασης του μαγνητικού πεδίου H για κάθε στοιχείο του πλέγματος στους μαγνήτες
- Τις τιμές της πυκνότητας της μαγνητικής ροής B σε κάθε στοιχείο του πλέγματος στο πυρήνα του δρομέα και του στάτη
- Τη ροπή της μηχανής

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι και στη συγκεκριμένη διαδικασία γίνεται αξιοποίηση της συμμετρίας του προβλήματος, ώστε να μειωθεί το υπολογιστικό φορτίο:

- Η επίλυση πραγματοποιείται για θετικές και αρνητικές τιμές του ρεύματος στον ορθό (δ) άξονα, αλλά μόνο για θετικές τιμές στον κάθετο (χ) άξονα. Οι τιμές των ροών για αρνητικό J_d ανακτώνται μέσω συμμετρίας, καθρεπτίζοντας τις αντίστοιχες τιμές του θετικού J_d . Αντίστοιχα, για τον χ -άξονα, οι τιμές καθρεπτίζονται και πολλαπλασιάζονται με -1 . Η ροπή αντιστρέφεται επίσης για τις αρνητικές τιμές των ρευμάτων.
- Η επίλυση γίνεται μόνο για τη μισή ηλεκτρική περίοδο. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται η κατάλληλη ανακατασκευή ώστε να εξαχθούν οι μαγνητικές ροές και τα πεδιακά μεγέθη για ολόκληρη την περίοδο. Η ανακατασκευή περιλαμβάνει ακόμη και την ανασύσταση των τιμών των πεδιακών μεγεθών για κάθε στοιχείο του πλέγματος. (Αν και θα ήταν δυνατή η επίλυση σε μόλις $1/6$ της ηλεκτρικής περιόδου, η ανακατασκευή των πεδιακών μεγεθών από τόσο μικρό υποσύνολο είναι αρκετά πιο σύνθετη και εκφεύγει του πλαισίου της παρούσας διπλωματικής εργασίας.)

Με την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας, έχουν εξαχθεί όλα τα μεγέθη ενδιαφέροντος, τόσο στο επίπεδο των συνολικών μεγεθών (όπως οι μαγνητικές ροές και

η ροπή), όσο και σε επίπεδο στοιχείων του πλέγματος. Για τις ροές και τη ροπή, λαμβάνεται ο μέσος όρος τους σε όλες τις μηχανικές γωνίες για κάθε ζεύγος (J_d, J_q) , ώστε να προκύψουν οι αντίστοιχοι χάρτες λειτουργίας στο επίπεδο των πυκνοτήτων των ρευμάτων διέγερσης, ενώ με τη διατήρηση των τιμών σε όλες τις μηχανικές γωνίες μπορούν να υπολογιστούν μεγέθη όπως η κυμάτωση της ροπής. [17]



Σχήμα 3.7: Χάρτες ροής στον d και q άξονα

3.3.3 Υπολογισμός Απομαγνήτισης

Για τον υπολογισμό της απομαγνήτισης των μαγνητών, εφαρμόζεται το εκθετικό μοντέλο εξίσωσης επαναφοράς του διανυσματικού πεδίου επαγωγής $\mathbf{B}_{\text{recoil}}$, το οποίο εξαρτάται από την αντιπαράλληλη συνιστώσα του πεδίου $\mathbf{H}_{\text{anti}}$ ως προς τη μαγνήτιση του μαγνήτη. Η υπολογιζόμενη μαγνητική επαγωγή για κάθε στοιχείο δίνεται από τη σχέση:

$$B = B_r + \mu_0 \mu_r H_{\text{anti}} - E \cdot \exp(K_1 \cdot (K_2 + H_{\text{anti}}))$$

όπου:

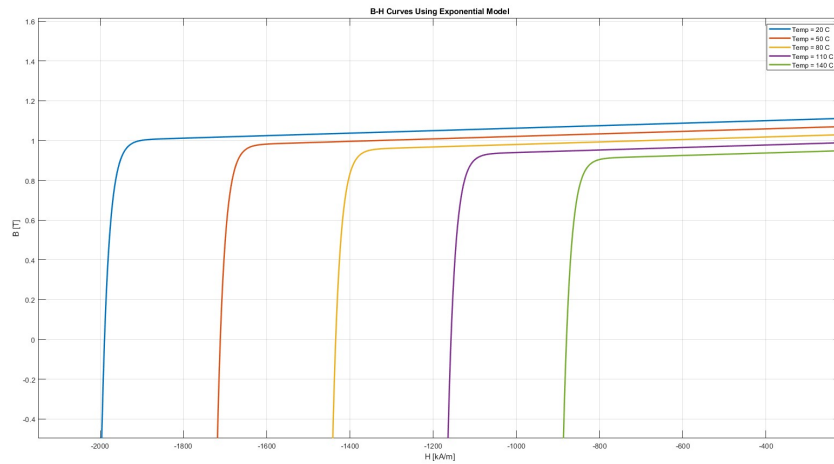
- B_r : η παραμένουσα μαγνητική επαγωγή (remanence),
- μ_0 : η διαπερατότητα του κενού,
- E : Σταθερά για την εξισορρόπηση των μονάδων της εξίσωσης (π.χ 1/Tesla)
- μ_r : η σχετική διαπερατότητα του μαγνήτη,
- H_{anti} : η αντιπαράλληλη συνιστώσα του διανύσματος $\mathbf{H}$ ως προς τη μαγνήτιση,
- K_1 : Σταθερά που καθορίζει την οξύτητα του γονάτου και εξαρτάται από το υλικό και τη θερμοκρασία,

- K_2 : υπολογίζεται από:

$$K_2 = \frac{\log \left(\frac{B_r + (\mu_r - 1)\mu_0 H_c}{E} \right)}{K_1} - H_{i_c}$$

με το H_{i_c} να είναι το εσωτερικό πεδίο καταναγκασμού (intrinsic coercivity) του υλικού.

Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόζεται για κάθε σημείο του πλέγματος, σε όλους τους συνδυασμούς ρευμάτων (J_d , J_q) σε όλες τις μηχανικές γωνίες του δρομέα και για κάθε θερμοκρασία ενδιαφέροντος, καθώς οι παράμετροι B_r , H_{i_c} , και K_1 μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία. Για κάθε στοιχείο, διατηρείται η χειρότερη (δηλαδή ελάχιστη) τιμή της απομένουσας επαγωγής B_r , και με βάση το εμβαδόν κάθε στοιχείου, υπολογίζεται το ποσοστό του μαγνήτη το οποίο έχει απομαγνητιστεί. [5]



Σχήμα 3.8: BH καμπύλες μαγνήτη χρησιμοποιώντας το εκθετικό μοντέλο

3.3.4 Υπολογισμός μάζας διατομής

Για τον υπολογισμό της μάζας της διατομής του κινητήρα, αξιοποιούνται τα δεδομένα του αριθμητικού πλέγματος προκειμένου να αντιστοιχιστεί κάθε στοιχείο με το αντίστοιχο υλικό. Στη συνέχεια, υπολογίζεται το συνολικό εμβαδόν για κάθε υλικό μέσω της άθροισης των επιφανειών των στοιχείων που το αποτελούν. Πολλαπλασιάζοντας την επιφάνεια αυτή με την πυκνότητα του αντίστοιχου υλικού, προκύπτει η μάζα ανά μονάδα μήκους (π.χ. ανά χιλιοστό).

Ωστόσο, επειδή το τύλιγμα δεν έχει οριστεί ακόμη, η πραγματική επιφάνεια του χαλκού εντός των αυλάκων δεν είναι γνωστή. Προς το παρόν, για λόγους απλοποίησης,

θεωρούμε ότι όλη η επιφάνεια των αυλάκων καταλαμβάνεται από τύλιγμα. Μετά τον ορισμό του τυλίγματος, η πραγματική μάζα του χαλκού θα προκύψει από τον πολλαπλασιασμό της συνολικής επιφάνειας των αυλάκων με τον συντελεστή πληρότητας (slot fill factor), ώστε να ληφθεί υπόψη ο πραγματικός όγκος του αγωγίμου υλικού.

3.3.5 Ορισμός Τυλίγματος Της Μηχανής - Νόμοι Κλιμάκωσης Μηχανών

Για τον πλήρη προσδιορισμό του τυλίγματος της μηχανής, αφαιρούνται αρχικά από τη περιφέρεια κάθε αύλακος η επιφάνεια του μονοτικού της αύλακας και η επιφάνεια της μόνωσης κάθε φουρκέτας. Στη συνέχεια ανάλογα με τον αριθμό των ελιγμάτων υπολογίζεται ο συντελεστής πληρότητας της αύλακας, η φασική αντίσταση του τυλίγματος και το μήκος των άκρων των τυλιγμάτων End Winding. [10]

Υπολογισμός Αντίστασης

Η ειδική αντίσταση του χαλκού στη θερμοκρασία αναφοράς 20°C είναι:

$$\rho_{20} = 1.68 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

Η ειδική αντίσταση στη θερμοκρασία λειτουργίας T υπολογίζεται ως:

$$\rho = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (T - 20))$$

όπου $\alpha \approx 0.00393 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ είναι ο θερμικός συντελεστής του χαλκού.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα προκύπτει από:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Η DC αντίσταση ενός πηνίου με N_{tc} στροφές ανά πηνίο, μήκος αγωγού ανά στροφή l_{turn} , και διατομή αγωγού A_{cond} , είναι:

$$R_{coil} = \rho \cdot \frac{N_{tc} \cdot l_{turn}}{A_{cond}}$$

Η φασική DC αντίσταση προκύπτει πολλαπλασιάζοντας με τον αριθμό των πηνίων ανά φάση $N_{coil/ph}$:

$$R_{ph} = R_{coil} \cdot N_{coil/ph}$$

- N_{tc} : στροφές ανά πηνίο (Turns Per Coil),
- l_{turn} : μήκος μίας στροφής, $l_{turn} = l_{active} + l_{endTurn}$
- A_{cond} : διατομή αγωγού,
- $N_{coil/ph}$: αριθμός πηνίων ανά φάση

Υπολογισμός μήκους άκρων τυλίγματος (end-turn length)

Για τον υπολογισμό του μήκους του ακροκινήτηριου τμήματος του τυλίγματος (end-turn), χρησιμοποιούμε τη γεωμετρική προσέγγιση που βασίζεται στη γωνιακή απόσταση μεταξύ των δύο πλευρών ενός πηνίου, καθώς και στην ακτίνα όπου αυτές βρίσκονται.

Αρχικά, υπολογίζεται η γωνιακή απόσταση α μεταξύ των δύο slot του πηνίου, η οποία δίνεται ως:

$$\alpha = \frac{2\pi \cdot y_q}{6 \cdot p \cdot q}$$

όπου:

- y_q : Ο αριθμός των αυλάκων που διασχίζει το πηνίο,
- p : αριθμός πόλων του κινητήρα,
- q : αριθμός αυλάκων ανά πόλο και φάση,

Έπειτα, το μήκος του ακροκινήτηριου τμήματος υπολογίζεται ως:

$$l_{\text{end}} = 2l_t + \alpha \cdot \left(r + g + \frac{l_t}{2} \right)$$

όπου:

- l_t : το μήκος του δοντιού του στάτη (tooth length),
- r : η ακτίνα του δρομέα (rotor radius),
- g : το διάκενο αέρα (airgap),
- α : το γωνιακό βήμα του πηνίου (coil pitch σε ακτίνα).

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί μία εκτίμηση του συνολικού μήκους καλωδίου που απαιτείται για τη μετάβαση από τη μία πλευρά του πηνίου στην άλλη μέσω του εξωτερικού τμήματος του στάτη. Ο όρος $2l_t$ αντιπροσωπεύει την καθοδική και ανοδική μετάβαση του αγωγού, ενώ το τόξο $\alpha(r + g + l_t/2)$ αντιστοιχεί στη μεταφορά μέσω της καμπύλης διαδρομής στο άκρο του στάτη.[11]

3.3.6 Νόμοι Κλιμάκωσης Ηλεκτρικών Μηχανών

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, όλοι οι αρχικοί υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν χωρίς τη χρήση του πραγματικού ενεργού μήκους της μηχανής και χωρίς την πλήρη παραμετροποίηση του τυλίγματος. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την απλοποίηση των μοντέλων, ενώ τα αποτελέσματα που προκύπτουν μπορούν να κλιμακωθούν κατάλληλα ώστε να αποδώσουν τα αντίστοιχα μεγέθη για οποιοδήποτε ενεργό μήκος και για οποιοδήποτε τύλιγμα, υπό την προϋπόθεση ότι το τύλιγμα ικανοποιεί τους κανόνες που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2.4.

Η μετάβαση από το υπολογιστικό μοντέλο στη φυσική γεωμετρία της μηχανής πραγματοποιείται μέσω των παρακάτω σχέσεων:

- **Ρεύμα ανά άξονα (D, Q):**

Το συνολικό ρεύμα που ρέει σε κάθε άξονα προκύπτει από την πυκνότητα ρεύματος, το εμβαδόν της αύλακας και τον αριθμό των στροφών ανά αύλακα:

$$I_d = \frac{J_d \cdot A_{\text{slot}}}{N_{\text{ts}}} \quad , \quad I_q = \frac{J_q \cdot A_{\text{slot}}}{N_{\text{ts}}}$$

- **Ροή ανά άξονα (D, Q):**

Η συνολική ροή που αντιστοιχεί σε κάθε άξονα κλιμακώνεται σύμφωνα με τον αριθμό των στροφών ανά αύλακα και το ενεργό μήκος της μηχανής:

$$\Phi_d = \phi_d \cdot N_{\text{ts}} \cdot 2L \quad , \quad \Phi_q = \phi_q \cdot N_{\text{ts}} \cdot 2L$$

- **Ροπή:**

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή που παράγεται από τη μηχανή κλιμακώνεται γραμμικά με το ενεργό μήκος:

$$T_{\text{total}} = T_{\text{unit}} \cdot L$$

- **Μάζα εξαρτημάτων:**

Η συνολική μάζα των βασικών μερών της μηχανής (στάτης, δρομέας, μαγνήτες, τύλιγμα) υπολογίζεται με βάση τη μάζα ανά χιλιοστό ενεργού μήκους:

$$M_{\text{stator}} = m_{\text{stator/mm}} \cdot L$$

$$M_{\text{rotor}} = m_{\text{rotor/mm}} \cdot L$$

$$M_{\text{magnets}} = m_{\text{magnets/mm}} \cdot L$$

$$M_{\text{winding}} = m_{\text{winding/mm}} \cdot (L + l_{\text{end}}) \cdot \text{fill factor}$$

Όπου:

- N_{ts} : αριθμός στροφών ανά αύλακα (turns per slot)
- L : ενεργό μήκος της μηχανής
- l_{end} : μήκος των άκρων του τυλίγματος (end-turn length)
- A_{slot} : εμβαδόν κάθε αύλακας
- J_d, J_q : πυκνότητες ρεύματος στους άξονες D και Q
- ϕ_d, ϕ_q : υπολογισμένη ροή ανά έλιγμα (από το μοντέλο)
- T_{unit} : υπολογισμένη ροπή στο βασικό μοντέλο ανά mm μήκους

Αξίζει να σημειωθεί ότι το μοντέλο που χρησιμοποιείται στη φάση του υπολογισμού λειτουργεί με βάση ένα μόνο έλιγμα ανά αύλακα, για λόγους γενικότητας και ευκολίας. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι αρχικά, η πυκνότητα ρεύματος που ορίσαμε ήταν με βάση το εμβαδόν όλης της αύλακας αφού δεν είχαμε ακόμη πληροφορίες για το ποσοστό πληρότητας των αυλάκων. Πλέον, μπορούμε να ορίσουμε και την πυκνότητα ρεύματος στην ενεργή επιφάνεια της αύλακας, μέγεθος πιο κατατοπιστικό για τη θερμική καταπόνηση της μηχανής [10] :

$$J_{dEff} = \frac{J_d}{fillFactor}$$

$$J_{qEff} = \frac{J_q}{fillFactor}$$

3.3.7 Υπολογισμός Κόστους Μηχανής

Για την εκτίμηση του κόστους της μηχανής, εφαρμόζεται μια απλοποιημένη μεθοδολογία που βασίζεται στο κόστος των υλικών. Συγκεκριμένα, κάθε υλικό που χρησιμοποιείται στη μηχανή έχει ένα καθορισμένο κόστος ανά κιλό, το οποίο πολλαπλασιάζεται με τη μάζα του αντίστοιχου υλικού. Σημειώνεται ότι η προσέγγιση αυτή δεν αποδίδει το πλήρες, πραγματικό κόστος της μηχανής, αλλά λειτουργεί περισσότερο ως ένας σταθμισμένος υπολογισμός μάζας, όπου κάθε υλικό επιβαρύνει το συνολικό κόστος ανάλογα με την τιμή του.

Για την πλήρη κοστολόγηση της μηχανής θα έπρεπε να συνυπολογιστούν και επιπλέον παράγοντες, όπως:

- το κόστος κοπής της λαμαρίνας σε λεπτές φέτες (slices) για τον περιορισμό των δινορευμάτων,
- το κόστος αρχικής μαγνήτισης των μαγνητών,
- τα έξοδα συναρμολόγησης και άλλες διαδικασίες παραγωγής.

Ωστόσο, η παρούσα προσέγγιση παρέχει μια ρεαλιστική εικόνα για το κόστος των υλικών της μηχανής, καθώς η μάζα από μόνη της δεν αποτελεί επαρκή δείκτη κόστους. Η τιμή ανά κιλό για τα υλικά που εξετάζονται στην παρούσα εργασία είναι:

- Χαλκός: 9 €/kg
- Λαμαρίνα: 1 €/kg
- Μαγνήτες: 100 €/kg

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι, παρότι η μάζα των μαγνητών είναι συνήθως πολύ μικρότερη από αυτή της λαμαρίνας, ακόμα και μικρές αυξομειώσεις στο βάρος των μαγνητών έχουν δυσανάλογα μεγάλη επίδραση στο συνολικό κόστος της μηχανής.

3.3.8 Υπολογισμός Απωλειών

Υπολογισμός Απωλειών Σιδήρου

Οι απώλειες σιδήρου στον στάτη υπολογίζονται μέσω της κλασικής μεθόδου διαχωρισμού σε υστέρηση και δινορρεύματα. Η ειδική απώλεια ανά μονάδα όγκου δίνεται από τη σχέση:

$$P_{\text{core}} = P_h + P_e = C_h \omega B^2 + C_e \omega^2 B^2 \quad (3.7)$$

όπου:

- P_h είναι οι απώλειες υστέρησης,
- P_e είναι οι απώλειες δινορρευμάτων,
- C_h, C_e είναι οι συντελεστές απωλειών για το υλικό [$\text{W}/(\text{m}^3 \cdot \text{T}^2 \cdot \text{Hz})$ και $\text{W}/(\text{m}^3 \cdot \text{T}^2 \cdot \text{Hz}^2)$, αντίστοιχα],
- ω είναι η ηλεκτρική γωνιακή συχνότητα,
- B είναι η μέγιστη (αιχμή) μαγνητική πυκνότητα ροής.

Για να ληφθεί υπόψη η επίδραση της στοίβαξης του πυρήνα, εφαρμόζεται ένας συντελεστής στοίβαξης $k_s < 1$ (Stacking Factor). Οι προσαρμοσμένες απώλειες σιδήρου ανά μονάδα όγκου δίνονται από:

$$P_{\text{stack}} = \frac{C_h \omega B^2 + C_e \omega^2 B^2}{k_s} \quad (3.8)$$

Στην παρούσα εργασία θεωρείται $k_s = 0.95$, τιμή χαρακτηριστική για ελάσματα πάχους 0.02".

Επειδή το χρονικό κύμα της μαγνητικής ροής που προκύπτει από τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων δεν είναι ημιτονοειδές, η μαγνητική πυκνότητα ροής αναλύεται σε αρμονικές. Ο συνολικός υπολογισμός των απωλειών γίνεται με άθροιση των απωλειών ανά αρμονική:

$$P_{\text{core, total}} = \sum_{m=1}^{\infty} (C_h m \omega B_m^2 + C_e m^2 \omega^2 B_m^2) \quad (3.9)$$

όπου B_m είναι η μέγιστη τιμή της m -οστής χρονικής αρμονικής της μαγνητικής πυκνότητας. [12]

Υπολογισμός Απωλειών Μαγνήτη

Οι απώλειες δινορευμάτων στους μόνιμους μαγνήτες υπολογίζονται μέσω της πυκνότητας επαγόμενου ρεύματος $\mathbf{J}_m$ που προκύπτει από χρονικά μεταβαλλόμενο διανυσματικό δυναμικό $\mathbf{A}$. Για κάθε αρμονική, η πυκνότητα ρεύματος εντός του μαγνήτη δίνεται από:

$$\mathbf{J}_m = -\sigma_m j \omega \mathbf{A} + \mathbf{J}_c \quad (3.10)$$

όπου:

- σ_m είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού του μαγνήτη,
- ω είναι η γωνιακή συχνότητα της αρμονικής,
- $\mathbf{A}$ είναι το διανυσματικό δυναμικό,
- $\mathbf{J}_c$ είναι η επιβαλλόμενη πυκνότητα ρεύματος ώστε το ολικό ρεύμα να είναι μηδενικό στο εμβαδό κάθε μαγνήτη.

Η ισχύς των απωλειών υπολογίζεται με ολοκλήρωση του τετραγώνου του ρεύματος:

$$P_{\text{magnet}} = \sum_{m=1}^{\infty} \int_V \frac{|\mathbf{J}_m|^2}{\sigma_m} dV \quad (3.11)$$

Η συχνотική προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη συνεκτίμηση των υψηλών αρμονικών που οφείλονται στη γεωμετρία της μηχανής και στη σχετική κίνηση μαγνήτη-στάτη. [13]

Υπολογισμός αντίστασης εναλλασσόμενου ρεύματος για τυλίγματα ορθογώνιας διατομής

Για την εκτίμηση της αντίστασης εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) των τυλιγμάτων, υλοποιήθηκε ένα αναλυτικό μοντέλο τύπου Dowell, το οποίο λαμβάνει υπόψη την επίδραση του επιδερμικού φαινομένου και του φαινομένου γεινιάσης (Skin - Proximity Effect). Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην επίλυση της διαφορικής εξίσωσης για το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό $\vec{A}$, υπό την παραδοχή αρμονικής διέγερσης συχνότητας ω . [14]

Ο διανυσματικός δυναμικός φορέας μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\vec{A}(x, t) = \Re \left\{ \tilde{A}(x) e^{j\omega t} \right\}$$

Με αυτήν την παραδοχή, η χρονική παράγωγος μετασχηματίζεται σε:

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = j\omega \tilde{A}(x) e^{j\omega t}$$

και η εξίσωση διάδοσης της μαγνητικής ροής μέσα στον αγωγό γίνεται:

$$\frac{d^2 \tilde{A}}{dx^2} = \mu_0 \sigma \left(\nabla \tilde{\Phi}_z + j\omega \tilde{A} \right)$$

όπου σ είναι η ειδική αγωγιμότητα του υλικού και μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού. Η λύση της εξίσωσης οδηγεί σε υπερβολικές συναρτήσεις ($\cosh$, $\sinh$), που σχετίζονται με την γεωμετρία των αγωγών και την κατανομή του ρεύματος στο εσωτερικό τους.

Ο υπολογισμός της σύνθετης αντίστασης εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) κάθε αύλακας γίνεται με τη σχέση:

$$R_{\text{slot}}^{\text{complex}} = \frac{j\omega\mu_0}{\gamma_T h} \left[\frac{2N_{\text{cs}}^3 - 2N_{\text{cs}}}{3} \cdot \cosh(\gamma_T w) - \frac{2N_{\text{cs}}^3 + N_{\text{cs}}}{3} \cdot \sinh(\gamma_T w) \right] \cdot L$$

όπου:

- N_{cs} : αριθμός αγωγών στην αύλακα (conductors in slot)
- w : πλάτος αγωγού (conductor width)
- h : ύψος αγωγού (conductor height)
- L : ενεργό μήκος του τυλίγματος (active length)

- $\gamma_T = \sqrt{j\omega\mu_0\sigma}$

Η αντίσταση ανά φάση, αφού αφαιρεθεί το DC μέρος, υπολογίζεται ως:

$$R_{Ph}^{AC}(\omega) = -\Re \left\{ R_{slot}^{complex} \right\} \cdot N_{cph} - R_{DC}$$

όπου N_{cph} είναι ο αριθμός αγωγών ανά φάση και R_{DC} η αντίσταση συνεχούς ρεύματος της ίδιας διαδρομής.

Το μοντέλο επιτρέπει την παρακολούθηση της αύξησης της AC αντίστασης σε συνάρτηση με τη συχνότητα, και τη σύγκρισή της με την DC τιμή, προσφέροντας έτσι ένα εργαλείο εκτίμησης των AC απωλειών στους αγωγούς. Έχοντας την τιμή της AC αντίστασης ο υπολογισμός των απωλειών του τυλίγματος λόγω αυτής είναι:

$$P_{copperAC} = 3 \cdot I_{phase}^2 \cdot R_{AC} \quad (3.12)$$

Μοντελοποίηση απωλειών γειτνίασης για κυλινδρικούς αγωγούς

Η περιοχή που περιέχει αγωγούς μπορεί να προσεγγιστεί ως ομογενοποιημένη περιοχή με μιγαδική μαγνητική διαπερατότητα, όπου το φανταστικό μέρος σχετίζεται με τις απώλειες.

Στην περίπτωση χαμηλών συχνοτήτων, οι απώλειες γειτνίασης ανά μονάδα όγκου, P_{prox} , περιγράφονται από τη σχέση:

$$P_{prox} = C_{prox} \omega^2 B^2 \quad (3.13)$$

όπου:

- $C_{prox} = fill \times \frac{\pi^2}{8} \sigma_{wire} d_{wire}^2$ είναι ο συντελεστής απωλειών,
- ω η γωνιακή συχνότητα,
- B η μαγνητική επαγόμενη πυκνότητα,
- σ_{wire} η ηλεκτρική αγωγιμότητα των αγωγών,
- d_{wire} η διάμετρος των αγωγών,
- $fill$ ο συντελεστής πλήρωσης του χαλκού.

Η μορφή της εξίσωσης είναι ανάλογη με αυτή των απωλειών δινορευμάτων στις λαμαρίνες, γεγονός που επιτρέπει τον υπολογισμό των απωλειών με ανάλογη μεθοδολογία και τον ίδιο τρόπο που υπολογίζονται οι απώλειες πυρήνα, αλλά με διαφορετικό συντελεστή απωλειών ($C_e = C_{prox}$, $C_h = 0$). [12]

Υπολογισμός Απωλειών Χαλκού

Έχοντας τη φασική αντίσταση, ο υπολογισμός των ωμικών απωλειών χαλκού γίνεται με τον παρακάτω τύπο :

$$P_{copper} = 3 \cdot I_{phase}^2 \cdot R \quad (3.14)$$

όπου :

- I_{phase} , το φασικό ρεύμα στα τυλίγματα
- R η ανα φάση αντίσταση του τυλίγματος

3.3.9 Θερμική Φόρτιση

Παρότι στο παρόν μοντέλο δεν πραγματοποιείται πλήρης θερμική ανάλυση της μηχανής, η θερμική συμπεριφορά της λαμβάνεται υπόψη μέσω του υπολογισμού ενός χαρακτηριστικού μεγέθους, γνωστού ως θερμική φόρτιση (thermal loading). Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται ως το πηλίκο των ωμικών απωλειών του χαλκού κατά τη λειτουργία μέγιστης ισχύος, προς την εξωτερική επιφάνεια του στάτη, και εκφράζεται ως:

$$\text{Thermal Loading} = \frac{P_{cu}^{peak}}{A_{stator,outer}} \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right]$$

Όπου P_{cu}^{peak} είναι οι απώλειες χαλκού στη μέγιστη ισχύ, και $A_{stator,outer}$ η εξωτερική κυλινδρική επιφάνεια του στάτη, η οποία αποτελεί και την κύρια επιφάνεια απαγωγής θερμότητας προς το περιβάλλον.

Η παράμετρος αυτή επιτρέπει μια απλοποιημένη αλλά ουσιαστική εκτίμηση της θερμικής επιβάρυνσης της μηχανής, και χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της σχεδιαστικής καταλληλότητας χωρίς να απαιτείται ανάλυση θερμικού πεδίου μέσω πεπερασμένων στοιχείων ή άλλων τρόπων μοντελοποίησης της θερμικής συμπεριφοράς της μηχανής. [18]

3.3.10 Εξαγωγή Καμπύλης Ροπής-Ταχύτητας

Μέχρι στιγμής, όλες οι διαδικασίες που έχουν περιγραφεί εφαρμόζονται σε κάθε συνδυασμό ζευγών ρευμάτων (I_d, I_q) και για κάθε ταχύτητα περιστροφής ω της μηχανής. Ωστόσο, για την εξαγωγή της χαρακτηριστικής καμπύλης $T-\omega$ (ροπής ως προς στροφές), είναι απαραίτητο να τεθούν ορισμένα όρια στα διαθέσιμα ρεύματα και τάσεις. Τα όρια αυτά καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά της διάταξης ελέγχου της μηχανής, συνήθως ενός αντιστροφέα (inverter), ο οποίος προσδιορίζει τα μέγιστα επιτρεπτά επίπεδα ρεύματος και τάσης που μπορούν να εφαρμοστούν στη μηχανή καθώς βέβαια

και από την τροφοδοσία της, δηλαδή στην περίπτωση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων την μπαταρία.

Λαμβάνοντας υπόψιν τους εν λόγω περιορισμούς, πραγματοποιείται μία διαδικασία βελτιστοποίησης βάσει του ισοδύναμου κυκλώματος που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2.6.3. Στόχος αυτής της διαδικασίας είναι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ροπής για κάθε ταχύτητα λειτουργίας, τηρώντας ταυτόχρονα τα όρια που τίθενται από την τροφοδοσία. Παράλληλα, γίνεται προσπάθεια ελαχιστοποίησης του απαιτούμενου φασικού ρεύματος, ώστε να μειώνονται οι απώλειες και να βελτιστοποιείται η ενεργειακή απόδοση του συστήματος.

Ουσιαστικά, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος ελέγχου μέγιστης ροπής ανά Ampere Maximum Torque Per Ampere (MTPA), ο οποίος επιλέγει για κάθε σημείο λειτουργίας τον κατάλληλο συνδυασμό I_d και I_q που μεγιστοποιεί τη ροπή υπό δεδομένο μέτρο του συνολικού ρεύματος. Αυτό συμβαίνει αφού στη μηχανή μπορούμε να έχουμε τις ίδιες τιμές ροπής για πολλούς συνδυασμούς ρευμάτων I_d, I_q . Ο έλεγχος MTPA είναι ιδιαίτερος χρήσιμος σε περιοχές λειτουργίας κάτω από την ονομαστική ταχύτητα, καθώς συμβάλλει στην αποδοτικότερη αξιοποίηση της μαγνητικής ροής και στην ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών.

Μία πολύ σημαντική παράμετρος στον έλεγχο της μηχανής είναι η επαγόμενη τάση που αναπτύσσεται στα τυλίγματα. Η στιγμιαία τιμή της φασικής αυτής τάσης δίνεται μέσω της πεπλεγμένης ροής Λ_ϕ στο τύλιγμα της φάσης ως εξής:

$$e_\phi = \frac{d\Lambda_\phi}{dt} = \frac{d\Lambda_\phi}{d\theta_m} \cdot \omega_m \quad (3.15)$$

Αντίστοιχα, η ενεργός (RMS) τιμή της επαγόμενης τάσης σχετίζεται με την ταχύτητα και την μέγιστη τιμή της πεπλεγμένης ροής ως:

$$e_\phi^{(rms)} = \frac{\Lambda_\phi^{(max)} \cdot \omega_m}{\sqrt{2}} \quad (3.16)$$

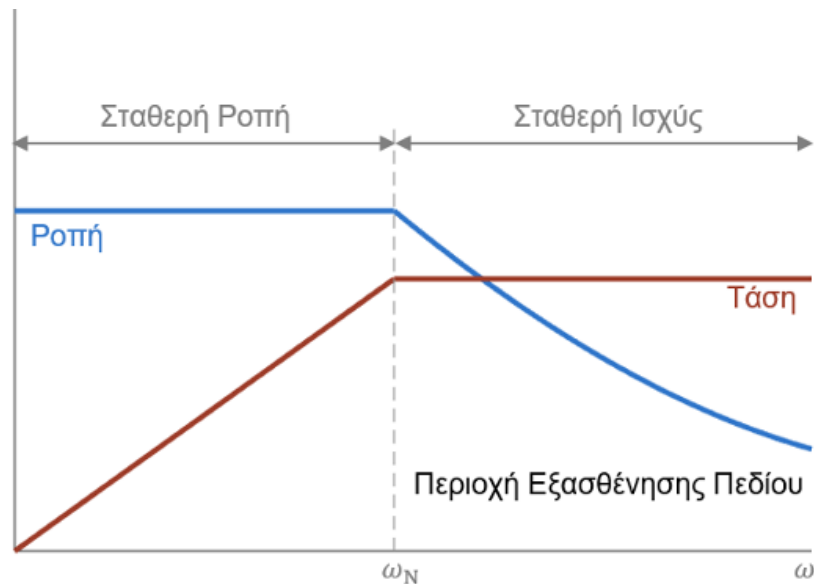
Άρα, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα λειτουργίας, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η επαγόμενη τάση. Αυτό ωστόσο εισάγει σημαντικούς περιορισμούς, αφού σε περίπτωση που η επαγόμενη τάση ξεπεράσει την επιβαλλόμενη τάση (όριο του ινερτερ), θα δημιουργηθεί ανάστροφο ρεύμα και ο κινητήρας δεν θα μπορεί πλέον να οδηγηθεί σωστά.

Κατά κανόνα, η πεπλεγμένη ροή Λ_ϕ προκύπτει από τη βέλτιστη επίλυση υπό τον περιορισμό MTPA, δηλαδή για την επιθυμητή ροπή με τη μικρότερη κατανάλωση ρεύματος. Ωστόσο, όταν η ταχύτητα ω_m προκαλεί επαγόμενη τάση μεγαλύτερη του ορίου, τότε η λύση είναι να περιοριστεί η μέγιστη μαγνητική ροή $\Lambda_\phi^{(max)}$, δηλαδή να μειωθεί η συνολική ροή μέσω εφαρμογής κατάλληλων ρευμάτων, μια διαδικασία γνωστή ως **εξασθένηση πεδίου** (field weakening).

Αυτό σημαίνει ότι δεν είναι πλέον δυνατή η παραγωγή της μέγιστης ροπής, αφού η μαγνητική φόρτιση είναι μειωμένη.

Η ταχύτητα στην οποία η επαγόμενη τάση γίνεται ίση με τη μέγιστη τάση του αντι-στροφέα ονομάζεται ταχύτητα βάσης (base speed). Η ταχύτητα αυτή διαχωρίζει τις δύο βασικές περιοχές λειτουργίας της μηχανής:

- **Περιοχή σταθερής ροπής:** $\omega < \omega_{\text{base}}$
- **Περιοχή εξασθένησης πεδίου:** $\omega > \omega_{\text{base}}$, όπου η ισχύς μπορεί να διατηρηθεί σταθερή $P = T \cdot \omega$ μέσω μείωσης της ροπής και αύξησης της ταχύτητας.



Σχήμα 3.9: Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-τάσης ως προς ταχύτητα περιστροφής [19]

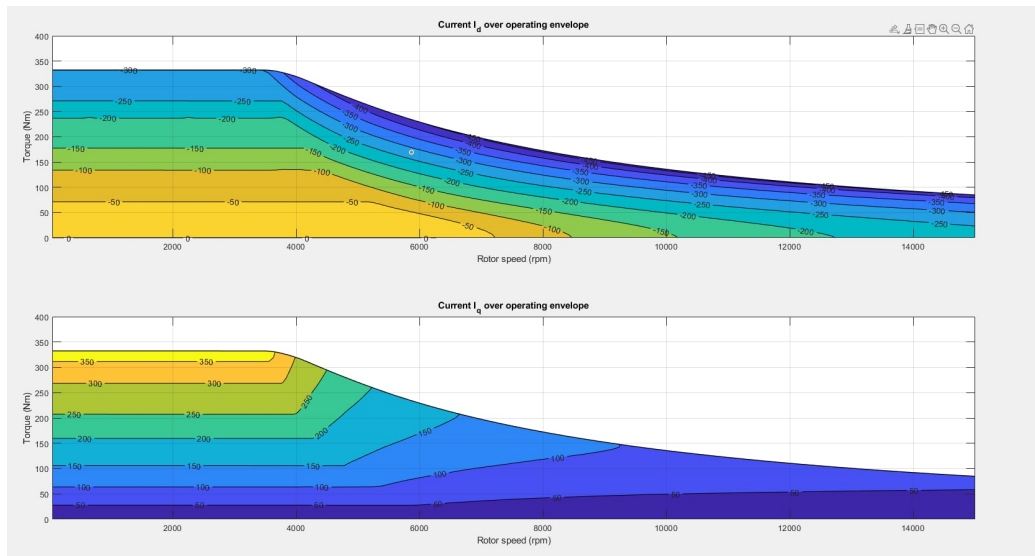
Στο χώρο των d - q ρευμάτων, το φαινόμενο της εξασθένησης πεδίου φαίνεται καθαρά. Σύμφωνα με τη θεωρία μετασχηματισμού d - q (Park):

- Η d -συνιστώσα του ρεύματος I_d σχετίζεται με τη διέγερση και τη μαγνητική ροή.
- Η q -συνιστώσα I_q σχετίζεται με την ηλεκτρομαγνητική ροπή.

Αν λοιπόν διατηρήσουμε το μέτρο του ρεύματος σταθερό, αλλά αλλάξουμε τη γωνία d , αυξάνοντας κατά μέτρο τη d -συνιστώσα προς τις αρνητικές τιμές και μειώνοντας τη q -συνιστώσα, τότε:

- Η συνολική πεπλεγμένη ροή μειώνεται.
- Η ικανότητα ανάπτυξης ροπής μειώνεται.

Αυτή η περιοχή, όπου η γωνία d δεν είναι πλέον η βέλτιστη για την παραγωγή της μέγιστης ροπής αλλά μεταβάλλεται για να μην ξεπεράσει η επαγόμενη τάση την τάση εισόδου, ονομάζεται **περιοχή εξασθένησης πεδίου**.



Σχήμα 3.10: Ρεύματα I_d - I_q σε όλη τη περιοχή λειτουργίας της μηχανής

3.4 ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

3.4.1 Υπολογισμός Ρεύματος Βραχυκυκλώματος σε Σταθερή Κατάσταση

Κατά τη διάρκεια ενός βραχυκυκλώματος στις φάσεις του κινητήρα, η εφαρμοζόμενη τάση θεωρείται μηδενική. Η ροή ενέργειας από τους μόνιμους μαγνήτες συνεχίζεται λόγω της περιστροφής του κινητήρα, δημιουργώντας μία εναλλασσόμενη τάση στους αχροδέκτες του τυλίγματος. Η συμπεριφορά του συστήματος περιγράφεται στο σύστημα αξόνων dq από τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned} V_d &= R \cdot I_d - \omega_e \cdot \psi_q(I_d, I_q) \\ V_q &= R \cdot I_q + \omega_e \cdot \psi_d(I_d, I_q) \end{aligned} \quad (3.17)$$

όπου:

- V_d, V_q : συνιστώσες τάσης στον dq άξονα (V),
- I_d, I_q : συνιστώσες ρεύματος (A),
- R : αντίσταση τυλίγματος φάσης (Ω),
- ω_e : ηλεκτρική γωνιακή ταχύτητα $= \omega_m \cdot \frac{p}{2}$ (rad/s),
- ψ_d, ψ_q : συνιστώσες ροής ανά άξονα (Wb),
- p : αριθμός πόλων του κινητήρα.

Για συνθήκες σταθερού βραχυκυκλώματος, θεωρούμε $V_d = V_q = 0$, και επομένως οι εξισώσεις απλοποιούνται σε:

$$\begin{aligned} 0 &= R \cdot I_d - \omega_e \cdot \psi_q(I_d, I_q) \\ 0 &= R \cdot I_q + \omega_e \cdot \psi_d(I_d, I_q) \end{aligned} \quad (3.18)$$

Επειδή οι ροές ψ_d και ψ_q εξαρτώνται μη γραμμικά από τα ρεύματα I_d και I_q , οι παραπάνω εξισώσεις επιλύονται αριθμητικά. Στο παρόν έργο, για κάθε ταχύτητα, υπολογίζεται η ισοκαμπύλη $V_d = 0$ και $V_q = 0$ στο πλέγμα τιμών I_d, I_q , και εντοπίζεται το σημείο τομής τους.

Το συνολικό ρεύμα βραχυκυκλώματος προκύπτει από:

$$I_{ss} = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (3.19)$$

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για εύρος μηχανικών ταχυτήτων $\omega_m \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}]$, και το μέγιστο ρεύμα βραχυκυκλώματος δίνεται από:

$$I_{ss}^{\max} = \max_{\omega_m} (I_{ss}(\omega_m)) \quad (3.20)$$

Η τιμή $I_{ss}^{\max}$ είναι κρίσιμη για τη μελέτη θερμικών φαινομένων, την επιλογή ηλεκτρονικών ισχύος, καθώς και την αξιολόγηση κινδύνου απομαγνήτισης. [15]

3.4.2 Μελέτη Μεταβατικού Βραχυκυκλώματος

Για την αξιολόγηση της μεταβατικής απόκρισης κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος βραχυκυκλώματος, επιλύεται το δυναμικό μοντέλο του κινητήρα στον χρονικό τομέα, με τις μαγνητικές ροές ψ_d και ψ_q να αποτελούν τις μεταβλητές κατάστασης:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_d}{dt} &= -R \cdot i_d + \omega \cdot \psi_q \\ \frac{d\psi_q}{dt} &= -R \cdot i_q - \omega \cdot \psi_d \end{aligned}$$

Τα ρεύματα i_d και i_q προσδιορίζονται μέσω του αντίστροφου ηλεκτρομαγνητικού μοντέλου:

$$i_d = f_d(\psi_d, \psi_q), \quad i_q = f_q(\psi_d, \psi_q)$$

Για την αριθμητική επίλυση του συστήματος χρησιμοποιείται η μέθοδος Runge-Kutta 4ης τάξης (RK4). Για παράδειγμα, για τη μεταβλητή ψ_d :

$$\begin{aligned} k_1 &= -R \cdot i_d^{(n)} + \omega \cdot \psi_q^{(n)} \\ k_2 &= -R \cdot \left(\psi_d^{(n)} + \frac{h}{2} k_1, \psi_q^{(n)} \right) + \omega \cdot \left(\psi_q^{(n)} + \frac{h}{2} k_1 \right) \\ k_3 &= -R \cdot \left(\psi_d^{(n)} + \frac{h}{2} k_2, \psi_q^{(n)} \right) + \omega \cdot \left(\psi_q^{(n)} + \frac{h}{2} k_2 \right) \\ k_4 &= -R \cdot \left(\psi_d^{(n)} + h k_3, \psi_q^{(n)} \right) + \omega \cdot \left(\psi_q^{(n)} + h k_3 \right) \\ \psi_d^{(n+1)} &= \psi_d^{(n)} + \frac{h}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \end{aligned}$$

Όπου η είναι το χρονικό βήμα.

Αντίστοιχα εφαρμόζεται η ίδια διαδικασία και για τη μεταβλητή ψ_q . Σε κάθε χρονικό βήμα, τα ρεύματα ενημερώνονται ως εξής:

$$i_d^{(n)} = f_d(\psi_d^{(n)}, \psi_q^{(n)}), \quad i_q^{(n)} = f_q(\psi_d^{(n)}, \psi_q^{(n)})$$

Η δυσμενέστερη συνθήκη βραχυκυκλώματος εντοπίζεται καταγράφοντας την ελάχιστη τιμή του i_d καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης:

$$i_{\text{Worst}} = i_d^{\min} + j i_q^{\min}$$

3.4.3 Εκτίμηση Ρεύματος Βραχυκύκλωσης Χειρότερης Περίπτωσης

Για την εκτίμηση της πιο απαιτητικής περίπτωσης απομαγνήτισης στους μόνιμους μαγνήτες του κινητήρα, ορίστηκε το ρεύμα χειρότερης περίπτωσης (Hyper Worst Case) ως η τιμή του ρεύματος διέγερσης I_d , η οποία οδηγεί στην ελάχιστη τιμή της συνιστώσας της ροής λ_d στο πεδίο λειτουργίας του κινητήρα. Ουσιαστικά, πρόκειται για τη λειτουργία όπου η μαγνητική φόρτιση στους μαγνήτες είναι η πιο έντονη (αντιμαγνητική), καθιστώντας τους πιο ευάλωτους σε φαινόμενα απομαγνήτισης.

Η διαδικασία υπολογισμού του ρεύματος περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. **Εντοπισμός μέγιστης απόλυτης τιμής της ροής:** Αρχικά, προσδιορίζεται η μέγιστη τιμή της μαγνητικής ροής $|\Psi|$ στο πεδίο λειτουργίας του κινητήρα.
2. **Εξαγωγή αντίστοιχου I_d :** Κατόπιν, εντοπίζεται η τιμή του I_d για $I_q = 0$ η οποία οδηγεί σε ισοδύναμη τιμή ροής με την παραπάνω μέγιστη:

$$\lambda_d(I_d, I_q = 0) = -\max |\Psi|$$

Η τιμή του I_d που προκύπτει ορίζεται ως η τιμή ρεύματος χειρότερης περίπτωσης.

3. **Υπολογισμός απομαγνήτισης:** Για κάθε θερμοκρασία μελέτης και για κάθε μαγνήτη που έχει μοντελοποιηθεί ξεχωριστά, υπολογίζεται το ποσοστό απομαγνήτισης μέσω παρεμβολής στους προϋπολογισμένους χάρτες απομαγνήτισης, χρησιμοποιώντας την παραπάνω τιμή I_d και $I_q = 0$.

Το αποτέλεσμα είναι ένα σύνολο τιμών ποσοστού απομαγνήτισης για κάθε μαγνήτη και κάθε θερμοκρασία, οι οποίες αναπαριστούν τη χειρότερη δυνατή συνθήκη λόγω συνδυασμού ηλεκτρικών και θερμικών φορτίσεων. Αυτή η προσέγγιση εξασφαλίζει ότι ο σχεδιασμός του κινητήρα παραμένει ασφαλής ακόμα και στο πιο δυσμενές σημείο λειτουργίας.[15]

3.5 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Η ανάπτυξη ενός κατάλληλου μοντέλου οχήματος είναι αναγκαία ώστε να οριστούν ρεαλιστικά και εφαρμοσμένα σημεία λειτουργίας του ηλεκτρικού κινητήρα. Μέσα από την προσομοίωση του οχήματος σε έναν πρότυπο κύκλο οδήγησης, είναι δυνατόν να προσδιοριστούν οι κυρίαρχες συνθήκες λειτουργίας τόσο σε όρους ταχύτητας περιστροφής όσο και απαιτούμενης ροπής.[16]

Η κατανόηση της δυναμικής του οχήματος και η μετάφρασή της σε χαρακτηριστικά σημεία λειτουργίας (n , T) είναι κρίσιμη για μια στοχευμένη και αποδοτική σχεδίαση κινητήρα, προσαρμοσμένη στις πραγματικές ανάγκες της εφαρμογής.

3.5.1 Δυναμική Οχήματος

Κατά την κίνηση του οχήματος, επιδρούν σε αυτό διάφορες δυνάμεις που αντιστέκονται στην κίνησή του. Οι κυριότερες είναι οι εξής:

- **Αεροδυναμική αντίσταση:** Πρόκειται για τη δύναμη που δημιουργείται λόγω της ροής του αέρα γύρω από το όχημα. Αυξάνεται με το τετράγωνο της

ταχύτητας και παίζει σημαντικό ρόλο σε υψηλές ταχύτητες.

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_x \cdot A_f \cdot u^2 \quad (3.21)$$

Όπου:

- C_x : Συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης
- $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$: Πυκνότητα του αέρα
- A_f : Μετωπική επιφάνεια οχήματος
- u : Ταχύτητα του οχήματος

- **Αντίσταση κύλισης:** Αυτή η δύναμη οφείλεται στην επαφή των ελαστικών με το οδόστρωμα και εξαρτάται κυρίως από το βάρος του οχήματος και τα χαρακτηριστικά των ελαστικών.

$$F_r = C_r \cdot m \cdot g \cdot \cos(\gamma) \quad (3.22)$$

Όπου:

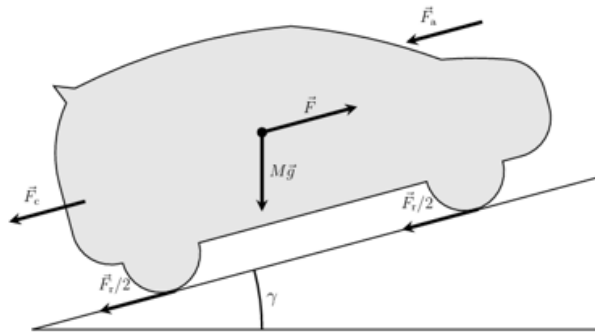
- C_r : Συντελεστής αντίστασης κύλισης
- m : Μάζα του οχήματος
- g : Επιτάχυνση βαρύτητας
- γ : Κλίση του δρόμου

- **Αντίσταση ανύψωσης (βαρυτική):** Αυτή είναι η δύναμη που πρέπει να υπερνικηθεί όταν το όχημα κινείται σε ανηφόρα. Προκύπτει από το βάρος του οχήματος που δρα κατά μήκος της κλίσης του δρόμου.

$$F_c = m \cdot g \cdot \sin(\gamma) \quad (3.23)$$

Όπου:

- m : Μάζα του οχήματος
- g : Επιτάχυνση βαρύτητας
- γ : Κλίση του δρόμου



Σχήμα 3.11: Δυνάμεις κατά τη κίνηση του οχήματος

- **Απαιτούμενη δύναμη για την κίνηση του οχήματος:**

Για να κινηθεί το όχημα, η δύναμη που του ασκείται (F) πρέπει να υπερνικά το άθροισμα όλων των αντιστάσεων που δρουν πάνω του:

$$F > F_a + F_c + F_r \quad (3.24)$$

- **Επιτάχυνση του οχήματος:** Η τελική επιτάχυνση a προκύπτει από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, λαμβάνοντας υπόψιν και τις περιστρεφόμενες μάζες (τροχοί και κινητήρας) μέσω της ισοδύναμης μάζας M_{eq} :

$$a = \frac{F - F_a - F_c - F_r}{M_{eq}} \quad (3.25)$$

Η **ισοδύναμη μάζα** M_{eq} λαμβάνει υπόψιν τόσο τη μάζα του οχήματος όσο και τις ροπές αδράνειας των τροχών και της μηχανής:

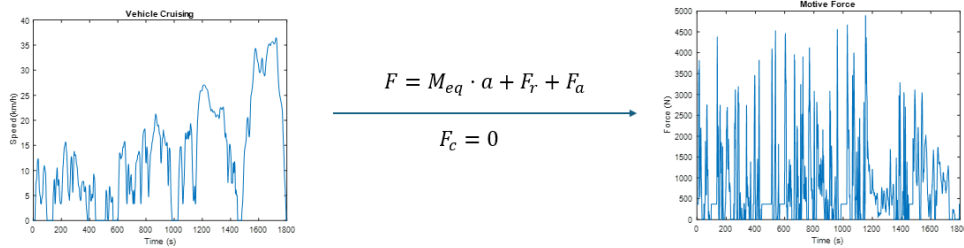
$$M_{eq} = M + \frac{J_w}{R_w^2} + \frac{J_m \cdot \tau^2}{R_w^2} \quad (3.26)$$

Όπου:

- M : Μάζα οχήματος (kg)
- J_w : Ροπή αδράνειας τροχών (kg·m²)
- J_m : Ροπή αδράνειας μηχανής (kg·m²)
- R_w : Ακτίνα τροχών (m)
- τ : Μηχανικός λόγος μετάδοσης

3.5.2 Εξαγωγή Σημείων Λειτουργίας Κινητήρα

Για την βελτιστοποίηση της μηχανής αντί του προσδιορισμού του χάρτη απόδοσης της μηχανής σε όλα τα πιθανά σημεία της λειτουργίας της (ακόμα και αν ένα ρεαλιστικό όχημα δεν λειτουργεί σε πολλά από αυτά τα σημεία), έχει επιλεγεί η ανάλυση του κύκλου οδήγησης ενός ηλεκτρικού οχήματος και η μετάφραση του κύκλου αυτού στα μεγέθη της μηχανής. Στη συνέχεια υπολογίζεται η αποδοτικότητα της μηχανής σε αυτά τα σημεία ενδιαφέροντος και όχι σε όλο το χάρτη λειτουργίας. Ο κύκλος οδήγησης που έχει επιλεγεί είναι ο WLTC class 3 Vehicle κύκλος ο οποίος αποτελείται από διαδρομή 30 λεπτών σε συνθήκες αστικής και υπεραστικής οδήγησης συνολικού μήκους 23.3 km με μέγιστη ταχύτητα 131.3 km/h σε ίσιο δρόμο, χωρισμένο σε διαστήματα ενός δευτερολέπτου (1800 δευτερόλεπτα συνολικά). Με βάση τον κύκλο οδήγησης και την δυναμική του οχήματος μπορεί να υπολογιστεί η αναγκαία κινητήρια δύναμη ώστε να μπορεί το όχημα να ακολουθήσει τον κύκλο.



Σχήμα 3.12: Αναγκαία Κινητήρια Δύναμη

Αφού έχουμε υπολογίσει τη δύναμη F και την ταχύτητα του οχήματος v σε κάθε χρονική στιγμή της διαδρομής, μπορούμε να υπολογίσουμε τις απαιτήσεις σε στροφές και ροπή της ηλεκτρικής μηχανής μέσω των παρακάτω εξισώσεων:

$$n = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{v \cdot \tau}{R_w} \quad (3.27)$$

Όπου:

- n : Στροφές της μηχανής σε rpm
- v : Ταχύτητα του οχήματος (m/s)
- τ : Λόγος μετάδοσης (gear ratio)
- R_w : Ακτίνα τροχού (m)

Η ροπή στον άξονα της μηχανής προκύπτει από:

$$T = \frac{F \cdot R_w}{\tau \cdot \eta_g} \quad (3.28)$$

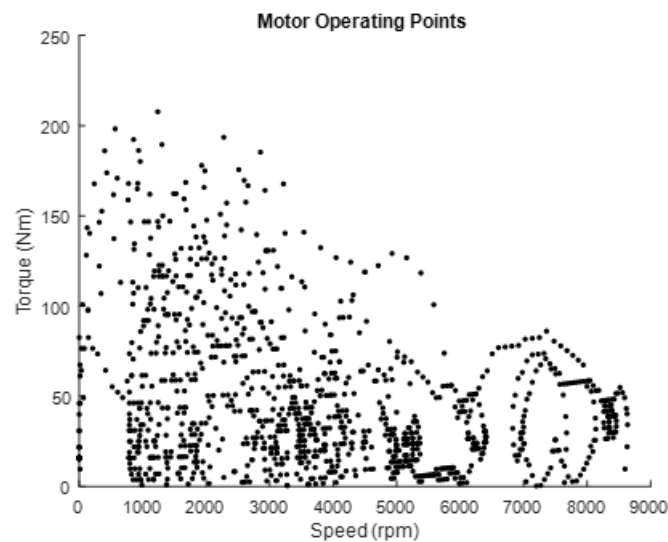
Όπου:

- T : Ροπή της μηχανής (Nm)
- F : Ολική κινητήρια δύναμη (N)
- η_g : Απόδοση κιβωτίου ταχυτήτων

Απλουστευτικές παραδοχές συστήματος μετάδοσης και παροχής ισχύος

Για την παρούσα διπλωματική εργασία, υιοθετούνται οι εξής παραδοχές ώστε να απλοποιηθεί η ανάλυση του συστήματος:

- Η απόδοση του κιβωτίου ταχυτήτων θεωρείται σταθερή και ίση με $\eta_g = 0.95$.
- Η απόδοση του αντιστροφέα θεωρείται σταθερή και ίση με $\eta_{inv} = 0.98$, ανεξαρτήτως φορτίου ή ταχύτητας.
- Η ηλεκτρική μηχανή τροφοδοτείται με σταθερή τάση καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας, καθώς δεν χρησιμοποιείται αναλυτικό μοντέλο μπαταρίας.



Σχήμα 3.13: Παράδειγμα σημείων λειτουργίας κινητήρα κατά την κίνηση ηλεκτρικού οχήματος

3.5.3 Υπολογισμός Απόδοσης

Η βελτιστοποίηση του κινητήρα με βάση την αποδοτικότητα σε όλα τα σημεία λειτουργίας είναι μια πολύ χρονοβόρα διαδικασία και άρα δεν είναι κατάλληλη για χρήση σε τόσο ευρύ φάσμα δεδομένων. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, υιοθετείται μια μέθοδος αξιολόγησης περιορισμένου αριθμού **αντιπροσωπευτικών σημείων λειτουργίας** του κινητήρα. Τα σημεία αυτά επιλέγονται με βάση την **πυκνότητα λειτουργίας** στο επίπεδο ροπής-στροφών (T, n) .

Το επίπεδο (T, n) χωρίζεται σε 16 κανονικές περιοχές, καθεμία από τις οποίες ταυτοποιείται με ένα ζεύγος (i, j) . Για κάθε περιοχή υπολογίζονται τα εξής:

- Ισοδύναμη ροπή:

$$T_{ij}^{eq} = \frac{\sum_k T_{(k,ij)}}{v_{ij}} \quad (3.29)$$

- Ισοδύναμη ταχύτητα περιστροφής:

$$n_{ij}^{eq} = \frac{\sum_k n_{(k,ij)}}{v_{ij}} \quad (3.30)$$

- Συντελεστής βαρύτητας (weighting factor):

$$w_{ij}^{eq} = \frac{v_{ij}}{v} \quad (3.31)$$

Όπου:

- v_{ij} : ο αριθμός των σημείων εντός της περιοχής (i, j)
- v : το συνολικό πλήθος των σημείων λειτουργίας

Οι περιοχές με μεγαλύτερο w_{ij}^{eq} αντιστοιχούν σε σημεία λειτουργίας με υψηλή πυκνότητα και συνεπώς έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα στη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Μετά τον προσδιορισμό των αντιπροσωπευτικών σημείων λειτουργίας του κινητήρα, μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέση απόδοση του συστήματος, σταθμισμένη με βάση τη σημασία κάθε σημείου λειτουργίας:

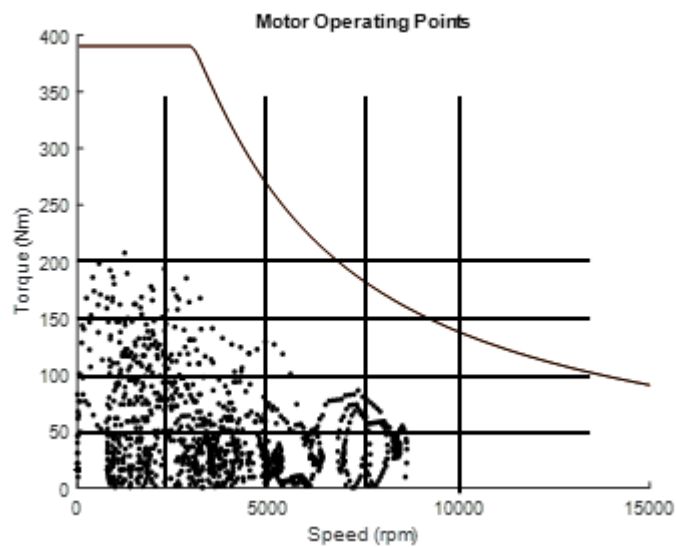
$$\eta = 1 - \frac{\sum_{i,j} w_{ij}^{eq} \cdot P_{ij}^{loss}}{\sum_{i,j} w_{ij}^{eq} \cdot (P_{ij}^{loss} + P_{ij}^{eq})} \quad (3.32)$$

Όπου η ισοδύναμη μηχανική ισχύς υπολογίζεται ως:

$$P_{ij}^{eq} = \frac{2\pi}{60} \cdot T_{ij}^{eq} \cdot n_{ij}^{eq} \quad (3.33)$$

Ο σταθμισμένος υπολογισμός εξασφαλίζει ότι:

- Η ίδια απόδοση σε σημεία διαφορετικής ισχύος δεν συνεπάγεται ίδιες απώλειες.
- Σημεία με υψηλότερη ισχύ έχουν μεγαλύτερη επίδραση στη συνολική απόδοση του κινητήρα.



Σχήμα 3.14: Πλέγμα Στο επίπεδο ροπής ταχύτητας του κινητήρα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

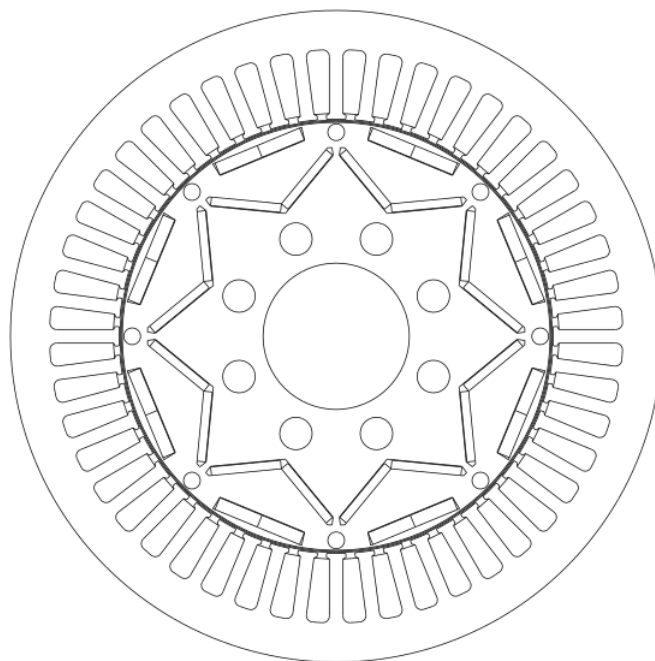
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΠΡΟΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗ

Πριν την ανάπτυξη και αξιολόγηση εναλλακτικών σχεδιαστικών επιλογών, είναι κρίσιμο να κατανοηθεί σε βάθος η υπάρχουσα λύση που χρησιμοποιείται στην πράξη. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η αρχική ηλεκτρική μηχανή που βασίζεται σε εμπορικά διαθέσιμο τύπο ηλεκτρικού κινητήρα [22], η οποία αποτελεί ένα από τα πιο επιτυχημένα εμπορικά παραδείγματα μόνιμα διεγερμένων σύγχρονων μηχανών (PMSM) για ηλεκτρικά οχήματα.

Η ανάλυση επικεντρώνεται στα βασικά γεωμετρικά και ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά του κινητήρα, καθώς και στα υλικά και τις παραμέτρους που καθορίζουν την απόδοσή του. Η κατανόηση αυτών των χαρακτηριστικών είναι απαραίτητη προκειμένου να εντοπιστούν τα σημεία με περιθώριο βελτιστοποίησης, τόσο σε επίπεδο ενεργειακής απόδοσης όσο και μηχανικής σχεδίασης.

4.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Η διατομή της ηλεκτρικής μηχανής, η οποία τίθεται προς βελτίωση στη συγκεκριμένη εργασία είναι :



Σχήμα 4.1: Διατομή του κινητήρα προς βελτίωση

4.1.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Δρομέα

Ο δρομέας της μηχανής προς βελτίωση παρουσιάζει μια σύνθετη και ιδιαίτερα αποδοτική γεωμετρία, σχεδιασμένη για βελτιστοποιημένη απόδοση και ελεγχόμενη ροή μαγνητικής ροής. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά γεωμετρικά του χαρακτηριστικά:

- **Αριθμός Πόλων:** 8
- **Τοπολογία Μαγνητών:** Τύπου Δέλτα
Οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι σε μορφή δέλτα, διαμορφώνοντας τρεις διακριτούς μαγνήτες ανά πόλο με κεκλιμένη διάταξη.
- **Εσωτερική Ακτίνα Δρομέα:** 22.225 mm
- **Εξωτερική Ακτίνα Δρομέα:** 65 mm
- **Εμβαδόν Τρίτου (Κεντρικού) Μαγνήτη:** 107.364 mm^2
- **Εμβαδόν Μαγνητών Τύπου V (συνολικά):** 110.916 mm^2
- **Ακτίνα Κυκλικής Διατομής στον Δρομέα:** 4.889 mm
- **Ακτίνα Ημικυκλικών Διατομών στις Άκρες του Πόλου:** 2.55 mm

4.1.2 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Στάτη

Ο στάτης της μηχανής αποτελείται από 48 αυλάκες και είναι σχεδιασμένος ώστε να επιτυγχάνει υψηλή πυκνότητα ισχύος και καλή διαχείριση θερμικών φορτίων. Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

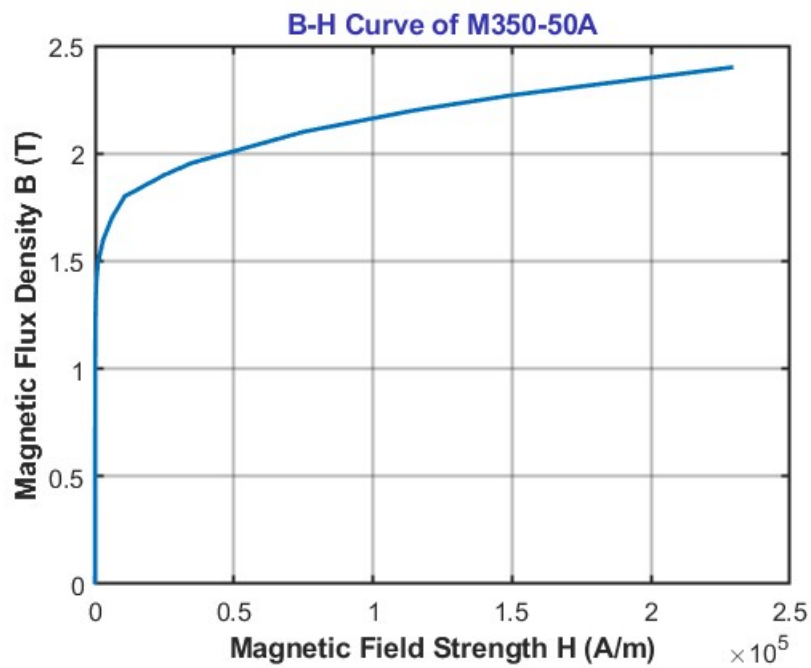
- Αριθμός Αυλάκων: 48
- Εσωτερική Ακτίνα Στάτη: 66 mm
- Εξωτερική Ακτίνα Στάτη: 100 mm
- Ύψος Αύλακας: 19.4316 mm
- Εμβαδόν Αύλακας: 114.221 mm²
- Πλάτος Δοντιού (Tooth Width): 4.15 mm

Αξίζει να σημειωθεί ότι, παρόλο που το μοντέλο που υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της εργασίας δεν υποστηρίζει την πλήρη γεωμετρική αναπαράσταση μέσω της παραμετροποίησης που παρουσιάστηκε παραπάνω (π.χ. τις κυκλικές ή ημικυκλικές εγχοπές στον δρομέα), δύναται η εισαγωγή και ανάλυση στο μοντέλο έτοιμης γεωμετρίας σχεδιασμένη στο λογισμικό FEMM.

4.2 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

4.2.1 Πυρήνας του Δρομέα και του Στάτη

Το υλικό που έχει επιλεγεί για τον δρομέα και τον στάτη της μηχανής είναι το M350-50A, υλικό μη προσανατολισμένου ηλεκτρικού χάλυβα, πάχους 0.5 mm. Η καμπύλη BH του υλικού είναι :

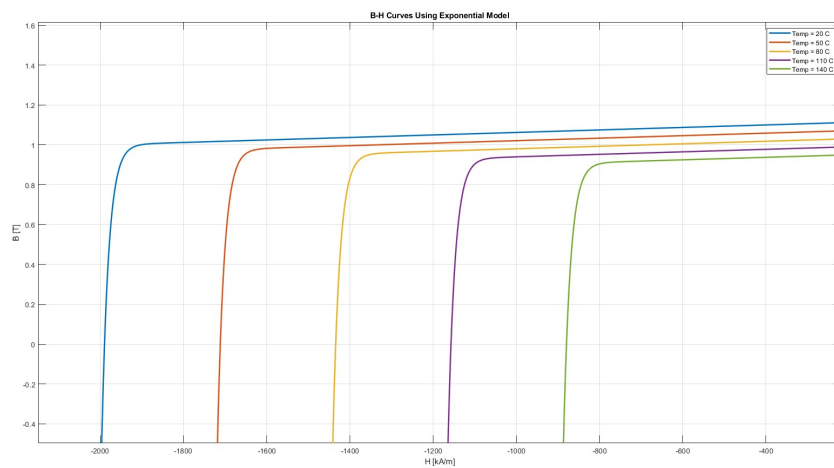


Σχήμα 4.2: Καμπύλη BH του υλικού

4.2.2 Μόνιμοι Μαγνήτες

Οι μαγνήτες που χρησιμοποιούνται στον δρομέα είναι NdFeB grade 32 UH (N32UH).

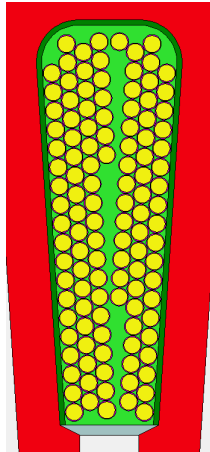
Οι καμπύλες απομαγνήτισης του συγκεκριμένου μαγνήτη είναι :



Σχήμα 4.3: Καμπύλες Απομαγνήτισης Μαγνήτη τύπου N32UH

4.2.3 Τύλιγμα Στάτη

Το τύλιγμα το στάτη αποτελείται απο κυλινδρικούς αγωγούς χαλκού διαμέτρου 0.8 mm. Συνολικά στην κάθε αύλακα τοποθετούνται 120 αγωγοί, οδηγώντας έτσι σε συνολική επιφάνεια χαλκού 60 mm^2 και συντελεστή πληρότητας αύλακος Fill Factor = 0.52 .



Σχήμα 4.4: Διατομή Αύλακος της μηχανής προς βελτίωση (εικόνα από Motor Cad)

4.3 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ

Η ηλεκτρομαγνητική απόδοση αποτελεί βασικό παράγοντα αξιολόγησης της λειτουργίας και της αποδοτικότητας ενός ηλεκτρικού κινητήρα. Στην περίπτωση του κινητήρα υπό μελέτη, η αξιολόγηση της απόδοσης σε διάφορα σημεία λειτουργίας επιτρέπει την κατανόηση των ροπών, των ισχύων και των απωλειών που προκύπτουν κατά τη λειτουργία. Η εξαγωγή των ηλεκτρομαγνητικών χαρακτηριστικών έγινε μέσω του μοντέλου που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3.

4.3.1 Χαρακτηριστικά Ροπής - Απόδοσης

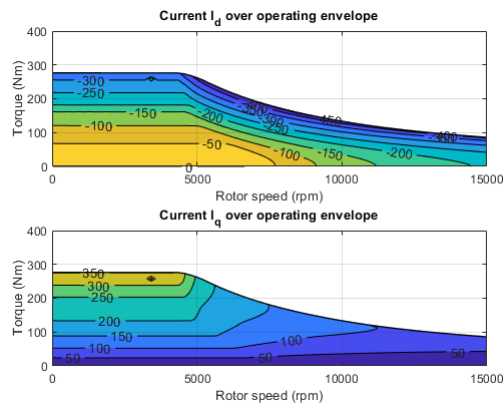
Τα χαρακτηριστικά ροπής και απόδοσης αποτελούν κρίσιμα μεγέθη για την αξιολόγηση της λειτουργίας του κινητήρα υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Η καμπύλη ροπής-ταχύτητας αποτυπώνει τη μεταβολή της διαθέσιμης ροπής σε συνάρτηση με την ταχύτητα περιστροφής, ενώ οι χάρτες απόδοσης παρουσιάζουν το επίπεδο απόδοσης του κινητήρα σε διάφορα σημεία λειτουργίας.

Η ανάλυση αυτών των χαρακτηριστικών επιτρέπει την κατανόηση των περιοχών λειτουργίας με μέγιστη απόδοση και τη βελτιστοποίηση του ελέγχου, καθώς και την

εκτίμηση των ορίων λειτουργίας του κινητήρα, όπως το μέγιστο ρεύμα και η θερμική αντοχή.

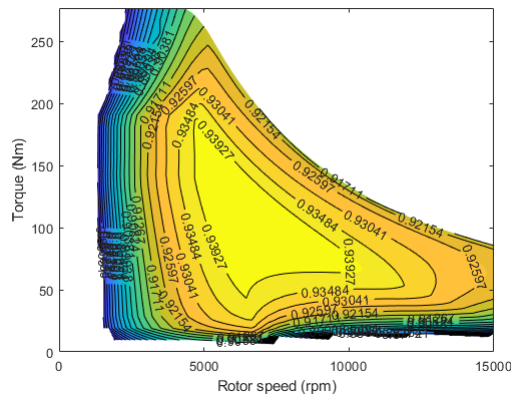
Η μηχανή λειτουργεί με ονομαστικό φασικό ρεύμα 340 A και τάση μπαταρίας 400 V.

Τα ρεύματα σε όλη την λειτουργία της μηχανής είναι :



Σχήμα 4.5: Ρεύματα Λειτουργίας της Μηχανής

Τέλος ο χάρτης απόδοσης της μηχανής είναι :



Σχήμα 4.6: Χάρτης Απόδοσης της Μηχανής

Όπως φαίνεται και στο σχήμα η μέγιστη απόδοση της μηχανής παρουσιάζεται για ροπές περίπου 120 Nm και ταχύτητες περίπου 7000 rpm, με τιμές περίπου 0.94. Να αναφερθεί ότι η παρούσα τιμή της απόδοσης συνυπολογίζει και την αποδοτικότητα του αντιστροφέα για τον οποίο έχει γίνει η παραδοχή ότι λειτουργεί με συντελεστή απόδοσης 0.98 ανεξαρτήτως του σημείου λειτουργίας.

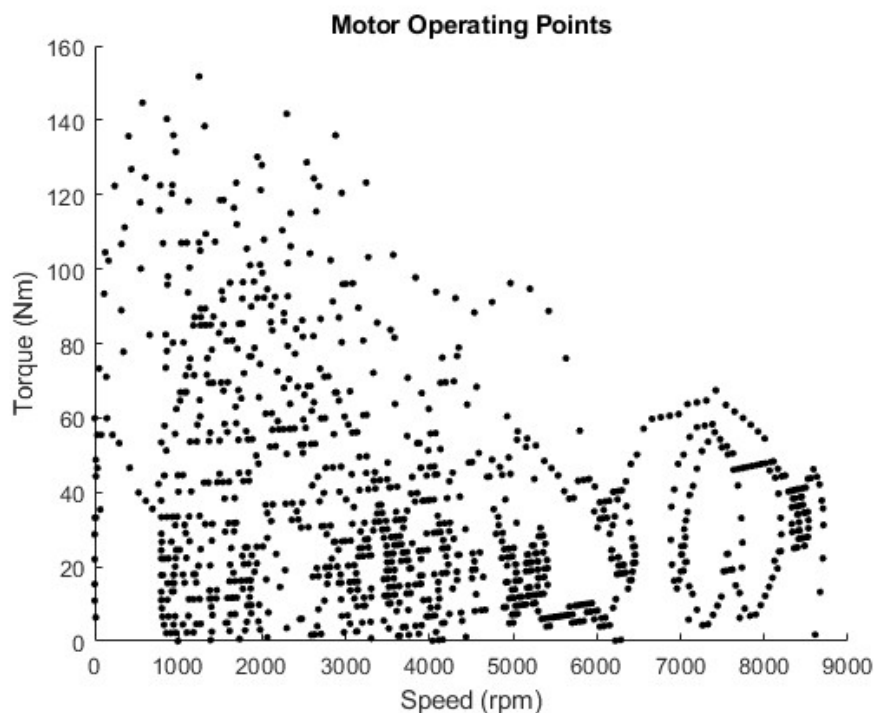
4.3.2 Χαρακτηριστικά Οχήματος

Για τη μοντελοποίηση της ηλεκτρικής μηχανής, χρησιμοποιήθηκαν τα χαρακτηριστικά ενός ηλεκτρικού οχήματος που ανήκει στην ίδια κατηγορία και βασίζεται στην ίδια πλατφόρμα με τον κινητήρα αναφοράς [22]. Τα βασικά χαρακτηριστικά του οχήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά του οχήματος

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Μάζα οχήματος (κενό)	1610	kg
Μάζα οχήματος (φορτωμένο)	1750	kg
Ακτίνα τροχού	0.32	m
Ροπή αδράνειας τροχού	5	kg·m ²
Μετωπική επιφάνεια	2.27	m ²
Συντελεστής οπισθέλκουσας (C_d)	0.29	-
Συντελεστής κύλισης (C_r)	0.015	-
Σχέση μετάδοσης (μείωσης)	8	-

Ενώ τα σημεία λειτουργίας του κινητήρα με βάση την ανάλυση που περιεγράφηκε στην ενότητα 3.4 είναι :



Σχήμα 4.7: Σημεία Λειτουργίας Του Κινητήρα για τα χαρακτηριστικά του παραπάνω Οχήματος

4.3.3 Κύρια Χαρακτηριστικά Προς Βελτίωση

Πριν προχωρήσουμε στη διαδικασία ανασχεδιασμού του κινητήρα, είναι απαραίτητο να αναδείξουμε τα βασικά του χαρακτηριστικά τα οποία χρήζουν βελτίωσης. Οι παράμετροι που εξετάζονται περιλαμβάνουν τη συνολική μάζα της μηχανής, τη σταθμισμένη ηλεκτρομαγνητική απόδοση κατά την τυπική λειτουργία, καθώς και το εκτιμώμενο κόστος κατασκευής. Επιπλέον, παρουσιάζεται το ποσοστό απομαγνήτισης για τον συνολικό όγκο των μαγνητών, υπό την επίδραση μεταβατικού ρεύματος βραχυκύκλωσης (Transient Short Circuit Current) στους 120 Βαθμούς Κελσίου.

Οι πληροφορίες αυτές συγκεντρώνονται στον ακόλουθου πίνακα και αποτελούν τη βάση για την αξιολόγηση και τον στοχευμένο σχεδιασμό μιας πιο αποδοτικής, ελαφρύτερης και οικονομικά βιώσιμης λύσης.

Πίνακας 4.2: Γενικά χαρακτηριστικά κινητήρα προς βελτίωση

Μέγεθος	Τιμή	Μονάδα
Μάζα κινητήρα	33	kg
Σταθμισμένη απόδοση	90.4	%
Εκτιμώμενο κόστος	290	€
Ποσοστό Απομαγνήτισης σε 3Φ Βραχυκύκλωμα	1.14	%
Μέγιστη Τιμή Ροπής	276	Nm
Μέγιστη Τιμή Ισχύος	141,8	kW

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΗΧΑΝΩΝ

Χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, αναλύεται ένας μεγάλος αριθμός διατομών με στόχο τη βελτιστοποίηση της μηχανής που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4. Συγκεκριμένα, δημιουργούνται πολλές γεωμετρικές κινητήρων που αποσκοπούν στην αντικατάσταση του πολύκλωνου τυλίγματος στον στάτη της μηχανής του αρχικού κινητήρα με τύλιγμα φουρκέτας, καθώς και στην αλλαγή της τοπολογίας του δρομέα από διάταξη τύπου δέλτα σε μονού ή διπλού V τύπου. Οι αλλαγές αυτές αποσκοπούν στην αύξηση της απόδοσης, τη μείωση της μάζας και τη βελτίωση της αντοχής των μαγνητών στην απομαγνήτιση.

5.1 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΔΙΑΤΟΜΩΝ

Βάσει της παραμετροποίησης που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, ορίζονται τα παρακάτω διανύσματα παραμέτρων ώστε να διαμορφωθεί ένα ικανοποιητικό και λογικό εύρος διατομών. Οι σταθερές παράμετροι που ισχύουν για όλες τις διατομές είναι οι εξής:

Κοινές Παράμετροι Στάτη

- Εξωτερική ακτίνα στάτη: $R_{\text{stator,out}} = 100 \text{ mm}$
- Tooth Tips: 80 (ποσοστό % του ύψους δοντιού)
- Tips to Tooth: 5 (αναλογία %)
- Tooth Parallelization: 1 (παράλληλα δόντια για χρήση τυλίγματος φουρκέτας)
- Ακτίνα καμπυλότητας κορυφής δοντιού: $r_{\text{edge}} = 0.7 \text{ mm}$

Κοινές Παράμετροι Δρομέα

- Εσωτερική ακτίνα δρομέα: $R_{\text{rotor,in}} = 22.225 \text{ mm}$
- Πλάτος ενισχυτικής περιοχής (νεύρου): Rib Width = 1.5 mm
- Πάχος γέφυρας: Bridge Thickness = 1.0 mm
- Ποσοστό βάθους θήκης μαγνήτη: PocketPc = 90 %
- Διάκενο αέρα (airgap): 1.0 mm

5.1.1 Συνδυασμοί Πόλων και Αυλάκων

Θα μελετηθούν οι δύο πιο διαδεδομένοι συνδυασμοί πόλων και αυλάκων:

6 Πόλοι – 54 Αυλάκες

- Αναλογία Διαμέτρων Στάτη - Δρομέα: [0.60, 0.65, 0.70]
- Αναλογία ύψους σώματος στάτη προς δόντι: Yoke2Tooth = 5.0
- Αναλογία δοντιού προς αύλακα: Tooth2Slot = [50, 55]

8 Πόλοι – 48 Αυλάκες

- Αναλογία Διαμέτρων Στάτη - Δρομέα: [0.60, 0.65, 0.70]
- αναλογία ύψους σώματος στάτη προς δόντι: Ψοκε2Τοοτη = 4.7 (λόγω περισσότερων πόλων, απαιτείται μικρότερο σώμα στον στάτη)
- Αναλογία δοντιού προς αύλακα: Tooth2Slot = [50, 55] %

5.1.2 Τοπολογίες Δρομέα

Για κάθε έναν από τους παραπάνω συνδυασμούς πόλων και αυλάκων, μελετώνται δύο τοπολογίες δρομέα: μονό V και διπλό V.

Μονό V

- Πάχος μαγνήτη: Magnet Thickness = [6.5, 7.0] mm
- Βάθος V (ποσοστό διαθέσιμου χώρου): DepthOfVPc = [50, 55] %
- Ποσοστό πόλου που καλύπτεται: PolePc = [50, 55]

Διπλό V

(Οι παρακάτω τιμές αναφέρονται στο εξωτερικό V. Το εσωτερικό V παράγεται με σταθερές αναλογίες επί αυτών.)

- Πάχος μαγνήτη: Magnet Thickness = [5.5, 6.0] mm
- Βάθος V (ποσοστό διαθέσιμου χώρου): DepthOfVPc = [60, 65] %
- Ποσοστό πόλου που καλύπτεται: PolePc = [90, 95] %

Σταθερές Αναλογίες για το Εσωτερικό V

- Αναλογία πάχους μαγνήτη: Thickness Ratio = $\frac{3}{4}$
- Ποσοστό βάθους δεύτερου V: SecondDepthOfVPc = 85 %
- Ποσοστό πόλου δεύτερου V: SecondPolePc = 85 %

Συνδυάζοντας όλες τις παραμέτρους, δημιουργούνται συνολικά 192 διαφορετικές διατομές, οι οποίες αναλύονται αυτόματα μέσω της διαδικασίας που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3. Να σημειωθεί ότι οι εξωτερικές διαστάσεις τις μηχανής, έχουν κρατηθεί όμοιες με αυτές του κινητήρα προς βελτίωση ώστε ο χώρος που έχει ανατεθεί για τον κινητήρα να είναι επαρκής για όλες τις παραπάνω διατομές.

5.1.3 Ενεργό Μήκος και αριθμός ενεργών ελιγμάτων

Κάθε παραγόμενη διατομή που περιγράφηκε παραπάνω επιλύθηκε για διαφορετικά μήκη ενεργού μέρους και για διαφορετικά ενεργά τυλίγματα, ώστε να προσεγγιστεί ρεαλιστικά το πλήρες πεδίο λειτουργίας κάθε σχεδίασης.

Συγκεκριμένα, για κάθε διατομή προσομοιώθηκαν 6 διαφορετικά μήκη ενεργού μέρους, από 100 mm έως 160 mm, με βήμα 10 mm. Παράλληλα, για κάθε συνδυασμό πόλων και αυλάκων επιλέχθηκαν διαφορετικές τιμές ενεργών τυλιγμάτων (Effective Turns), ώστε να διασφαλιστεί η κατάλληλη προσαρμογή της ηλεκτρικής απόδοσης αλλά και η δυνατότητα δημιουργίας του κάθε τυλίγματος, με βάση τους κανόνες που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2.

Οι τιμές συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Παράμετροι ανάλυσης ανά συνδυασμό πόλων–αυλάκων

Παράμετρος	Τιμές
Ενεργά Μήκη [mm]	100, 110, 120, 130, 140, 150, 160
Τυλίγματα για 6–54	18, 24, 27, 30, 36
Τυλίγματα για 8–48	16, 20, 24, 32, 40

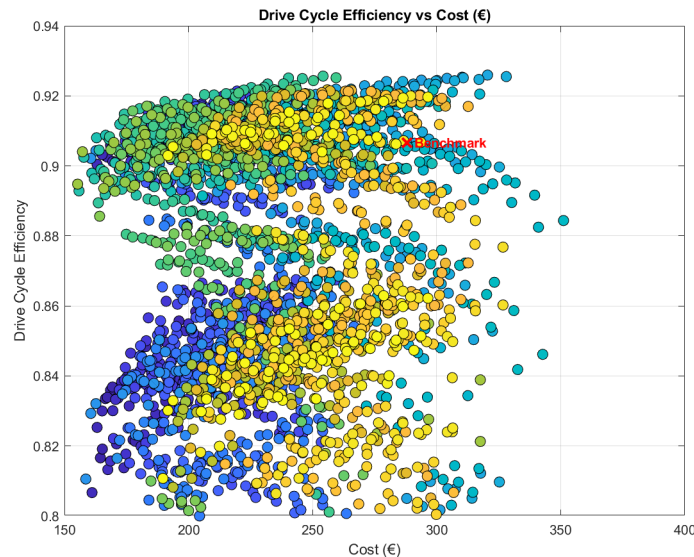
Με βάση τα παραπάνω αναλύθηκαν συνολικά (Αριθμός Διατομών)*(Αριθμός Ενεργών Μηκών)*(Αριθμός Ενεργών τυλιγμάτων) = $192 \cdot 6 \cdot 5 = 5760$ κινητήρες με διαφορές τόσο στις διατομές τους, στα ενεργά μήκη και στον αριθμό ενεργών εν σειρά τυλιγμάτων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι όλες οι υποψήφιες μηχανές προσομοιώνονται θεωρώντας κοινές ηλεκτρικές συνθήκες λειτουργίας, με τάση και ρεύμα εισόδου ίσα με εκείνα του κινητήρα του προς βελτίωση. Η επιλογή αυτή διασφαλίζει τη δίκαιη και συγκρίσιμη αξιολόγηση των επιδόσεων υπό όμοιο σύστημα ελέγχου.

5.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Μετά την παραγωγή των 5760 διαφορετικών κινητήρων, εφαρμόζεται για καθέναν από αυτούς η διαδικασία ανάλυσης που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα κάθε κινητήρα ενσωματώνονται στο μοντέλο οχήματος που περιγράφηκε προηγουμένως, με στόχο την αξιολόγηση της επίδοσής τους υπό ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας.

Καθώς η επίδοση αξιολογείται βάσει της ικανότητας κάθε κινητήρα να ανταποκριθεί πλήρως στις απαιτήσεις του κύκλου οδήγησης που χρησιμοποιείται, είναι αναμενόμενο ότι ορισμένοι κινητήρες θα αδυνατούν να ικανοποιήσουν όλα τα σημεία λειτουργίας. Οι κινητήρες αυτοί αποκλείονται από την επόμενη φάση, η οποία αφορά την επιλογή του τελικού υποψηφίου.



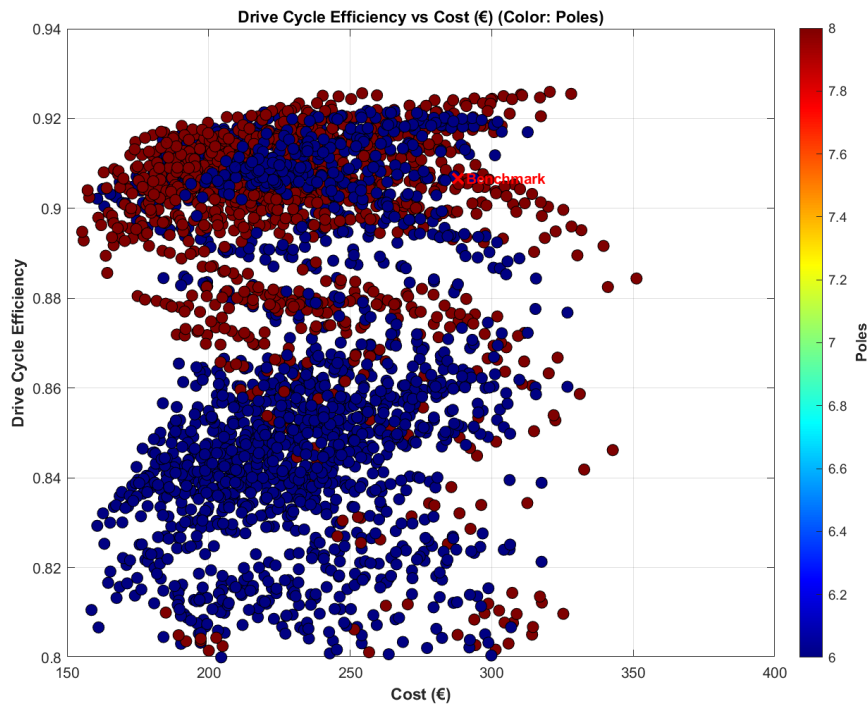
Σχήμα 5.1: Γραφική αναπαράσταση Αποδοτικότητας Κύκλου Απόδοσης και Κόστους κινητήρων.

Τελικά, από τους 5760 αρχικούς κινητήρες, μόλις οι 2900 πληρούν όλα τα κριτήρια και προκρίνονται στη φάση τελικής αξιολόγησης και επιλογής.

5.2.1 Επίδραση Παραμέτρων στην Απόδοση και το Κόστος

Η αποδοτικότητα και το κόστος του κινητήρα επηρεάζονται σημαντικά από παραμέτρους σχεδίασης όπως τα ενεργά εν σειρά τυλίγματα ανά φάση, ο αριθμός πόλων, και το ενεργό μήκος (active length). Για την κατανόηση της επίδρασης αυτών των μεταβλητών, παρουσιάζονται στη συνέχεια γραφήματα που απεικονίζουν τη μεταβολή των βασικών δεικτών απόδοσης ως προς κάθε μία από τις παραμέτρους αυτές.

Πόλοι

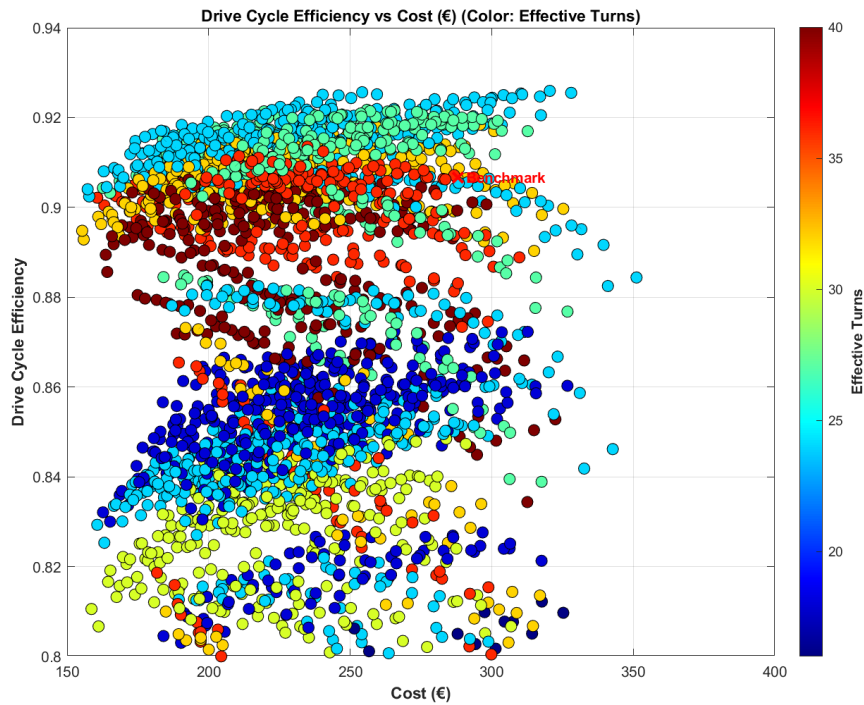


Σχήμα 5.2: Επίδραση Πόλων στην απόδοση και στο κόστος της μηχανής

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.2, οι κινητήρες με 8 πόλους τείνουν να παρουσιάζουν υψηλότερη αποδοτικότητα στον κύκλο οδήγησης, ακόμη και σε περιοχές με σχετικά χαμηλό κόστος. Η συγκέντρωση των κόκκινων σημείων (που αντιστοιχούν σε 8 πόλους) στο άνω αριστερό τμήμα του διαγράμματος υποδηλώνει ότι μπορούν να επιτύχουν καλύτερη ενεργειακή απόδοση χωρίς να απαιτούν υπερβολικά υψηλό κόστος

κατασκευής. Το φαινόμενο αυτό καθιστά τις διατάξεις με 8 πόλους ιδιαίτερα ελκυστικές για εφαρμογές όπου η αποδοτικότητα αποτελεί κρίσιμο κριτήριο σχεδιασμού.

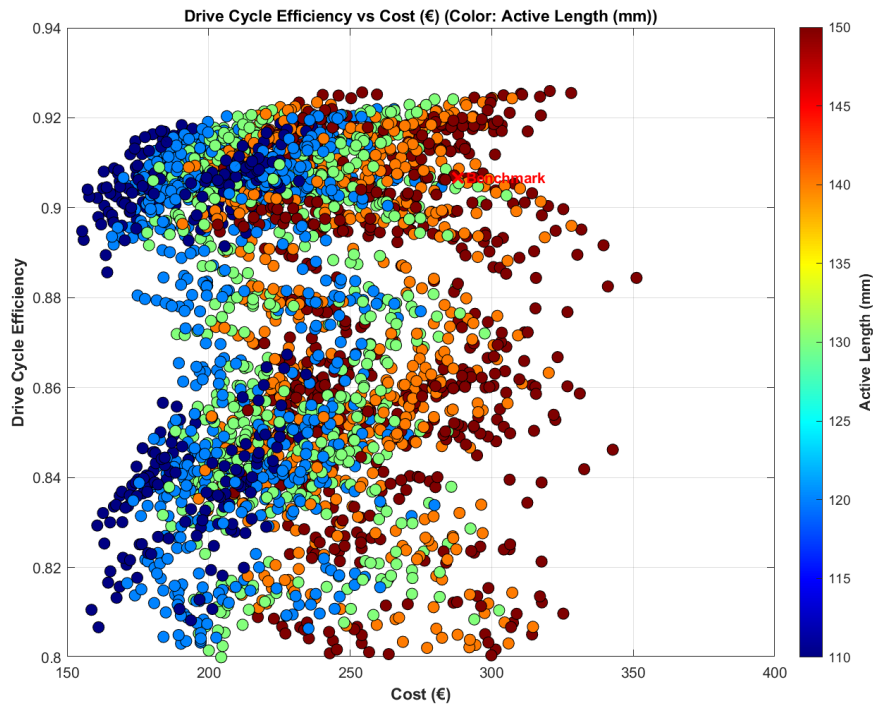
Ενεργά Εν σειρά Τυλίγματα



Σχήμα 5.3: Επίδραση Ενεργών Εν σειρά Τυλιγμάτων στην απόδοση και στο κόστος της μηχανής

Παρατηρώντας το Σχήμα 5.3, διαπιστώνεται ότι οι κινητήρες με αριθμό ελιγμάτων ανά φάση ίσο με 24 επιτυγχάνουν τη μεγαλύτερη αποδοτικότητα στον κύκλο οδήγησης που εξετάζεται. Επιπλέον, οι διατάξεις αυτές καλύπτουν το μέτωπο Pareto σε όλο το εύρος του κόστους, υποδεικνύοντας έναν ιδιαίτερα ευνοϊκό συνδυασμό υψηλής απόδοσης και οικονομικότητας. Η μεταβολή των εν σειρά ενεργών τυλιγμάτων επηρεάζει άμεσα την απόδοση στον συγκεκριμένο κύκλο οδήγησης αφού περισσότερα ενεργά εν σειρά καλώδια μεταφράζονται σε μείωση της ταχύτητας βάσης και μεταφορά της καρδιάς του χάρτη απόδοσης της μηχανής σε μικρότερες ταχύτητες. Είναι εμφανές λοιπόν ότι ο αριθμός ελιγμάτων που προσφέρει την μεγαλύτερη απόδοση για τον συγκεκριμένο κύκλο οδήγησης είναι 24.

Ενεργό Μήκος



Σχήμα 5.4: Επίδραση Ενεργών Μηκών στην απόδοση και στο κόστος της μηχανής

Η επίδραση του ενεργού μήκους στην αποδοτικότητα της μηχανής κατά τον κύκλο οδήγησης δεν είναι ιδιαίτερα έντονη ή άμεσα διακριτή. Ωστόσο, παρατηρείται ότι οι μηχανές με ενεργό μήκος ίσο με 140 και 150 mm καταλαμβάνουν σημαντικό ποσοστό των θέσεων με τις υψηλότερες τιμές αποδοτικότητας, γεγονός που υποδηλώνει μια έμμεση θετική επίδραση.

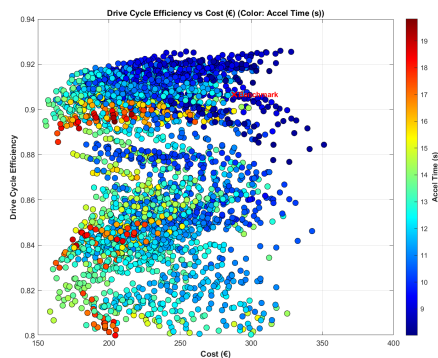
Αντίθετα, η επίδραση του ενεργού μήκους στο κόστος της μηχανής είναι πιο ξεκάθαρη και αναμενόμενη. Καθώς το ενεργό μήκος αυξάνεται, αυξάνεται αντίστοιχα και η συνολική μάζα των ενεργών υλικών, οδηγώντας σε αυξημένο κόστος κατασκευής. Επομένως, παρότι μεγαλύτερο ενεργό μήκος μπορεί να ευνοεί την απόδοση, συνοδεύεται αναπόφευκτα από υψηλότερη οικονομική επιβάρυνση.

5.2.2 Καθορισμός Κριτηρίων Για Τελική Επιλογή Κινητήρα

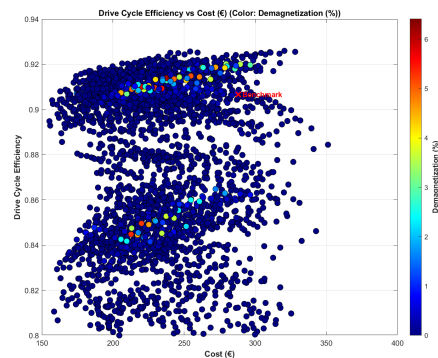
Ο τελικός στόχος είναι να εντοπιστεί το βέλτιστο σχέδιο που ικανοποιεί πλήρως τις απαιτήσεις οδήγησης και προσφέρει τον καλύτερο συμβιβασμό μεταξύ απόδοσης, κόστους και θερμικής ασφάλειας. Για τον σκοπό αυτό θεσπίστηκαν τα ακόλουθα κριτήρια αποδοχής για το φιλτράρισμα όλων των διαθέσιμων μηχανών. Έτσι, τα παρακάτω μεγέθη, συγκρίνονται με αυτά της μηχανής προς βελτίωση και κρατούνται μόνο οι μηχανές που έχουν ίδια ή καλύτερη συμπεριφορά σε όλα τα μεγέθη:

- Ο απαιτούμενος χρόνος επιτάχυνσης του οχήματος από στάση έως τα 100 km/h, με τον εκάστοτε υποψήφιο κινητήρα.
- Η απομαγνήτιση των μαγνητών για το χειρότερο ρεύμα σε περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος
- Η μέγιστη ροπή της μηχανής
- Η μέγιστη ισχύς της μηχανής
- Η θερμική φόρτιση της μηχανής

Παρακάτω παρατίθενται όλα τα γραφήματα των μηχανών συναρτήσει των μεγεθών που έχουν επιλεγεί για κριτήρια αποδοχής.



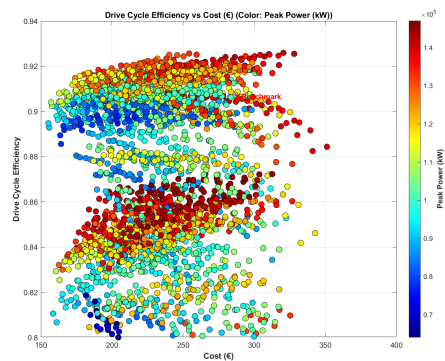
Σχήμα 5.5: Χρόνος επιτάχυνσης



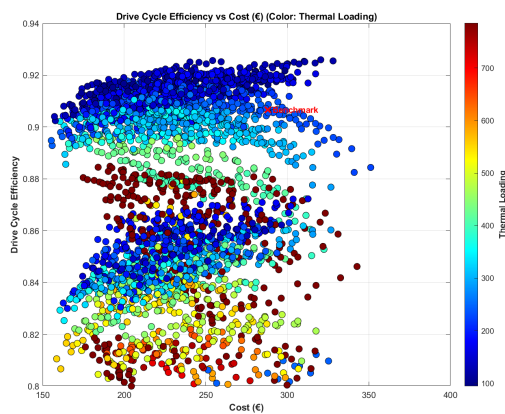
Σχήμα 5.6: Ποσοστό απομαγνήτισης



Σχήμα 5.7: Μέγιστη ροπή

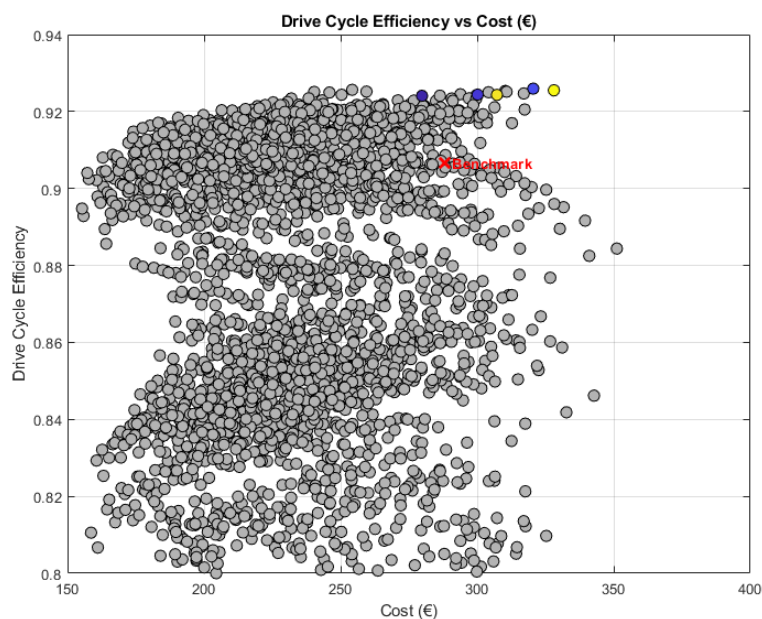


Σχήμα 5.8: Μέγιστη ισχύς



Σχήμα 5.9: Θερμική φόρτιση

Τελικά, μετά την εφαρμογή όλων των παραπάνω κριτηρίων αποδοχής, παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα όλες οι υποψήφιες μηχανές που επιβιώνουν τη φάση τελικής επιλογής. Με γκρι χρώμα απεικονίζονται οι σχεδιάσεις που απορρίπτονται λόγω μη συμμόρφωσης με ένα ή περισσότερα από τα καθορισμένα όρια.



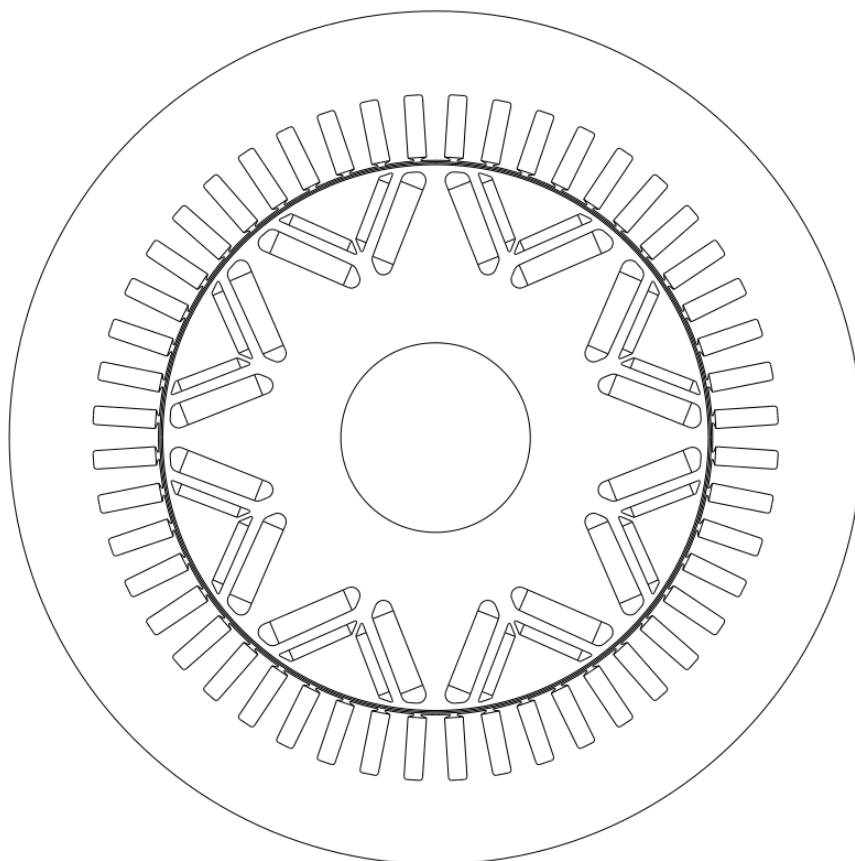
Σχήμα 5.10: Επίδραση Ενεργών Μηκών στην απόδοση και στο κόστος της μηχανής

Όπως φαίνεται στο σχήμα, μόλις τέσσερις μηχανές πληρούν στο σύνολό τους τα απαιτούμενα κριτήρια και παρουσιάζουν συνολικά καλύτερη απόδοση σε σχέση με τον αρχικό κινητήρα. Από αυτές, μία μόνο σχεδίαση ξεχωρίζει, καθώς είναι ταυτόχρονα οικονομικότερη και αποδοτικότερη από τον κινητήρα προς βελτίωση. Συνεπώς, η συγκεκριμένη μηχανή επιλέγεται ως η τελική πρόταση.

5.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΕΛΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

Η μηχανή που κρίθηκε ως βέλτιστη με βάση την παραπάνω την διαδικασία έχει απόδοση στον επιλεγμένο κύκλο οδήγησης ίση με 0,924 ενώ εκτιμώμενο κόστος ίσο με 279 €.

Η δαίτομή και τα κύρια χαρακτηριστικά της μηχανής φαίνονται παρακάτω :



Σχήμα 5.11: Δαίτομή Επιλεγμένης Μηχανής

Πίνακας 5.2: Βασικά γεωμετρικά και σχεδιαστικά χαρακτηριστικά της τελικής επιλεγμένης μηχανής

Χαρακτηριστικό	Τιμή	Μονάδα
Τύπος δρομέα	Διπλό V	–
Αριθμός πόλων	8	–
Πάχος εξωτερικού μαγνήτη σε σχήμα V	5.5	mm
Πάχος εσωτερικού μαγνήτη σε σχήμα V	4.1	mm
Αριθμός ενεργών σπειρών ανά φάση (Effective Turns)	24	–
Ενεργό μήκος (Active Length)	130	mm

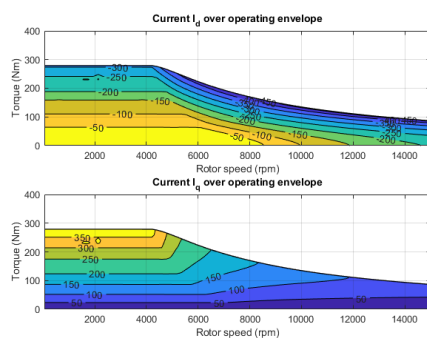
Συγκεντρωμένα, τα κύρια χαρακτηριστικά απόδοσης της μηχανής σε σύγκριση με την μηχανή προς βελτίωση φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.3: Σύγκριση βασικών μεγεθών μεταξύ αρχικού κινητήρα και τελικού επιλεγμένου σχεδίου

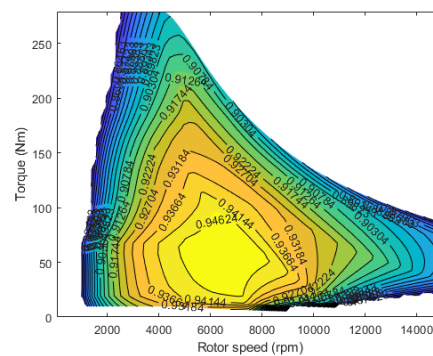
Μέγεθος	Μονάδα	Αρχικός Κινητήρας	Τελικός Κινητήρας	Βελτίωση (%)
Μάζα κινητήρα	kg	33.0	29.7	+10%
Σταθμισμένη απόδοση	%	90.4	92.4	+2 %
Εκτιμώμενο κόστος	€	290	279.8	+3.5%
Απομαγνήτιση (3Φ βραχυκύκλωμα)	%	1.14	0.15	+86.8%
Μέγιστη ροπή	Nm	276	279	+1.1%
Μέγιστη ισχύς	kW	141.8	142.3	+0.4%
Θερμική Φόρτιση	kW/m ²	135	131	+3.0

5.3.1 Χαρακτηριστικά Ροπής - Απόδοσης

Τα ρεύματα και η απόδοση της μηχανής σε όλη την λειτουργία της είναι :



Σχήμα 5.12: Ρεύματα Λειτουργίας της Μηχανής



Σχήμα 5.13: Χάρτης Απόδοσης της Μηχανής

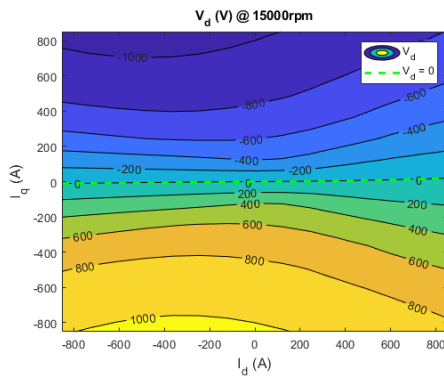
Όπως φαίνεται στα παραπάνω σχήματα η μηχανή λειτουργεί με τα ίδια ρεύματα που λειτουργεί και η μηχανή που παρουσιάζεται στο [22]. Η μέγιστη απόδοση καταγράφεται περίπου στις 6500 στροφές ανά λεπτό, φτάνοντας τιμή 0.951. Σημειώνεται ότι η εν λόγω τιμή λαμβάνει υπόψη και τη μείωση που προκαλείται από την απόδοση του αντιστροφέα, όπως αυτή αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα.

5.3.2 Συμπεριφορά σε Βραχυκύκλωμα

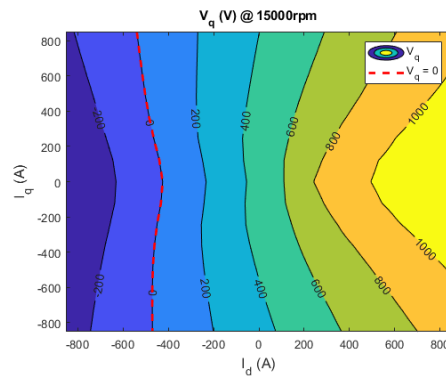
Για την ολοκλήρωση της αξιολόγησης της τελικής επιλεγμένης μηχανής, εξετάζεται η συμπεριφορά της σε συνθήκες τριφασικού βραχυκυκλώματος. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά τόσο στη μόνιμη (σταθεροποιημένη) κατάσταση

όσο και κατά τη μεταβατική φάση του σφάλματος, με στόχο την εκτίμηση της ηλεκτρομαγνητικής καταπόνησης και των επιπτώσεων στο μαγνητικό υλικό. Η ανάλυση αυτή συμβάλλει στην κατανόηση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας της μηχανής υπό ακραίες συνθήκες λειτουργίας.

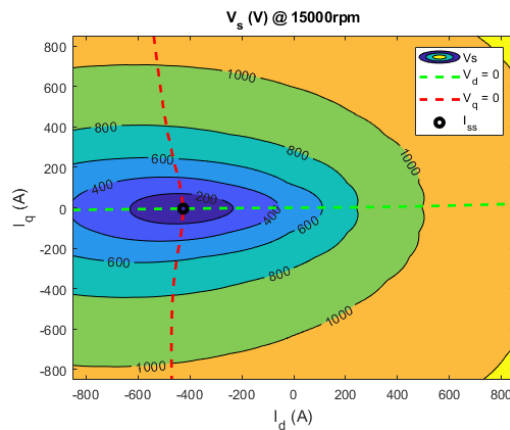
Μόνιμη Κατάσταση



Σχήμα 5.14: Καμπύλες τάσης στον άξονα d κατά τη μόνιμη κατάσταση βραχυκυκλώματος.



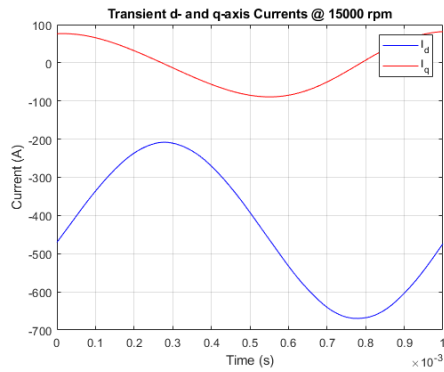
Σχήμα 5.15: Καμπύλες τάσης στον άξονα q κατά τη μόνιμη κατάσταση βραχυκυκλώματος.



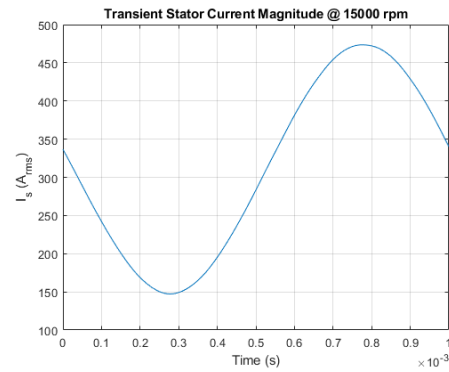
Σχήμα 5.16: Χάρτης της φασικής τάσης και σημείο τομής των καμπυλών $V_d = 0$ και $V_q = 0$, που υποδεικνύει τις συνθήκες βραχυκυκλώματος.

Όπως φαίνεται και απο τα παραπάνω σχεδιαγράμματα, το ρεύμα βραχυκύκλωσης της μηχανής σε μόνιμη κατάσταση κατά τη λειτουργία της μηχανής στη μέγιστη ταχύτητα της είναι περίπου 440 A.

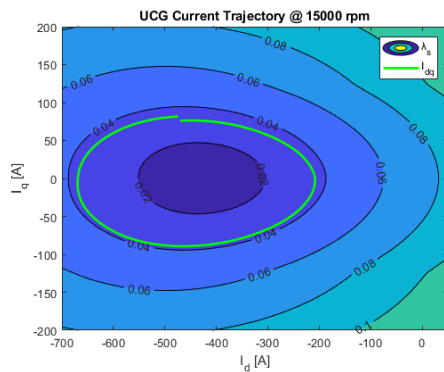
Μεταβατική Κατάσταση



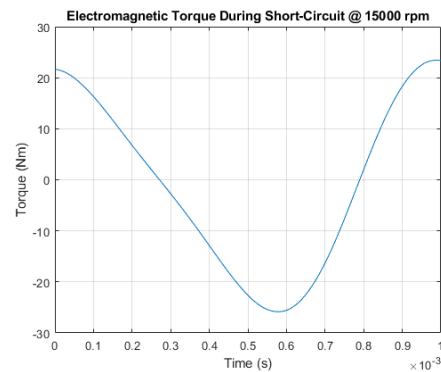
Σχήμα 5.17: Χρονική μεταβολή του ρεύματος στους άξονες d,q κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος.



Σχήμα 5.18: Χρονική μεταβολή του φασικού ρεύματος κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος.



Σχήμα 5.19: Συνολική ροή κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος. Με πράσινο χρώμα η τροχιά των dq ρευμάτων κατά το βραχυκύκλωμα.



Σχήμα 5.20: Χρονική μεταβολή της παραγόμενης ροπής T_e της μηχανής υπό μεταβατικές συνθήκες βραχυκυκλώματος.

Όπως φαίνεται και παραπάνω, η δυσμενέστερη τιμή των ρευμάτων από την πλευρά απομαγνήτισης των μαγνητών είναι για το μέγιστο αρνητικό I_d το οποίο παρατηρείται σε χρόνο περίπου 0.8×10^{-3} s, με τιμή $I_d = -650$ A

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε τη βελτιστοποίηση εμπορικά διαθέσιμου τύπου ηλεκτρικού κινητήρα [22] με κύριους στόχους την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, τη μείωση του κόστους και της μάζας, καθώς και την ενίσχυση της αντοχής των μαγνητών σε συνθήκες βραχυκυκλώματος. Η βασική προσέγγιση στηρίχθηκε στην αντικατάσταση του συμβατικού τυλίγματος με αγωγούς φουρκέτας και στην παραμετρική ανάλυση εναλλακτικών τοπολογιών δρομέα.

6.1 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλάμβανε τα εξής στάδια:

- Παραμετρικός σχεδιασμός στάτη και δρομέα με χρήση γεωμετρικών συνδυασμών.
- Ανάλυση κάθε διατομής μέσω προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων (FEM).
- Εκτίμηση της απόδοσης σε κανονικές και ακραίες συνθήκες λειτουργίας.
- Αξιολόγηση της συμπεριφοράς υπό σφάλμα (απομαγνήτιση).
- Σύζευξη με μοντέλο οχήματος για μελέτη επιδόσεων σε κύκλο οδήγησης.
- Επιλογή των βέλτιστων σχεδιάσεων βάσει τεχνικών και κατασκευαστικών κριτηρίων.

Η παραπάνω διαδικασία επέτρεψε την αξιολόγηση μεγάλου αριθμού σχεδιάσεων σε σύντομο χρονικό διάστημα, με στόχο τη συστηματική προσέγγιση του τελικού κινητήρα. Έτσι, αναλύθηκαν συνολικά 5760 κινητήρες με διαφορές τόσο στην γεωμετρία

της διατομής τους αλλά και στο ενεργό τους μήκος, στα ενεργά εν σειρά τυλίγματα. Όλες αυτές οι μηχανές θεωρήθηκε ότι λειτουργούν με διάταξη ελέγχου και τροφοδοσία όμοιας με αυτής της αρχικής μηχανής, επιτρέποντας έτσι αντικατάσταση μόνο του κινητήρα και όχι όλων των υπόλοιπων διατάξεων του ηλεκτρικού οχήματος. Από την ανάλυση των μηχανών αυτών, επιλέχθηκε ο κινητήρας που παρουσίασε τα ελκυστικότερα χαρακτηριστικά τόσο σε κόστος όσο και σε απόδοση ενώ λήφθηκαν υπόψιν και οι θερμικές συμπεριφορές του κινητήρα αλλά και η απόκριση του σε συνθήκες τριφασικού βραχυκυκλώματος,

6.2 Επίδραση Παραμέτρων στη Σχεδίαση

Η ανάλυση ανέδειξε τη σημαντικότητα διαφόρων παραμέτρων στον συνολικό σχεδιασμό. Ενδεικτικά:

6.2.1 Συνδυασμός Πόλων - Αύλακων

Εξετάστηκαν δύο συνδυασμοί πόλων και αυλάκων, 6 Πόλοι - 54 Αύλακες και 8 Πόλοι - 48 Αύλακες. Για την συγκεκριμένη εφαρμογή οι διατομές με 48 αύλακες στον στάτη και 8 πόλους στον δρομέα, φαίνεται να χαρακτηρίζουν τους καλύτερους σχεδιασμούς, παρότι και οι μηχανές με 6 Πόλους και 54 αύλακες είχαν αρκετά καλές αποδόσεις. Ο τελικός κινητήρας που επιλέχθηκε, ανήκει στην δεύτερη κατηγορία δηλαδή αυτή των 8 πόλων και 48 αυλάκων,

6.2.2 Τοπολογία Δρομέα

Για την αντικατάσταση της τοπολογίας του δρομέα του αρχικού κινητήρα (τοπολογία Δέλτα), εξετάστηκαν δύο τοπολογίες, αυτή του μονού V και αυτή του διπλού V. Η τοπολογία του διπλού V φαίνεται να υπερισχύει για την συγκεκριμένη εφαρμογή έναντι αυτής του μονού V και η τελική σχεδίαση του κινητήρα έχει δρομέα αυτού του τύπου.

6.2.3 Ενεργά Εν σειρά Ελίγματα

10 Διαφορετικές τιμές εξετάστηκαν για τα ενεργά εν σειρά τυλίγματα ανά φάση στον στάτη. Δεδομένης της επίδρασης που έχουν τα Ενεργά Εν σειρά Ελίγματα στην ταχύτητα βάσης και άρα και στον χάρτη απόδοσης της μηχανής, τα τυλίγματα που φαίνεται να έχουν την καλύτερη απόδοση στον συγκεκριμένο κύκλο οδήγησης είναι 24 που είναι και ο αριθμός ελιγμάτων του τελικού κινητήρα.

6.2.4 Ενεργά Μήκη

Όσον αφορά το ενεργό μήκος της μηχανής, αναλύθηκαν τιμές στο εύρος 100 - 150 mm. Οι μηχανές με 100 mm ενεργό μήκος αποκλείστηκαν κατά την αρχική φάση επιλογής αφού δεν πληρούσαν όλες τις προϋποθέσεις για την ολοκλήρωση του κύκλου

οδήγησης. Το ενεργό μήκος της μηχανής μπορεί να φαίνεται ότι δεν παίζει κάποιο άμεσο ρόλο στην απόδοση της μηχανής κατά τον κύκλο οδήγησης αφού υπάρχουν σχεδιασμοί με εξαιρετικά υψηλούς βαθμούς απόδοσης έχοντας όλα σχεδόν τα ενεργά μήκη, ωστόσο παίζουν καθοριστικό ρόλο τόσο στο κόστος της μηχανής όσο και στην θερμική της συμπεριφορά, αφού μικρότερο ενεργό μήκος σημαίνει ότι η θερμότητα επάγεται σε μικρότερη επιφάνεια. Για να συμπεριληφθεί και η απόκριση της θερμότητας της κάθε μηχανής λμβάνεται υπόψιν το μέγεθος του θερμικού φορτίου.

6.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΑΡΧΙΚΗ ΜΗΧΑΝΗ

Σε σύγκριση με την αρχική μηχανή του κινητήρα προς βελτίωση, ο κινητήρας που επιλέχθηκε παρουσίασε :

- Μείωση μάζας κινητήρα κατά 10 %
- Αύξηση της απόδοσης στον κύκλο οδήγησης κατά 2%
- Μείωση του κόστους του κινητήρα κατά 3.5%
- Μεγαλύτερη αντοχή στην απομαγνήτιση στη χειρότερη περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος (παρουσιάζεται το μέγιστο ανάστροφο ρεύμα στον d άξονα) κατά 87%
- Βελτιωμένη μέγιστη ροπή, ισχύ και θερμική συμπεριφορά.

6.4 ΠΡΩΤΟΤΥΠΗ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

- Ανάπτυξη αλγορίθμου παραμετροποιημένης σχεδίασης γεωμετριών ηλεκτρικών μηχανών μόνιμων μαγνητών, με διακριτή ανάλυση της διατομής και ολόκληρου του κινητήρα.
- Σύζευξη μοντέλου κινητήρα με μοντέλο οχήματος, ώστε να αξιολογούνται οι σχεδιαστικές σε επίπεδο συστήματος
- Αντικατάσταση υπάρχοντος κινητήρα με εναλλακτικές τοπολογίες δρομέα και τυλίγματος στάτη.

6.5 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Πιθανά επόμενα βήματα ή σημεία που χρήζουν περαιτέρω διερεύνηση είναι :

- Βελτιστοποίηση τη μικρογεωμετρίας του επιλεχθέντα κινητήρα.
- Σχεδίαση τρισδιάστατου μοντέλου της μηχανής, για τον χαρακτηρισμό της θερμικής αλλά και μηχανικής συμπεριφοράς της μηχανής σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας του κινητήρα.
- Πειραματική επικύρωση της προτεινόμενης λύσης.
- Ολοκληρωμένη μελέτη κατασκευαστικότητας και παραγωγής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. Pyrhonen, T. Jokinen, V. Hrabovcová, Design of Rotating Electrical Machines. Great Britain: John Wiley & Sons, 2008.
- [2] Rahman, Md. Mizanur. (2016). A Novel DTFC Based Efficiency and Dynamic Performance Improvement of IPMSM Drive.
- [3] G. Pellegrino, A. Vagati, P. Guglielmi and B. Boazzo, "Performance Comparison Between Surface-Mounted and Interior PM Motor Drives for Electric Vehicle Application", in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 2, pp. 803-811, Feb. 2012.
- [4] Berardi, G., & Bianchi, N. (2018). Design Guideline of an AC Hairpin Winding. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM).
- [5] S. Hamidizadeh, N. Alatawneh, R. R. Chromik and D. A. Lowther, "Comparison of Different Demagnetization Models of Permanent Magnet in Machines for Electric Vehicle Application," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 52, no. 5, pp. 1-4, May 2016
- [6] https://www.cadfem.net/fileadmin/user_upload/05-cadfem-informs/resource-library/2021_xue_CAD_FEM_Techday2_modeling_of_hairpin_winding_in_motor_cad.pdf
- [7] Gerdan, Y. & aldirnaz, Emine & Guler, Mlk & Tanak, Hasan & Guler, Emre. (2018). Martensitic Transformation and Magnetic Properties of the CuAl, CuAl-Mn, and CuAlMnZn Alloys. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism.
- [8] Patel, Mitul. (2024). A Review on Poles Demagnetization in Permanent Magnet Motors. Journal of Electrical Systems. 20. 509-518. 10.52783/jes.2978.
- [9] Ba, X.; Gong, Z.; Guo, Y.; Zhang, C.; Zhu, J. Development of Equivalent Circuit Models of Permanent Magnet Synchronous Motors Considering Core Loss. Energies 2022, 15, 1995.
- [10] Stipetic, Stjepan & Žarko, Damir & Popescu, Mircea. (2015). Scaling laws for synchronous permanent magnet machines.

- [11] T. A. Lipo, Introduction to AC Machine Design, 2nd ed., Wisc.: Wisconsin Power Electronics Research Center (WISC), 2017.
- [12] H. Trabelsi, A. Mansouri, and M. Gmiden, "On the no-load iron losses calculations of a SMPM using VPM and transient finite element analysis," International Journal of Sciences and Techniques of Automatic Control & Computer Engineering, 2(1):470-483, July 2008.
- [13] E. Dlala, "Comparison of models for estimating magnetic core losses in electrical machines using the finite-element method," IEEE Transactions on Magnetics
- [14] Y. Wang, J. Pries, K. Zhou, H. Hofmann and D. Rizzo, "Computationally Efficient AC Resistance Model for Stator Winding With Rectangular Conductors," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 56, no. 4, pp. 1-9, April 2020,
- [15] Ferrari, Simone & Ragazzo, Paolo & Dilevrano, Gaetano & Pellegrino, Gianmario. (2021). Determination of the Symmetric Short-Circuit Currents of Synchronous Permanent Magnet Machines Using Magnetostatic Flux Maps.
- [16] E. Carraro, M. Morandin and N. Bianchi, "Traction PMASR Motor Optimization According to a Given Driving Cycle," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, no. 1, pp. 209-216, Jan.-Feb. 2016
- [17] Flux-Map Based FEA Evaluation of Synchronous Machine Efficiency Maps / Ferrari, Simone; Ragazzo, Paolo; Dilevrano, Gaetano; Pellegrino, Gianmario. - (2021), pp. 76-81
- [18] C. Lu, S. Ferrari, G. Pellegrino, C. Bianchini and M. Davoli, "Parametric design method for SPM machines including rounded PM shape," 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, OH, USA, 2017, pp. 4309-4315
- [19] H. Αντωνακάκης, Γ.Βαμβακάς, "Σχεδίαση Ηλεκτρικού Κινητήρα για Χρήση σε Όχημα Εξοικονόμησης Ενέργειας", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2019.
- [20] <https://www.iqsdirectory.com/articles/electric-motor/dc-motors.html>
- [21] Γ. Σακκας, "Βελτιστοποίηση γεωμετρίας για διαφορετικά υλικά μονίμων μαγνητών σε κινητήρες για ηλεκτρικά οχήματα", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα 2020
- [22] Sato, Y., Ishikawa, S., Okubo, T., Abe, M. et al., "Development of High Response Motor and Inverter System for the Nissan LEAF Electric Vehicle," SAE Technical Paper 2011-01-0350, 2011