



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

**Βελτιστοποίηση λειτουργίας κινητήρων μεταβλητής
μαγνητικής αντίστασης με μόνιμους μαγνήτες με βάση
κύκλους οδήγησης ηλεκτρικών οχημάτων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Ελένη Καράλη

Επιβλέπων: Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2015



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

**Βελτιστοποίηση λειτουργίας κινητήρων μεταβλητής
μαγνητικής αντίστασης με μόνιμους μαγνήτες με βάση
κύκλους οδήγησης ηλεκτρικών οχημάτων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Ελένη Καράλη

Επιβλέπων: Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την __ Ιουλίου 2015.

.....

Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Στέφανος Μανιάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Σταύρος Παπαθανασίου

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2015

.....
Μαρία Ελένη Καράλη

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

Copyright © Μαρία Ελένη Καράλη, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους συντέλεσαν καθοριστικά στην εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά τον Καθηγητή μου κ. Αντώνιο Κλαδά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση αυτού του θέματος και την πολύπλευρη στήριξη και καθοδήγηση του έως την ολοκλήρωση του. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον υποψήφιο Διδάκτορα κ. Θανάση Σαρηγιαννίδη για την άψογη συνεργασία και την καθοδήγηση σε όλα τα στάδια της διπλωματικής μου εργασίας.

Οφείλω επίσης ένα μεγάλο ευχαριστώ στα μέλη της ερευνητικής ομάδας «Προμηθέας» για τις γνώσεις και τις εμπειρίες που αποκτήσαμε κατά τη διάρκεια της κατασκευής του οχήματος «Πυρφόρος».

Κλείνοντας θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου για την αμέριστη εμπιστοσύνη και συμπαράσταση που μου έδειξε όλα αυτά τα χρόνια καθώς και σε όλους τους φίλους και συμφοιτητές μου, για τις όμορφες εμπειρίες που βιώσαμε κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μας χρόνων.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση της λειτουργίας και η βελτιστοποίηση της οδήγησης σύγχρονων κινητήρων Εσωτερικών Μονίμων Μαγνητών (EMM), σε πολλαπλά σημεία λειτουργίας για εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων. Για τον καθορισμό της βέλτιστης οδήγησης χρησιμοποιούνται εργαλεία δυναμικής προσομοίωσης καθώς και κατάλληλο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.

Αρχικά, διερευνήθηκαν διάφοροι κύκλοι οδήγησης οχημάτων που έχουν οριστεί μέχρι σήμερα από διάφορες ερευνητικές δράσεις και οργανισμούς σε παγκόσμιο επίπεδο. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί ο Νέος Ευρωπαϊκός Κύκλος Οδήγησης, καθώς προσομοιώνει την οδηγική συμπεριφορά ενός οχήματος σε αστικό και υπεραστικό περιβάλλον, ενώ περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων και επιταχύνσεων.

Στη συνέχεια, μελετώνται οι δυνάμεις που επιδρούν σε ένα κινούμενο όχημα και εφαρμόζοντας τις εξισώσεις κίνησης, αναπτύσσεται παραμετροποιημένο μοντέλο ταχύτητας - ροπής. Επιπλέον, εξετάζεται η απόκριση του μοντέλου με είσοδο τον Νέο Ευρωπαϊκό Κύκλο Οδήγησης και τις προδιαγραφές ενός μικρού ηλεκτρικού οχήματος πόλης, το οποίο επιλέγεται ως εφαρμογή.

Σε ένα επόμενο βήμα, πραγματοποιείται βιβλιογραφική διερεύνηση των σύγχρονων μηχανών EMM, όσον αφορά τις αρχές λειτουργίας και την πεδιακή τους συμπεριφορά με βάση τα διανυσματικά διαγράμματα των κυκλωματικών εξισώσεων στο σύστημα αναφοράς ευθέως και κάθετου άξονα (d-q). Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στο πλεονέκτημά τους να λειτουργούν σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων λόγω της δυνατότητας ικανοποιητικής λειτουργίας σε συνθήκες εξασθένησης πεδίου.

Εν συνεχεία, πραγματοποιείται, μέσω κατάλληλου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, μία πλήρης χαρτογράφηση μιας σχεδιασμένης μηχανής EMM για εφαρμογή μικρού ηλεκτρικού οχήματος σε όλα τα δυνατά σημεία λειτουργίας, μέσω κατάλληλης μεταβολής του μέτρου του ρεύματος τυμπάνου, της γωνία του ρεύματος σε σχέση με τον ευθύ (d) άξονα και της ταχύτητα λειτουργίας. Μέσω της συγκεκριμένης ανάλυσης, παρατηρούνται μη γραμμικά φαινόμενα όπως η εκτυπότητα, τα αρμονικά φαινόμενα χώρου και ο μαγνητικός κορεσμός, ιδιαίτερα σε συνθήκες εξασθένησης πεδίου.

Τέλος, με βάση την πλήρη χαρτογράφηση της υπό μελέτη μηχανής και την απόκριση του μοντέλου ταχύτητας – ροπής στον Νέο Ευρωπαϊκό κύκλο οδήγησης, αναπτύσσεται ένας αλγόριθμος αναζήτησης της βέλτιστης πεδιακής και λειτουργικής τροχιάς της μηχανής στον κύκλο οδήγησης με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των απωλειών και των αρμονικών φαινομένων στην παραγόμενη ροπή και στην τάση τυμπάνου, τα αποτελέσματα του οποίου οδήγησαν σε χρήσιμα συμπεράσματα για τα σημεία μέγιστης ροπής ανά ρεύμα και εξασθένησης πεδίου.

Κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν τα εργαλεία λογισμικού Matlab/Simulink και FEMM.

Λέξεις Κλειδιά:

Μηχανές Εσωτερικών Μονίμων Μαγνητών, μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων, χαρτογράφηση πεδιακού μοντέλου, βελτιστοποίηση λειτουργίας σε κύκλο οδήγησης, εξασθένηση πεδίου

Abstract

The object of this diploma thesis is to analyze the operating principles and to optimize the driving techniques of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor involving multiple operating points for electric vehicle applications. For this purpose, dynamic simulation analysis tools as well as a finite element models are used.

The initial step was to investigate the Driving Cycles that have been defined by research initiatives and organizations worldwide. As part of this study, the New European Driving Cycle (NEDC) is chosen as it is a common reference for simulation of the driving behavior in both urban and interurban roads and it also includes of a wide range of speed and acceleration levels.

Afterwards, the acting forces on a moving vehicle are analyzed and by applying the mathematical equations, a parametric model of torque response in speed changes was proposed. In addition, the response in the NEDC is observed in a small vehicle application.

Then, a literature survey on IPM motors was undertaken focusing on operating principles, field analysis of the vector diagrams and equivalent circuit modeling on d-q axis. The main point of interest was the advantage of operating in a wide range of speeds due to satisfying results under field weakening operation.

In a next step a finite element model of an IPM machine designed for small vehicle applications has been developed and a complete mapping in all possible operating points has been exported, by analyzing the field changes under the armature current changes. As part of this mapping, nonlinear and harmonic phenomena were observed, especially under field weakening operation.

Finally, a search algorithm for the optimal field and operational- sequence in a Driving Cycle was proposed focusing on the minimization of losses and harmonic distortion using the Mapping and the Speed-Torque response of the NEDC. The obtained results lead to useful conclusions for the operating response of the IPM motor under Maximum Torque and under field weakening operation-.

In this work, Matlab/Simulink and FEMM softwares have been implemented.

Keywords:

Interior Permanent Magnet Machines, finite elements method, mapping of field model, optimal drive in driving cycles, field weakening.

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή	11
1.1.	Ηλεκτρικό όχημα	11
1.2.	Ιστορία Ηλεκτρικών Οχημάτων	11
1.3.	Αλληλεπίδραση με το αστικό περιβάλλον	15
1.4.	Διάρθρωση της παρούσας εργασίας	16
2.	Δομή Ηλεκτρικού Οχήματος.....	18
2.1.	Τυπική διαδρομή ισχύος	18
2.2.	Δομή Συστήματος Κίνησης	19
3.	Τεχνική μοντελοποίησης της σχέσης ροπής - ταχύτητας σε κινούμενο όχημα.....	31
3.1.	Εισαγωγή	31
3.2.	Διαμήκεις Δυνάμεις.....	31
3.3.	Σύστημα μετάδοσης και απαίτηση ροπής κατά την κίνηση	34
3.4.	Παραμετροποιημένο μοντέλο Απαίτησης Ροπής	35
3.5.	Κύκλοι Οδήγησης (Driving Cycles)	37
4.	Σύγχρονες μηχανές εσωτερικών μονίμων μαγνητών	42
4.1.	Εισαγωγή	42
4.2.	Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και εφαρμογές των σύγχρονων κινητήρων εσωτερικών μονίμων μαγνητών	46
4.3.	Μαθηματικό μοντέλο της μηχανής IPM	49
4.4.	Εξασθένηση πεδίου.....	53
5.	Μεθοδολογία χαρτογράφησης ηλεκτρικών μηχανών	56
5.1.	Επιλογή Γεωμετρίας και υλικών	56
5.1.1.	Διατάξεις εσωτερικών μονίμων μαγνητών	56
5.1.2.	Τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών [17]	56
5.1.3.	Επιλογή κατασκευαστικών υλικών	61
5.1.4.	Γεωμετρία της υπό μελέτη Σύγχρονης Μηχανής Εσωτερικών μονίμων μαγνητών.....	65
5.2.	Μεθοδολογία χαρτογράφησης λειτουργικής κατάστασης ηλεκτρικών μηχανών σε πολλαπλά σημεία λειτουργίας.....	66
5.2.1.	Η μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM) και το λογισμικό FEMM	66
5.2.2.	Αλγόριθμος χαρτογράφησης λειτουργίας σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών και αποτελέσματα προσομοίωσης	68
5.2.3.	Παράμετροι μηχανής	85
5.3.	Περιοχές ενίσχυσης και εξασθένησης πεδίου	87
6.	Αλγόριθμος βέλτιστης οδήγησης στο Νέο Ευρωπαϊκό κύκλο οδήγησης	92

6.1. Εισαγωγή	92
6.2. Αναγωγή σε πρόβλημα συνδυαστικής βελτιστοποίησης	93
7. Συμπεράσματα	100
Παράρτημα.....	104
Α. Μοντέλο Ροπής-Ταχύτητας σε κινούμενο όχημα υλοποιημένο σε περιβάλλον Matlab/Simulink.....	104

1. Εισαγωγή

1.1. Ηλεκτρικό όχημα



Η ραγδαία και συνεχώς αυξανόμενη εξάπλωση της χρήσης οχημάτων με κινητήρες εσωτερικής καύσεως κατά τις τελευταίες δεκαετίες έχει συντελέσει σε μεγάλο βαθμό σε δύο ιδιαίτερα σημαντικά προβλήματα που απαιτούν οπωσδήποτε λύση. Το πρώτο από αυτά σχετίζεται με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, σε τοπικό επίπεδο αλλά και σε ολόκληρο τον πλανήτη. Στα μεγάλα αστικά κέντρα παρατηρούνται πολύ υψηλές συγκεντρώσεις αερίων ρύπων. Οι ίδιοι ρύποι είναι αυτοί που σε παγκόσμιο επίπεδο συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και την κλιματική αλλαγή. Το δεύτερο πρόβλημα σχετίζεται με την ενεργειακή κρίση λόγω εξάντλησης των ορυκτών πόρων και την προσπάθεια που γίνεται ώστε να επέλθει ανεξάρτηση από αυτούς.

Η περιβαλλοντική ευαισθησία, η συνειδητοποίηση της κλιματικής αλλαγής και η εξάντληση των ενεργειακών πόρων οδηγούν ολοένα και περισσότερο στην ανεύρεση εναλλακτικών πηγών ενέργειας, και κυρίως, ανανεώσιμους. Στο πνεύμα των νέων δεδομένων οι κατασκευαστές οχημάτων, οδηγήθηκαν στο σχεδιασμό και την κατασκευή ηλεκτρικών οχημάτων, ενώ τελευταία εντατικοποιούν τις προσπάθειές τους για μαζική παραγωγή και προώθηση των ηλεκτρικών οχημάτων. Το ηλεκτρικό όχημα εξασφαλίζει ελάχιστη ηχορύπανση, μηδενική εκπομπή ρύπων, τουλάχιστον κατά τη λειτουργία του οχήματος, ελάχιστη θερμική επιβάρυνση στο περιβάλλον, λόγω του εξαιρετικά υψηλού βαθμού απόδοσης του ηλεκτρικού κινητήρα και αποδεδειγμένα τους χρήστες από την χρήση υγρών καυσίμων. Στο άμεσο μέλλον, αναμένεται ότι η ευρεία χρήση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων θα έχει σαν αποτέλεσμα τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα στις αστικές περιοχές. Η ευρεία εισαγωγή των αυτοκινήτων αυτών στην κυκλοφορία είναι τεχνικά εφικτή, και κοινωνικά αποδεκτή. Ωστόσο, η μετάβαση στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο, και ειδικά η αειφόρος μετάβαση δεν είναι καθόλου εύκολη και απαιτεί την εκπλήρωση ορισμένων συνθηκών και προϋποθέσεων όπως την ανάπτυξη υποδομών (π.χ. ηλεκτρικών δικτύων και σταθμών τροφοδότησης), την αξιοποίηση ανανεώσιμων μορφών ενέργειας και την ώθηση της αγοράς μέσω κρατικών κινήτρων.

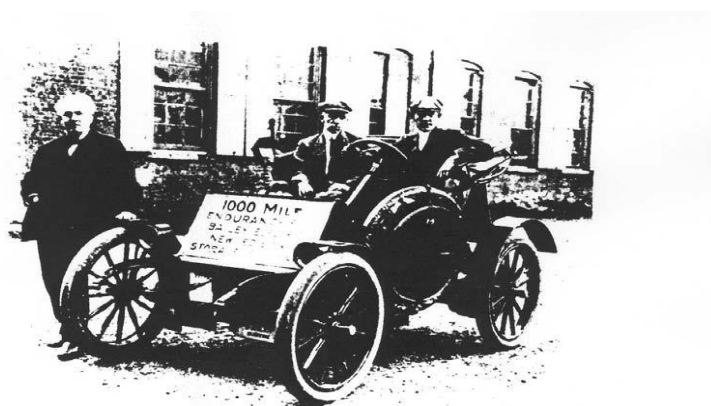
1.2. Ιστορία Ηλεκτρικών Οχημάτων

1.2.1. Η πρώτη περίοδος: η ακμή

Αν και τα τελευταία χρόνια γίνεται ιδιαίτερος λόγος για τα «νέα» ηλεκτρικά οχήματα ως μια καινούργια τεχνολογία, εντούτοις η εμφάνισή τους τοποθετείται αρκετά πίσω στο χρόνο. Το ηλεκτρικό όχημα και το συμβατικό, μοιράζονται ένα κοινό παρελθόν. Έτσι, τα ηλεκτροκίνητα οχήματα έχουν μια μακρόχρονη ιστορία που ξεκινά στα μέσα

του 19ου αιώνα, ταυτόχρονα περίπου με την εμφάνιση των συμβατικών οχημάτων (οχήματα ατμοκίνητα και οχήματα με Μ.Ε.Κ.). Από τότε μέχρι την εποχή μας τα ηλεκτροκίνητα οχήματα ήταν κυρίως στην αφάνεια μέχρι να αναζωπυρωθεί πρόσφατα το ενδιαφέρον γι' αυτά, λόγω της κλιματικής αλλαγής και της πετρελαϊκής κρίσης.

Οι πρώτες προσπάθειες για δημιουργία ενός μηχανοκίνητου οχήματος το οποίο να κινείται με ηλεκτρισμό χρονολογούνται τη δεκαετία του 1830 ως εφευρέσεις με καθαρά δοκιμαστικό-πειραματικό χαρακτήρα. Περισσότερο πρακτικά και επιτυχή οχήματα ήταν αυτά που φτιάχτηκαν από τον Αμερικανό Thomas Davenport (1834) και από τον σκωτσέζο Robert Davidson περί το 1842. Το 1847 ο Αμερικανός Moses Farmer κατασκεύασε ένα όχημα που μπορούσε να μεταφέρει δύο άτομα. Την ίδια εποχή ο καθηγητής Charles Page έφτιαξε ένα όχημα με 100 συσσωρευτές και κινητήρα 16 ίππων που μετέφερε 12 άτομα με ταχύτητα μέχρι και 19 μίλια/ώρα. Το 1847 οι Lilly και Colton έφτιαξαν ένα ηλεκτρικό όχημα που τροφοδοτούνταν από κεντρικό σταθμό χάρη σε ηλεκτροφόρες ράγες. Το σημαντικότερο πρόβλημα που αντιμετώπιζαν όλες αυτές οι πρώιμες κατασκευές ήταν οι συσσωρευτές με τα μειονεκτήματά τους, όπως τον χαμηλό λόγο ενέργειας προς όγκο και βάρος αλλά κυρίως τη μη δυνατότητα επαναφόρτισης. Το πρόβλημα επαναφόρτισης επιλύθηκε το 1859, όταν ο Γάλλος Gaston Plante ανακάλυψε για πρώτη φορά το στοιχείο Μόλυβδου -Οξέος (Pb-Acid) που έχει δυνατότητα επαναφόρτισης. Αρκετά χρόνια αργότερα έκαναν την εμφάνισή τους διάφοροι βελτιωμένοι τύποι συσσωρευτών μεταξύ των οποίων ξεχώρισε ένας συσσωρευτής Νικελίου-Σιδήρου (Ni-Fe). Η κατασκευή του έγινε το 1910 από τον Thomas Edison και ήταν το πιο προηγμένο στοιχείο τεχνολογικά την εποχή εκείνη. Μάλιστα χρησιμοποιήθηκε σε ένα όχημα που κατασκεύασε ο ίδιος ο Edison το οποίο απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.1: Ο Thomas Edison και το ηλεκτροκίνητο όχημά του [24]

Στη διάρκεια αυτών των δεκαετιών η ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων είναι αρκετά μεγάλη τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Αμερική. Οι τεχνικές επιδόσεις μάλιστα των ηλεκτροκίνητων οχημάτων ήταν αρκετά αξιόλογες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το όχημα του Βέλγου Camille Jenatzy το οποίο κατά τη δεκαετία του 1890 έσπασε το φράγμα των 100 χλμ./ώρα. Μέχρι τη δεκαετία του 1920 η αγορά των ηλεκτροκίνητων οχημάτων ανθούσε. Μάλιστα υπάρχουν στοιχεία που δείχνουν το 1890 ο αριθμός των αυτοκινήτων που πουλήθηκαν στην Αμερική ήταν περίπου

4200 εκ των οποίων το 38% ήταν ηλεκτροκίνητα, το 22% βενζινοκίνητα και το 40 % ατμοκίνητα. Ανάμεσα στις διάφορες χρονολογίες επίσης ξεχωρίζει το έτος 1912 το οποίο στις ΗΠΑ ήταν η πιο γόνιμη χρονιά των ηλεκτρικών οχημάτων, αφού 34000 ηλεκτρικά αυτοκίνητα βρίσκονταν σε κυκλοφορία, αρκετά μεγάλος αριθμός για την εποχή. Οι επιδόσεις ταχύτητας που κυμαίνονταν 32 έως 48 χλμ./ώρα ήταν αρκετά ικανοποιητικές. Βασικό πλεονέκτημα των ηλεκτρικών οχημάτων σε σχέση με τα βενζινοκίνητα και τα ατμοκίνητα ήταν ότι είχαν πολύ πιο εύκολη εκκίνηση, αφού αρκούσε το “κλείσιμο” ενός διακόπτη για να ξεκινήσει απ’ ευθείας. Αντίθετα, τα βενζινοκίνητα οχήματα απαιτούσαν χειροκίνητη εκκίνηση, ενώ τα ατμοκίνητα απαιτούσαν μια προθέρμανση που διαρκούσε περίπου 3 τέταρτα της ώρας.

Συνεπώς τα ηλεκτρικά οχήματα είχαν ευρεία απήχηση στις υψηλά κοινωνικές τάξεις και αποτελούσαν οχήματα πολυτελείας. Επιπλέον, το οδικό δίκτυο διασύνδεσης των πόλεων δεν ήταν κατάλληλο για υπεραστικές μετακινήσεις. Όντας λοιπόν περιορισμένα για αστική χρήση και μόνο, τα ηλεκτρικά οχήματα επικρατούσαν έναντι των άλλων τύπων μέχρι τη δεκαετία του 1920.

1.2.2. Η μεταστροφή στα βενζινοκίνητα οχήματα

Στη δεκαετία του 1920 έγινε μεταστροφή της αγοράς στα βενζινοκίνητα οχήματα στις ΗΠΑ, κυρίως για τους παρακάτω λόγους:

- Η βελτίωση του υπεραστικού οδικού δικτύου αύξησε την ανάγκη για οχήματα μεγάλης αυτονομίας
- Η ανακάλυψη μεγάλων αποθεμάτων πετρελαίου κατέστησε ιδιαίτερα χαμηλό το κόστος των καυσίμων
- Η εφεύρεση του ηλεκτρικού εκκινητή έδωσε τη δυνατότητα στα βενζινοκίνητα οχήματα για εύκολη εκκίνηση
- Η μαζική παραγωγή των βενζινοκίνητων οχημάτων από τον Henry Ford σε αρκετά χαμηλές τιμές, σε αντίθεση με τις τιμές των ηλεκτρικών οχημάτων που συνεχώς αυξάνονταν.

Η μεταστροφή αυτή εμφανίστηκε και στην Ευρώπη. Ως αποτέλεσμα, σταδιακά αποσύρθηκαν τα ηλεκτρικά οχήματα. Αυτή η περίοδος της παρακμής των ηλεκτρικών οχημάτων κράτησε περίπου από το 1930 έως το 1990. Στο διάστημα αυτό ελάχιστες προσπάθειες έγιναν στην έρευνα των ηλεκτρικών οχημάτων. Μάλιστα, η χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων έπαψε εντελώς μέχρι το 1960 όπου άρχισε και πάλι να αναζωπυρώνεται το ενδιαφέρον, διότι το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα αυτοκίνητα στα αστικά κέντρα είχε αρχίσει να γίνεται ορατό, ενώ παράλληλα έπρεπε να αναζητηθούν εναλλακτικές ενεργειακές λύσεις.

Ανάμεσα στα διάφορα οχήματα που παρουσιάστηκαν μέσα στην περίοδο αυτή αξίζει να αναφερθεί το όχημα GMC Handivan του 1966, με καινοτομικό σύστημα τροφοδοσίας που αποτελούνταν από κυψέλες καυσίμου (fuel cells) υδρογόνου, ωστόσο με αρκετά μειονεκτήματα, όπως μεγάλο βάρος και κόστος, διαρροές υδρογόνου και πολυπλοκότητα κατασκευής. Παράλληλα με τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα την εποχή εκείνη παρουσιάστηκαν από πολλές αυτοκινητοβιομηχανίες και ορισμένα υβριδικά οχήματα, με συνδυασμένη χρήση ηλεκτροκινητήρα και

βενζινοκινητήρα. Τα οχήματα αυτά ως γνωστόν συνδυάζουν πλεονεκτήματα των ηλεκτρικών και των συμβατικών οχημάτων.

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



Σχήμα 1.2. Το EV1 (1996) της General Motors με ισχύ εξόδου 137 hp στις 7000 RPM.

Χάρη σε αυτές τις προσπάθειες υπήρξε μια σημαντική εξέλιξη στην τεχνολογική ανάπτυξη αυτών μέχρι να φτάσουμε στην τρίτη χρονολογική περίοδο της εξέλιξης των ηλεκτρικών οχημάτων που επεκτείνεται μέχρι και σήμερα και κατά τη διάρκεια της οποίας το ενδιαφέρον για τη χρήση τους έχει αλλάξει ριζικά εξ' αιτίας της κλιματικής αλλαγής και της αύξησης της τιμής και εξάντλησης του πετρελαίου. Σήμερα, το ηλεκτρικό όχημα, μετά από πολύ καιρό είναι για άλλη μια φορά στο προσκήνιο, πλέον σαν βιώσιμο μέσον διατήρησης της ποιότητας του αστικού μας περιβάλλοντος.

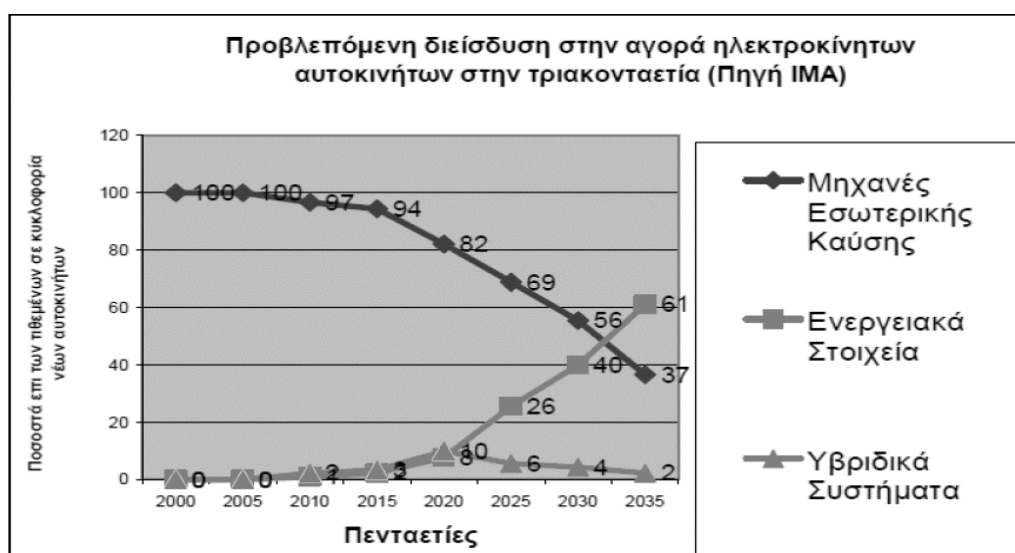
1.2.3. Η αγορά σήμερα

Λόγω της μειωμένης αυτονομίας και επιδόσεων τους σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα αλλά και του μεγάλου σχετικά κόστους κατασκευής τους τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα δεν έχουν ακόμα διατεθεί σε μεγάλους αριθμούς και σε ποικιλία μοντέλων στην αγορά.

Ωστόσο, στα επόμενα χρόνια οι συσσωρευτές θα βελτιωθούν σημαντικά και θα αποκτήσουν τα χαρακτηριστικά εκείνα που θα επιτρέψουν την μαζική παραγωγή και διείσδυση στην αγορά πρακτικών μικρών αυτοκινήτων πόλης. Οι τιμές των

ηλεκτρικών αυτοκινήτων θα συμπιεσθούν μόλις αρχίσει η μαζική παραγωγή τους. Ήδη σημειώνονται επιτυχημένες επιχειρηματικές δράσεις στον τομέα αυτόν, θα χρειαστεί όμως εντονότερη κοινωνική δράση προς την κατεύθυνση της αλλαγής των συνθηκών των χρηστών και της εξοικειώσής τους με την ιδέα της χρήσης τέτοιων μικρών αυτοκινήτων πόλης. Θα χρειαστεί επίσης εκτίμηση των τοπικών συνθηκών σε επίπεδα πόλης και χώρας για τη διαπίστωση και ποσοτικοποίηση των ωφελημάτων των χρηστών, της εθνικής οικονομίας και του κοινωνικού συνόλου προκειμένου να θεσπισθούν ανάλογα κίνητρα διάδοσης της χρήσης τους.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η προβλεπόμενη διεύθυνση των ηλεκτροκίνητων αυτοκινήτων στην παγκόσμια αγορά. Προβλέπεται ότι το 2035 θα ταξινομούνται σε ολόκληρο τον κόσμο νέα αυτοκίνητα τα οποία θα είναι σε ποσοστό 63% ηλεκτροκίνητα και σε ποσοστό 37% συμβατικά [1].



Σχήμα 1.3. Διεύθυνση ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων στην αγορά[1]

1.3. Αλληλεπίδραση με το αστικό περιβάλλον

Πολλές από τις πιο δυσάρεστες καταστάσεις σε μια πόλη προκαλούνται άμεσα ή έμμεσα από τα οχήματα. Πέρα από τα οδικά ατυχήματα, η ατμοσφαιρική ρύπανση και η ηχορύπανση είναι από τα εντονότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι κάτοικοι των πόλεων εξαιτίας της μηχανοκίνησης. Η ατμοσφαιρική ρύπανση και η ηχορύπανση αποτελούν την αφορμή από την οποία απλοί πολίτες και μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες στρέφουν το ενδιαφέρον τους σε «καθαρές» μεταφορικές λύσεις, όπως το ηλεκτρικό όχημα.

Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στην προστασία και στη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος. Τα πλεονεκτήματά τους σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα είναι αρκετά και σημαντικά ώστε μια πιθανή αντικατάσταση των συμβατικών οχημάτων από ηλεκτρικά θα μπορούσε να αποτελέσει έναν τρόπο άμεσης αναβάθμισης της ποιότητας ζωής στα αστικά κέντρα.

Στη μελέτη Tracking Clean Energy Progress (2013) της Διεθνούς Επιτροπής Ενέργειας αναφέρεται ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και η ηλεκτροκίνηση αποτελούν τις τεχνολογίες οι οποίες κατά κύριο λόγο μπορούν να υποστηρίξουν το σενάριο αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη μόνο κατά 2oC έως το 2020. Εκτιμήσεις κάνουν λόγο για 20 εκατομμύρια ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές και υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα τα οποία θα πρέπει να κυκλοφορούν με ορίζοντα το ίδιο έτος, που σημαίνει ότι έως τότε οι πωλήσεις των οχημάτων με συσσωρευτές θα πρέπει να αυξάνονται κατά περίπου 80% και των ηλεκτρικών υβριδικών κατά 50% [5].

Στην πράξη διαπιστώνεται απόκλιση από αυτούς τους στόχους. Στον βαθμό που η ηλεκτρική ενέργεια την οποία θα χρησιμοποιεί ο συγκεκριμένος τύπος οχημάτων παράγεται από ανανεώσιμες πηγές, αυξάνεται περαιτέρω η οικολογική διάσταση της χρήσης τους. Η χρήση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων θεωρείται ότι μπορεί να αποτελέσει μέσο διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών στο εθνικό ηλεκτρικό σύστημα, λόγω πρόσθετων πλεονεκτημάτων που αφορούν στην ισορροπία του συστήματος ή στην κατανομή των αιχμών ζήτησης. Επίσης, η εφαρμογή του net-metering μπορεί να διευκολύνει τη φόρτιση από φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, αξιοποιώντας τη διασπαρμένη παραγωγή και αποφορτίζοντας το σύστημα και τις κεντρικές ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες. Τον δικό τους ρόλο διαδραματίζουν παράμετροι όπως η φόρτιση σε ώρες της ημέρας με χαμηλή ζήτηση και η μέθοδος της «μικροαποθήκευσης» στα ίδια τα οχήματα, ιδιαίτερα χρήσιμη για μικρά αυτόνομα δίκτυα όπως τα νησιωτικά.

1.4. Διάρθρωση της παρούσας εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται συνολικά από 7 κεφάλαια. Το 1^ο κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή του αναγνώστη στην τεχνολογία του ηλεκτρικού οχήματος μέσα από μία ιστορική αναδρομή από την πρώτη προσπάθεια κατασκευής έως την διείσδυση του στην αγορά σήμερα.

Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βασική δομή του συστήματος κίνησης σε αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα και περιγράφονται αναλυτικά τα βασικά υποσυστήματα, ενώ στο 3^ο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στις διαμήκεις δυνάμεις που ασκούνται σε ένα κινούμενο όχημα και παρουσιάζεται η σημασία των κύκλων οδήγησης. Βάσει των εξισώσεων κίνησης παρουσιάζεται ένα μοντέλο υπολογισμού της ροπής – ταχύτητας για κινούμενο όχημα καθώς και για τον ηλεκτρικό κινητήρα του. Επιπλέον περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων του μοντέλου για τον Νέο Ευρωπαϊκό Κύκλο Οδήγησης σε αστικούς και υπεραστικούς δρόμους για μικρό ηλεκτρικό όχημα πόλης.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται μία εισαγωγή στην θεωρία των σύγχρονων μηχανών με μόνιμους μαγνήτες ενώ σκιαγραφούνται τα πλεονεκτήματα που τις καθιστούν κατάλληλες για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης. Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα μοντέλο σχεδίασης του συγκεκριμένου τύπου μηχανής, ενώ γίνεται μια πλήρης και αναλυτική χαρτογράφηση του σε πολλαπλά σημεία λειτουργίας.

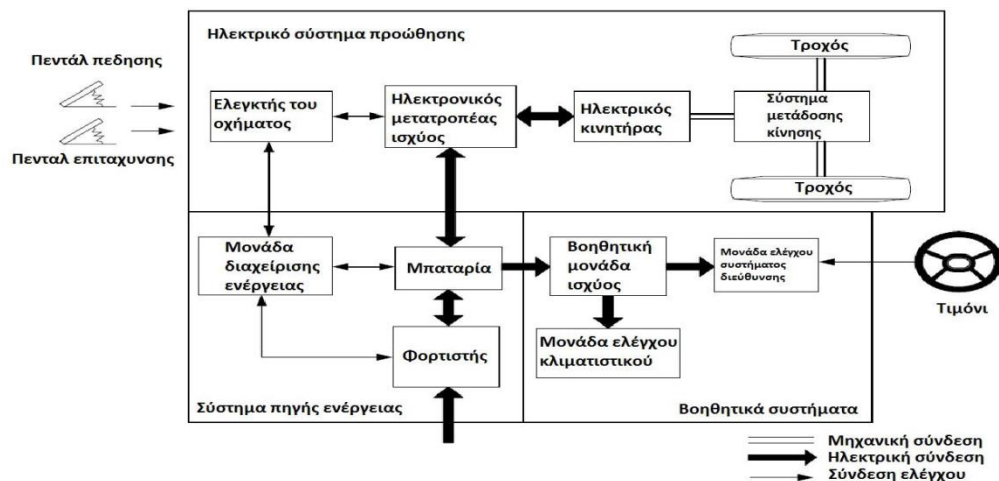
Στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος αναζήτησης βέλτιστης λειτουργικής τροχιάς με κριτήριο την ελαχιστοποίηση των απωλειών και των αρμονικών φαινομένων που οφείλονται σε αρμονικές χώρου σε οδήγηση του κινητήρα στον Νέο Ευρωπαϊκό κύκλο οδήγησης.

Τέλος, στο 7^ο κεφάλαιο περιλαμβάνονται τα βασικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και παρατίθενται ορισμένα ζητήματα που χρήζουν μελλοντικής έρευνας και ενασχόλησης.

2. Δομή Ηλεκτρικού Οχήματος

2.1. Τυπική διαδρομή ισχύος

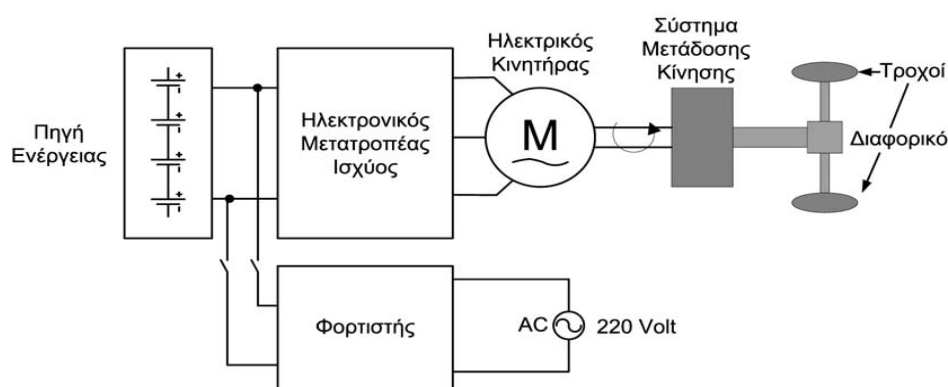
Μία τυπική διαδρομή ισχύος ενός σύγχρονου ηλεκτρικού οχήματος παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα. Η διαδρομή ισχύος αποτελείται από τρία κυρίως συστήματα: το σύστημα της πηγής ενέργειας, το ηλεκτρικό σύστημα προώθησης και τα διάφορα βοηθητικά συστήματα. Το σύστημα της πηγής ενέργειας αποτελείται από την μπαταρία, τη μονάδα διαχείρισης ενέργειας και τον φορτιστή της μπαταρίας. Το ηλεκτρικό σύστημα προώθησης αποτελείται από τον ελεγκτή του οχήματος, τον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος, τον ηλεκτρικό κινητήρα και το σύστημα μετάδοσης κίνησης (κιβώτιο ταχυτήτων, διαφορικό, τροχοί). Τέλος, τα διάφορα βοηθητικά συστήματα είναι η βοηθητική μονάδα ισχύος, η μονάδα ελέγχου του συστήματος διεύθυνσης και η μονάδα ελέγχου του κλιματιστικού.



Σχήμα 2.1. Τυπική διαδρομή ισχύος σε ένα ηλεκτρικό όχημα[2]

Με βάση τα σήματα εισόδου από τα πεντάλ επιτάχυνσης και πέδησης, ο ελεγκτής του οχήματος δίνει τα κατάλληλα σήματα ελέγχου στον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος, ο οποίος ελέγχει τη ροή ισχύος από την μπαταρία προς τον ηλεκτροκινητήρα κατά την προώθηση του οχήματος και από τον ηλεκτροκινητήρα (γεννήτρια) προς την μπαταρία κατά τις περιόδους της αναγεννητικής πέδησης. Η μονάδα διαχείρισης ενέργειας σε συνδυασμό με τον ελεγκτή του οχήματος, ελέγχει την ανάκτηση ενέργειας κατά την αναγεννητική πέδηση. Ακόμη, η μονάδα διαχείρισης ενέργειας συνεργάζεται με τον φορτιστή της μπαταρίας για τον έλεγχο της φόρτισής της. Η μονάδα βοηθητικής ισχύος παρέχει την κατάλληλη ισχύ στα διάφορα βοηθητικά συστήματα του οχήματος [2].

2.2. Δομή Συστήματος Κίνησης

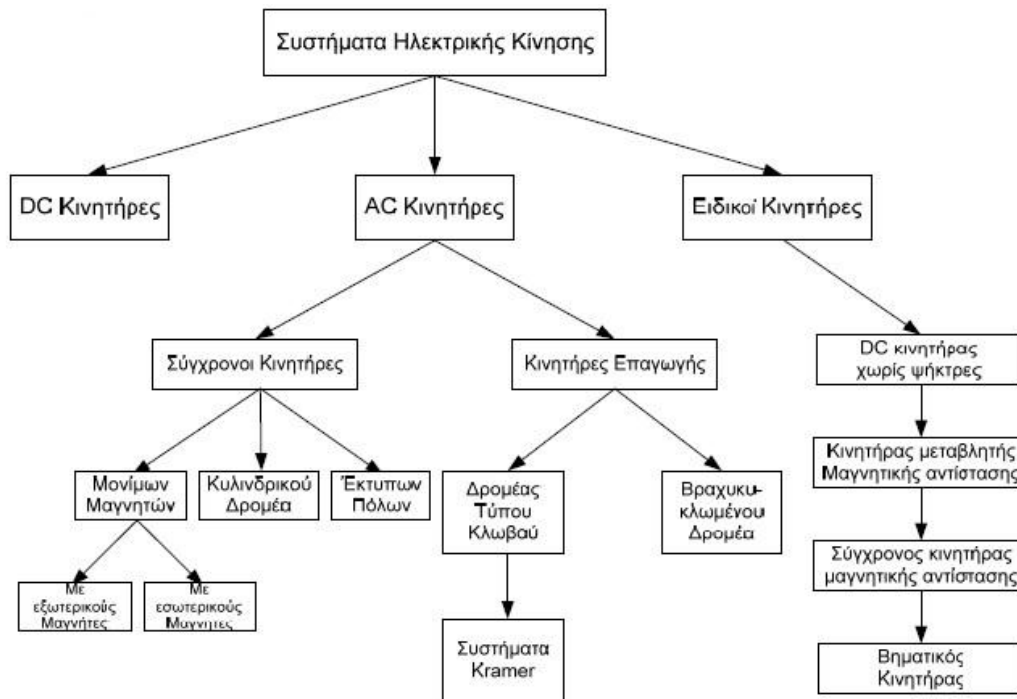


Σχήμα 2.2. Τυπική δομή συστήματος πρόωσης σε ένα ηλεκτρικό όχημα

Η πιο απλή σχηματική αναπαράσταση του συστήματος κίνησης ενός ηλεκτρικού οχήματος φαίνεται στο σχήμα 2.2 και κάθε επιμέρους σύστημα περιγράφεται λεπτομερώς παρακάτω.

2.2.1. Ηλεκτρικός κινητήρας

Η οικογένεια των ηλεκτρικών κινητήρων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα αποτελείται από πολλά διαφορετικά ήδη και γεωμετρίες, καθένα από τα οποία είναι κατάλληλο για συγκεκριμένες εφαρμογές με βάση τις προδιαγραφές που πληρεί. Για ένα ηλεκτρικό όχημα οι γενικές προδιαγραφές που πρέπει να ικανοποιούνται είναι υψηλή ροπή σε μικρές ταχύτητες, ευρεία περιοχή ταχυτήτων λειτουργίας υπό σταθερή ισχύ, υψηλή πυκνότητα ισχύος, υψηλή απόδοση, μικρό βάρος, χαμηλό κόστος, αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής με την ελάχιστη δυνατή ανάγκη για συντήρηση. Αφού πληρούνται αυτές οι προϋποθέσεις, επιλέγεται ο τύπος κινητήρα που είναι καταλληλότερος για την εκάστοτε εφαρμογή.



Σχήμα 2.3. Οικογένεια Ηλεκτρικών κινητήρων

Ένας τύπος κινητήρα που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως σε ηλεκτροκίνητα οχήματα είναι ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος. Η τεχνολογική ωριμότητα και ο απλός έλεγχός τους υπερσχύουν σε κάποιες εφαρμογές έναντι της απαίτησης για συντήρηση και αντικατάσταση των ψηκτρών. Ωστόσο η αξιοπιστία των κινητήρων στα ηλεκτρικά οχήματα καθώς και η ανάγκη για εξάλειψη της ανάγκης για συντήρηση είναι πρωτεύουσες σημασίες. Τεχνολογικές εξελίξεις έχουν θέσει τους κινητήρες χωρίς σύστημα συλλέκτη και ψήκτρες στο προσκήνιο, επειδή έχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία και χαμηλότερο λειτουργικό κόστος.

Ο κινητήρας επαγωγής είναι ένας τύπος κινητήρα με ευρεία εφαρμογή στα ηλεκτροκίνητα οχήματα, με κύριες αιτίες το μικρό κόστος, τον εύκολο έλεγχο και την υψηλή αξιοπιστία. Για την οδήγησή τους χρησιμοποιείται διάταξη αντιστροφής με δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας για έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής.

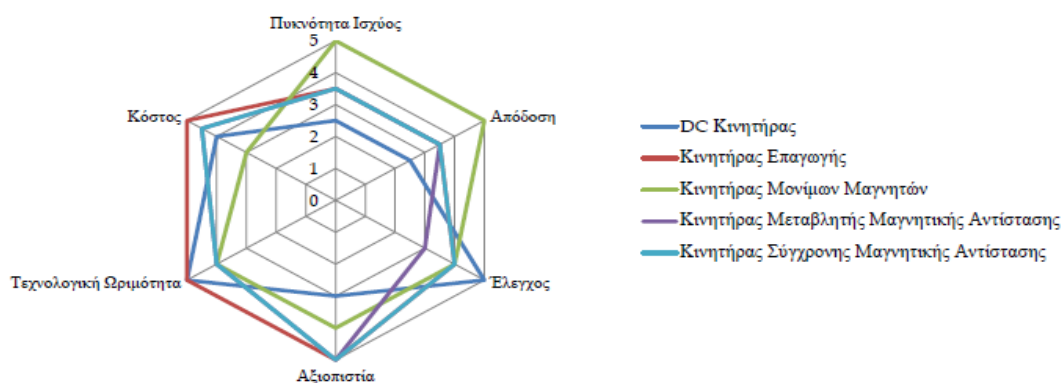
Μια ακόμα εναλλακτική λύση που αναπτύσσεται όλο και περισσότερο είναι ο σύγχρονος κινητήρας με μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα. Με την αντικατάσταση του τυλίγματος πεδίου από μόνιμους μαγνήτες επιτυγχάνεται μείωση των απωλειών χαλκού και η έλλειψη ψηκτρών αυξάνει την αξιοπιστία. Οι κινητήρες αυτοί τροφοδοτούνται από ημιτονοειδή τάση, έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής, χαρακτηρίζονται από μεγάλη πυκνότητα ισχύος και υψηλή απόδοση.

Ένας άλλος τύπος μηχανής είναι οι σύγχρονοι κινητήρες μαγνητικής αντίδρασης οι οποίοι δε διαθέτουν ούτε τυλίγμα διέγερσης ούτε μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα, αλλά εκμεταλλεύονται αποκλειστικά τη ροπή εκτυπότητας. Αυτός ο τύπος μηχανής έχει το πλεονέκτημα της απλότητας κατασκευής και του μικρού κόστους, δεν έχει όμως την ικανότητα παροχής μεγάλης ισχύος εξόδου.

Επιπρόσθετα από τα παραπάνω είδη μηχανής, υπάρχει ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς συλλέκτη και ψήκτρες (Brushless DC). Οι κινητήρες αυτοί

παρουσιάζουν επίσης υψηλό βαθμό απόδοσης και μεγάλη πυκνότητα ισχύος, ενώ δύνανται να παρέχουν υψηλές τιμές ροπής λόγω της ορθογώνιας μορφής της μαγνητικής ροής και του ρεύματος. Ένα μειονέκτημά τους είναι ότι απαιτείται ακριβής γνώση της θέσης του δρομέα για την οδήγησή τους, η οποία επιτυγχάνεται με αισθητήρες ή με τεχνικές υπολογισμού της θέσης του δρομέα από μετρήσεις των ηλεκτρικών μεγεθών.

Για την αξιολόγηση της καταλληλότητας των βασικών κατηγοριών κινητήρων που παρουσιάστηκαν παραπάνω χρησιμοποιείται ένα σύστημα βαθμολόγησης. Αξιολογούνται έξι βασικά χαρακτηριστικά των κινητήρων και η κλίμακα εκτείνεται από το ένα ως το πέντε. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, οι κινητήρες επαγωγής προσφέρονται για χρήση σε τέτοιου είδους οχήματα. Οι κινητήρες μονίμων μαγνητών επίσης ενδείκνυνται για τέτοιες εφαρμογές, καθώς εμφανίζουν υψηλή απόδοση και αποκτούν μεγαλύτερη οικονομοτεχνική βιωσιμότητα καθώς το κόστος των μονίμων μαγνητών μειώνεται. Μια σημαντική ανακάλυψη που επέφερε τη μείωση του κόστους των μονίμων μαγνητών είναι αυτή του κράματος Νεοδυμίου – Σιδήρου - Βορίου το 1982, η οποία έδωσε στην αγορά φθηνότερους μαγνήτες ενώ παράλληλα οι μαγνήτες Νεοδυμίου είναι μέχρι σήμερα οι πιο ισχυροί που κυκλοφορούν [8].



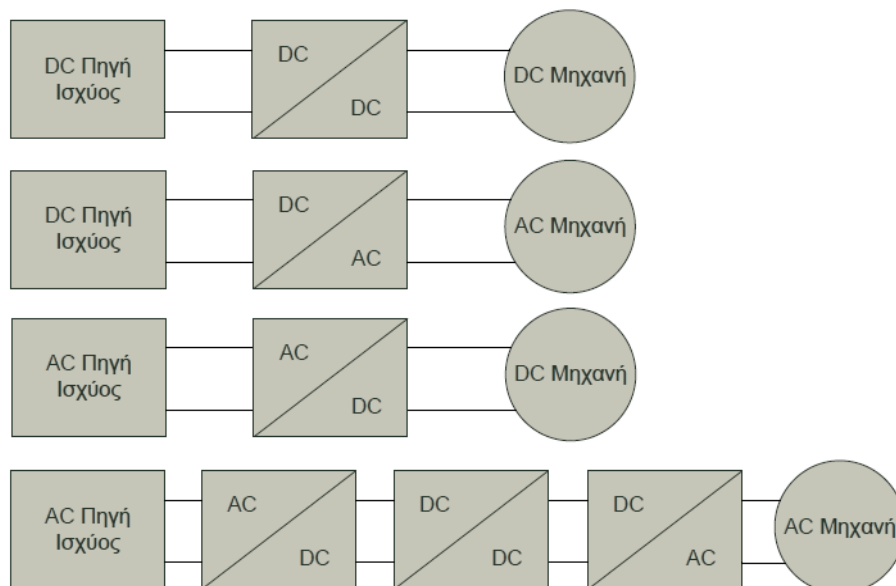
Σχήμα 2.4. Ποιοτικό διάγραμμα αξιολόγησης κινητήρων για εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων[25]

2.2.2. Ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος

Ο μετατροπέας ισχύος παρεμβάλλεται μεταξύ της πηγής ισχύος και του κινητήρα και μετασχηματίζει την ισχύ εισόδου σε τάση και ρεύμα εξόδου κατάλληλης μορφής και πλάτους. Το είδος του μετατροπέα που απαιτείται για κάθε εφαρμογή εξαρτάται από το είδος της πηγής ισχύος και το είδος της μηχανής. Οι συνηθέστεροι μετατροπείς που χρησιμοποιούνται στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης είναι οι εξής [9]:

- DC – DC μετατροπέας (chopper, DC converter)
- AC – DC μετατροπέας, ανορθωτής (AC – DC converter, rectifier)
- DC – AC μετατροπέας, αντιστροφέας (DC – AC converter, inverter)

Οι συνηθέστερες τοπολογίες και συνδυασμοί μετατροπέων με πηγές ισχύος και μηχανές φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 2.5. Τοπολογίες σύνδεσης μετατροπέων ισχύος [31]

Οι μετατροπείς ισχύος χρησιμοποιούν ημιαγωγά στοιχεία ισχύος ως διακόπτες, τα οποία με κατάλληλους παλμούς ελέγχου άγουν ή βρίσκονται σε αποκοπή. Οι διαθέσιμοι ημιαγωγοί ισχύος μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις ομάδες ανάλογα με το βαθμό ελεγχιμότητάς τους :

- Δίοδοι. Οι καταστάσεις αγωγής (ON) και αποκοπής (OFF) της διόδου εξαρτώνται αποκλειστικά από το κύκλωμα ισχύος.
- Θυρίστορ. Μεταβαίνουν στην κατάσταση αγωγής (ON) μέσω σήματος ελέγχου, αλλά η σβέση τους εξαρτάται από το κύκλωμα ισχύος.
- Ελεγχόμενοι διακόπτες. Οι καταστάσεις αγωγής (ON) και αποκοπής τους (OFF) καθορίζονται από σήματα ελέγχου. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει αρκετούς τύπους ημιαγωγών συμπεριλαμβανομένων των διπολικών τρανζίστορ ένωσης (Bipolar Junction Transistors, BJTs), των τρανζίστορ επίδρασης πεδίου μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors, MOSFETs), των διπολικών τρανζίστορ με μονωμένη πύλη (Insulated Gate Bipolar Transistors, IGBTs) και των θυρίστορ με σβέση μέσω της πύλης τους (Gate Turn Off Thyristors, GTOs).

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου ημιαγωγού ισχύος είναι καθοριστικής σημασίας για τον μετατροπέα, καθώς τα στοιχεία αυτά χαρακτηρίζονται από διακοπτικές απώλειες λόγω των υψηλών συχνοτήτων λειτουργίας τους (τάξη πολλών kHz). Επίσης, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του ημιαγωγού που τον καθιστούν κατάλληλο για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

2.2.3. Πηγή ενέργειας

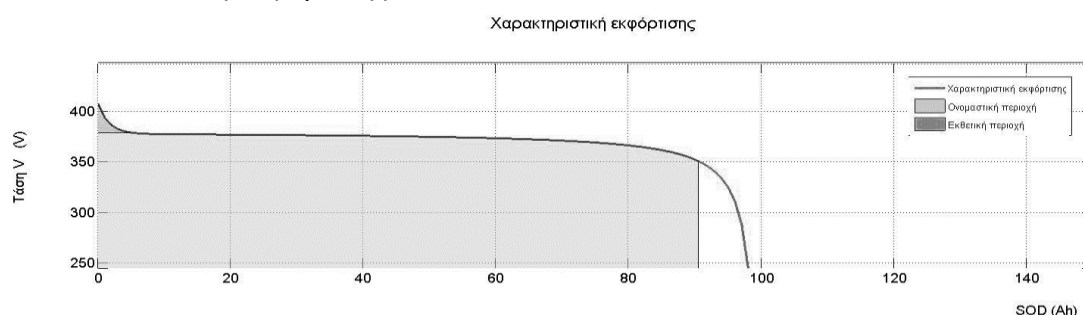
Η πηγή Ενέργειας είναι το τμήμα που τροφοδοτεί με ηλεκτρική ενέργεια το υπόλοιπο σύστημα και αποτελείται από τις μπαταρίες του ηλεκτρικού οχήματος, το εξάρτημα με το μεγαλύτερο όγκο και βάρος πάνω στο οποίο εστιάζεται σήμερα το ενδιαφέρον και η έρευνα. Κι αυτό, γιατί αποτελεί το μεγαλύτερο εμπόδιο στην εμπορικότητα των ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς είναι το εξάρτημα με το υψηλότερο κόστος και είναι υπεύθυνο για την μικρή αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων.

Οι μπαταρίες αποτελούνται από δύο ή περισσότερα κελιά που συνδέονται κατάλληλα μεταξύ τους (σε σειρά ή παράλληλα) για να επιτευχθούν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά (ονομαστική τάση και χωρητικότητα). Τα κελιά αυτά αποτελούνται από ένα θετικό και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο και ανάμεσά τους υπάρχει ο ηλεκτρολύτης. Έτσι, ανάλογα με τον τύπο της μπαταρίας πραγματοποιείται η αντίστοιχη χημική αντίδραση για την μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

2.2.3.1. Χαρακτηριστικά μπαταριών

Γενικά, υπάρχουν διάφορα χαρακτηριστικά των μπαταριών σύμφωνα με τα οποία διαμορφώνονται οι προδιαγραφές τους ώστε να γίνει εκλογή της κατάλληλης μπαταρίας σε κάθε εφαρμογή [3]. Μερικά από αυτά είναι:

- **Ονομαστική τάση** είναι η τάση του κελιού όταν αυτό παρέχει ηλεκτρική ενέργεια. Η τάση των μπαταριών που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων κυμαίνεται από 300 V έως 600 V. Η τάση αυτή εξαρτάται από το φορτίο που τροφοδοτεί και από την φόρτιση της. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η τάση των κελιών δεν είναι σταθερή αλλά εξαρτάται από την κατάσταση φόρτισης, καθώς και άλλους παράγοντες όπως είναι η θερμοκρασία και ο αριθμός των κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης. Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται η εξάρτηση της τάσης των κελιών από την κατάσταση εκφόρτισης.



Σχήμα 2.6. Τάση (V) – Κατάσταση εκφόρτισης SOD (A·h)[3]

- **Χωρητικότητα** είναι η ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που είναι αποθηκευμένο στη μπαταρία. Στη βιβλιογραφία η χωρητικότητα των μπαταριών δίνεται σε A·h (1 A·h=3600 Coulomb), ενώ υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας το ρεύμα εκφόρτισης με το συνολικό χρόνο εκφόρτισης. Η ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας δίνεται για ένα συγκεκριμένο

ρεύμα εκφόρτισης (ή ρυθμό εκφόρτισης) ενώ όσο αυξάνεται ο χρόνος εκφόρτισης της μπαταρίας (δηλαδή μειώνεται το ρεύμα εκφόρτισης), αυξάνεται η διαθέσιμη χωρητικότητα της μπαταρίας. Συνεπώς, ο υπολογισμός της χωρητικότητας της μπαταρίας σε συνάρτηση με το ρυθμό εκφόρτισης είναι ένα σύνθετο φαινόμενο, το οποίο όμως μπορεί να υπολογιστεί με διάφορες τρόπους.

- ❑ Η **αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια** εξαρτάται από την τάση και από την χωρητικότητα της μπαταρίας και μετράται συνήθως σε $W \cdot h$ ($1 W \cdot h = 3600 \text{ Joule}$). Βέβαια, όσο μεγαλύτερος είναι ρυθμός εκφόρτισης τόσο μικρότερη είναι η διαθέσιμη ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να παρέχει η μπαταρία.
- ❑ Η **ηλεκτρική ισχύς** που παρέχεται από την μπαταρία εξαρτάται από την τάση της και το ρεύμα που εκφορτίζεται και μετράται σε $Watt$. Η απόδοση των μπαταριών αξιολογείται με βάση την συνεχή ονομαστική ισχύ που δίνει ο κατασκευαστής, η οποία είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παρέχει η μπαταρία για ένα παρατεταμένο χρονικό διάστημα, χωρίς να καταστραφεί.
- ❑ Ο **ρυθμός φόρτισης/ εκφόρτισης** είναι ένα μέτρο του ρυθμού με τον οποίο η μπαταρία φορτίζεται ή εκφορτίζεται, σε σχέση με την ονομαστική της χωρητικότητα.
- ❑ Η **ειδική ενέργεια** δείχνει το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένο ανά μονάδα μάζας της μπαταρίας. Μονάδα μέτρησης της ειδικής ενέργειας στο SI είναι το J/kg , όμως στη βιβλιογραφία τις περισσότερες φορές δίνεται σε $W \cdot h/kg$ ($1 W \cdot h/kg = 3600 J/kg$). Για τους κατασκευαστές ηλεκτρικών οχημάτων, η ειδική ενέργεια είναι το κυριότερο χαρακτηριστικό της μπαταρίας, διότι προσδιορίζει το βάρος της μπαταρίας ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή χιλιομετρική αυτονομία του οχήματος. Ωστόσο, αυτός ο υπολογισμός αποτελεί μόνο μία προσέγγιση, καθώς η πραγματική αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας εξαρτάται από τον ρυθμό εκφόρτισης της.
- ❑ Η **ειδική ισχύς** είναι η μέγιστη διαθέσιμη ηλεκτρική ισχύς ανά μονάδα μάζας της μπαταρίας και προσδιορίζει το βάρος της μπαταρίας, με σκοπό την επίτευξη της επιθυμητής απόδοσης του οχήματος. Μονάδα μέτρησης της ειδικής ισχύος στο SI είναι το W/kg , ενώ αποτελεί το σημαντικότερο χαρακτηριστικό της μπαταρίας για τους κατασκευαστές υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς εκεί η επιθυμητή χιλιομετρική αυτονομία του οχήματος επιτυγχάνεται με τη χρήση της MEK.
- ❑ Η **διάρκεια ζωής** της μπαταρίας μετράται σε κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης της, χωρίς αυτή να χάσει το 20% της αρχικής της χωρητικότητας και ο αριθμός των κύκλων ζωής διαφέρει ανάλογα με τον τύπο και την τεχνολογία της

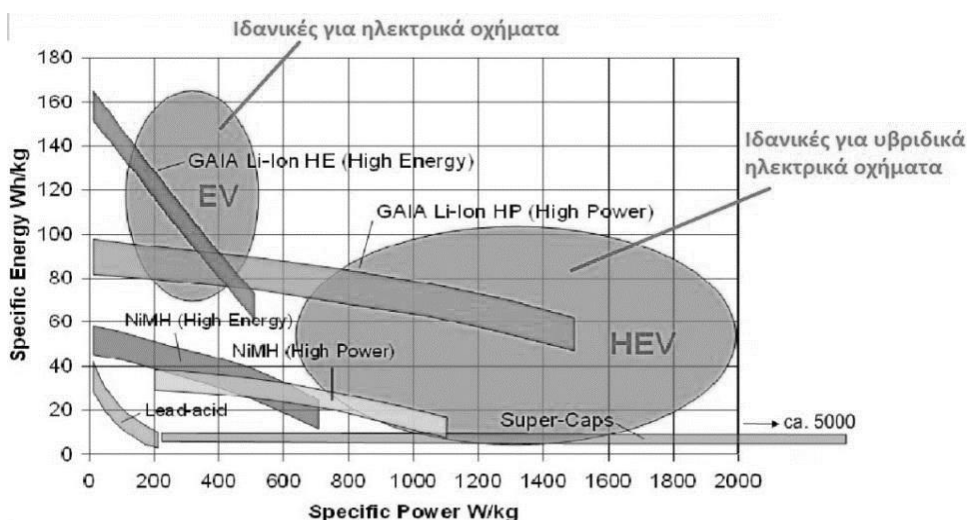
μπαταρίας. Ωστόσο, η πραγματική διάρκεια ζωής της μπαταρίας εξαρτάται από τον ρυθμό φόρτισης/εκφόρτισης της, αλλά και το βάθος εκφόρτισης της. Όσο μεγαλύτερα είναι ο ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης και το βάθος εκφόρτισης, τόσο μικρότερη θα είναι και η διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

2.2.3.2. Διάγραμμα Ragone

Για τους κατασκευαστές ηλεκτρικών οχημάτων το σημαντικότερο χαρακτηριστικό των μπαταριών είναι η ειδική ενέργεια, καθώς σύμφωνα μ' αυτό προσδιορίζεται η χιλιομετρική αυτονομία του οχήματος. Στην επιλογή που πληρεί τις προδιαγραφές μιας εφαρμογής με τον καλύτερο τρόπο βοηθάει το διάγραμμα Ragone, στο οποίο μπορεί να γίνει σύγκριση των διάφορων πηγών ενέργειας, καθώς και να παρατηρηθεί η μεταβολή της ειδικής τους ενέργειας με τη μεταβολή της ειδικής τους ισχύος ή και το αντίστροφο.

Από το διάγραμμα αυτό μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί για τις μπαταρίες, ότι όσο αυξάνεται η ειδική τους ενέργεια μειώνεται η ειδική τους ισχύ και αντίστροφα. Αυτό συμβαίνει, γιατί λαμβάνοντας γρήγορα ενέργεια από την μπαταρία (υψηλός ρυθμός εκφόρτισης) μειώνεται η διαθέσιμη ενέργειά της.

Έτσι, υπάρχουν μπαταρίες με υψηλή ειδική ενέργεια, αλλά χαμηλή ειδική ισχύ. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να αποθηκεύσουν μεγάλο ποσό ενέργειας, όμως αυτή την ενέργεια μπορούν να την αποδώσουν αργά. Αυτές είναι μπαταρίες που είναι ιδανικές για χρήση σε ηλεκτρικά οχήματα (όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα), τα οποία κατά συνέπεια έχουν υψηλή χιλιομετρική αυτονομία και χαμηλή απόδοση. Από την άλλη, υπάρχουν μπαταρίες που έχουν υψηλή ειδική ισχύ, αλλά χαμηλή ειδική ενέργεια, πράγμα που τις κάνει ιδανικές για χρήση σε υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα [3].



Σχήμα 2.7. Διάγραμμα Ragone[3]

2.2.3.3. Είδη μπαταριών

Τα πιο συνήθη είδη μπαταριών που έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ηλεκτροκίνησης είναι [4]:

- **Μόλυβδου - οξέος**

Η μπαταρία μόλυβδου-οξέος εφευρέθηκε το 1859 από τον Γάλλο φυσικό Gaston Plante και είναι η πρώτη επαναφορτιζόμενη μπαταρία που χρησιμοποιήθηκε σε εμπορική χρήση το 1881. Λόγω των υλικών κατασκευής της, έχει το χαμηλότερο κόστος όλες τις άλλες μπαταρίες (100-125 €/kWh). Οι μπαταρίες μόλυβδου-οξέος παρουσιάζουν χαμηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης (λιγότερο από 5% ανά μήνα) και έχουν χαμηλή απαίτηση συντήρησης. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά τους είναι η υψηλή ειδική ισχύς τους (έως και 285 W/kg) και η ικανότητα τους να παρέχουν υψηλούς ρυθμούς εκφόρτισης (έως και 10·Q). Παρ' όλα αυτά, οι μπαταρίες μόλυβδου-οξέος έχουν αρκετά μειονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι η χαμηλή ειδική ενέργειά τους (έως και 50 W·h/kg), η οποία οφείλεται κυρίως στο υψηλό μοριακό βάρος του μόλυβδου. Επίσης, η απόδοση τους σε χαμηλές θερμοκρασίες είναι κακή, καθώς σε θερμοκρασίες κάτω από τους 10oC τόσο η ειδική τους ενέργεια, όσο και η ειδική τους ισχύς μειώνονται σημαντικά. Το χαρακτηριστικό αυτό περιορίζει σημαντικά τη χρήση τους σε οχήματα που λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ακόμη, παρουσιάζουν μικρή διάρκεια ζωής (έως 800 κύκλους) και η φόρτιση τους διαρκεί αρκετό χρόνο. Τέλος, δεν είναι φιλικές προς το περιβάλλον, καθώς ο μόλυβδος είναι τοξικός.

- **Νικελίου-καδμίου (NiCd)**

Γενικά, το νικέλιο είναι ένα πιο ελαφρύ μέταλλο από τον μόλυβδο, το οποίο έχει πολύ καλές ηλεκτροχημικές ιδιότητες. Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου βρίσκονται στο εμπόριο από το 1956 και έχουν σχετικά υψηλή ειδική ισχύ (έως 250 W/kg). Σε αντίθεση με τις μπαταρίες μόλυβδου-οξέος έχουν καλή απόδοση και σε χαμηλές θερμοκρασίες και γενικά παρουσιάζουν μεγάλο εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας (από -40oC έως 80oC). Επίσης, έχουν την δυνατότητα να παρέχουν υψηλούς ρυθμούς εκφόρτισης (έως 20·Q). Ακόμη, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής (έως 2000 κύκλους) και σχετικά χαμηλό κόστος (200-300 €/kWh). Τα μειονεκτήματα των μπαταριών νικελίου-καδμίου είναι η σχετικά χαμηλή ειδική ενέργεια (έως 80 W·h/kg), ο σχετικά υψηλός ρυθμός αυτοεκφόρτισης (περίπου 20% ανά μήνα) και το φαινόμενο μνήμης το οποίο παρουσιάζουν. Πρόσθετα, οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου δεν είναι φιλικές προς το περιβάλλον, καθώς το κάδμιο είναι τοξικό και καρκινογόνο.

- **Νικελίου-μετάλλων υβριδίου (NiMH)**

Οι μπαταρίες νικελίου-μετάλλων υβριδίου είναι στην αγορά από το 1990 και ήρθαν για να αντικαταστήσουν τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου, καθώς είναι απαλλαγμένες από το επιβλαβές κάδμιο. Βρίσκονται υπό συνεχή ανάπτυξη και είναι από τις μπαταρίες που χρησιμοποιούνται περισσότερο σε εφαρμογές ηλεκτρικών και υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων. Χαρακτηριστικό

παράδειγμα αποτελούν το Toyota Prius και το Honda Insight. Παρουσιάζουν έως και 40% υψηλότερη ειδική ενέργεια από τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου και μικρότερη επίδραση του φαινομένου μνήμης. Το κυριότερο πλεονέκτημα αυτών των μπαταριών είναι η υψηλή ειδική ισχύς, καθώς η τιμή της μπορεί να φτάσει τα 1800 W/kg. Ωστόσο, είναι λιγότερο ανθεκτικές από τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου, καθώς οι υψηλοί ρυθμοί εκφόρτισης μειώνουν την διάρκεια ζωής τους. Γι' αυτό το λόγο, προτιμώνται χαμηλοί ρυθμοί εκφόρτισης. Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με ρυθμό εκφόρτισης από 0,2-Q έως 0,5-Q. Επίσης, έχουν υψηλότερο ρυθμό αυτοεκφόρτισης (περίπου 30% ανά μήνα) από τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου και παράγουν θερμότητα κατά την φόρτιση τους. Ακόμη, η αποθήκευσή τους πρέπει να γίνεται σε δροσερό μέρος, γιατί διαφορετικά μειώνεται η απόδοσή τους. Εντέλει, έχουν αρκετά υψηλό κόστος (150-300 €/kWh)

- **Ιόντων λιθίου (Li-ion)**

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου εισήχθησαν στο εμπόριο στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Σήμερα, αποτελούν την ταχύτερα αναπτυσσόμενη και την πιο πολλά υποσχόμενη τεχνολογία μπαταριών. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα βάρους σε σύγκριση με τις άλλες μπαταρίες, καθώς το λίθιο είναι το ελαφρύτερο μέταλλο. Το χαρακτηριστικό αυτό σε συνδυασμό με την υψηλή ειδική ενέργεια (έως και 200 W·h/kg) και την υψηλή ειδική ισχύ (έως 3500 W/kg) που προσφέρουν, τις καθιστούν ιδανική επιλογή για εφαρμογές ηλεκτρικών και υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων. Αξιοσημείωτο παράδειγμα, αποτελεί το Tesla Roadster το οποίο χρησιμοποιώντας μπαταρία ιόντων λιθίου έχει χιλιομετρική αυτονομία 352 km (υπό ορισμένες συνθήκες λειτουργίας) σύμφωνα με τον κατασκευαστή του. Ακόμη, δεν παρουσιάζουν καθόλου το φαινόμενο μνήμης, έχουν χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης, χαμηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης (περίπου 5-10% ανά μήνα) και υψηλή διάρκεια ζωής (έως 3000 κύκλους). Ωστόσο, για την ασφαλή λειτουργία τους πρέπει να συνοδεύονται από ένα κύκλωμα προστασίας για ακριβή έλεγχο της τάσης κατά την φόρτισή τους, ενώ το κόστος τους παραμένει ακόμα αρκετά υψηλό (250-500 €/kWh).

- **Λιθίου πολυμερών (LiPo)**

Οι μπαταρίες λιθίου πολυμερών θεωρούνται μπαταρίες στερεάς κατάστασης, γιατί ο ηλεκτρολύτης τους είναι στερεός. Τα χαρακτηριστικά τους είναι παρόμοια με αυτά των μπαταριών ιόντων λιθίου. Ωστόσο, η χρήση στερεών πολυμερών για ηλεκτρολύτη – σ' αντίθεση με τους εύφλεκτους υγρούς ηλεκτρολύτες των μπαταριών ιόντων λιθίου – έχει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη ασφάλεια και ειδικότερα στην περίπτωση του τροχαίου ατυχήματος. Ακόμη, επειδή τα κελιά των μπαταριών λιθίου πολυμερών είναι πιο λεπτά, οι μπαταρίες λιθίου πολυμερών προσαρμόζονται πιο εύκολα στον διαθέσιμο χώρο του πλαισίου του οχήματος. Το μειονέκτημα αυτών των μπαταριών, είναι ότι πρέπει να λειτουργούν σε θερμοκρασίες από 80°C έως 120°C, καθώς η αγωγιμότητα του πολυμερούς ηλεκτρολύτη είναι πολύ χαμηλή σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Γι' αυτό το λόγο, μεταξύ των κελιών

τοποθετούνται επίπεδες συσκευές θέρμανσης για την επίτευξη της κατάλληλης θερμοκρασίας λειτουργίας.

2.2.3.4. Η έρευνα στον τομέα των συσσωρευτών σήμερα-προκλήσεις

Σε αγώνα δρόμου έχει εξελιχθεί τα τελευταία χρόνια η έρευνα γύρω από την βελτίωση της τεχνολογίας των μπαταριών με συμμετέχοντες ερευνητικά κέντρα, σημαντικό μέρος της ακαδημαϊκής κοινότητας, εταιρίες startups και σαφώς την αυτοκινητοβιομηχανία. Οι περιορισμοί στην αυτονομία και το κατασκευαστικό κόστος είναι τα εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστούν ώστε τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα να μη διαφέρουν σε ευελιξία από τα συμβατικά. Αυτό είναι και το όραμα της επόμενης δεκαετίας. Το ερώτημα είναι σε ποιο στάδιο βρίσκεται σήμερα η έρευνα και πόσο μακριά μπορεί να φτάσει.

Στο σήμερα η ενασχόληση των ερευνητών προσανατολίζεται σε τρία κυρίως πεδία:

- την βελτιστοποίηση της υπάρχουσας τεχνολογίας ιόντων-λιθίου ως προς την πυκνότητα ισχύος, την απόδοση, τον χρόνο ζωής και την ασφάλεια
- την ανεύρεση νέων και υποσχόμενων υλικών και διατάξεων
- το κατασκευαστικό μέρος από τα κελιά μέχρι την συνένωση τους σε συστοιχία με μειωμένο κόστος και αυξημένη απόδοση

Στο πρώτο κομμάτι στρέφεται το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας καθώς είναι μία τεχνολογία που χρησιμοποιείται κατά πλειοψηφία. Από την άλλη πλευρά, οι πιο τολμηροί δοκιμάζουν νέα υλικά για ηλεκτρολύτες και ηλεκτρόδια, όπως το γραφένιο. Νέες διατάξεις όπως μέταλλο-αέρα εμφανίζονται, ενώ πολλά υποσχόμενη είναι χρήση του νατρίου και του αλουμινίου στα ηλεκτρόδια, κάτι που θα μειώσει σημαντικά το κόστος αν βρεθεί μια ολοκληρωμένη λύση, καθώς είναι μέταλλα που βρίσκονται σε αφθονία στη φύση. Αξιοσημείωτα είναι επίσης τα αποτελέσματα στο πανεπιστήμιο του Waterloo όπου σε μπαταρίες λιθίου-θείου έχει χρησιμοποιηθεί ένα νάνο-υλικό για την κατασκευή των ηλεκτροδίων με ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα, ενώ πολλοί εικάζουν ότι τη λύση θα δώσει η νανοτεχνολογία, υποστηρίζοντας την φράση “ the way to get high power is to nanosize it”.

2.2.3.5. Αναγκαιότητα υποδομών και σύγχρονη προσέγγιση από την πλευρά του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας

Για την διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην αγορά και την ένταξή τους στην καθημερινότητα των σύγχρονων πόλεων απαιτείται η κατασκευή των κατάλληλων υποδομών που απαιτεί η τεχνολογία των ηλεκτρικών οχημάτων.

Πράγματι, η μαζική κυκλοφορία των ηλεκτρικών οχημάτων θα φέρει στο προσκήνιο νέες προκλήσεις οι οποίες θα πρέπει να αντιμετωπισθούν. Μία από αυτές είναι ο χώρος φόρτισης των νέων ηλεκτρικών οχημάτων. Ανάλογα με τον τρόπο χρήσης (χρόνος λειτουργίας, διαθέσιμη αυτονομία κλπ.), την τεχνολογία των μπαταριών τους

και τον διαθέσιμο χρόνο για τη φόρτιση των μπαταριών θα πρέπει να δημιουργηθούν σταθμοί φόρτισης, οι οποίοι θα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Ιδιωτικοί με ιδιωτική πρόσβαση(π.χ. προσωπικά γκαράζ)
- Ιδιωτικοί με δημόσια πρόσβαση(π.χ. μεγάλα παρκινγκ εμπορικών καταστημάτων, εργασιακός χώρος)
- Δημόσιοι με δημόσια πρόσβαση(π.χ. δημόσιοι δρόμοι)

Παρόλα αυτά, τα ηλεκτρικά οχήματα δεν αποτελούν απλά μια τεχνολογική εξέλιξη στο τομέα των μεταφορών και της αυτοκινητοβιομηχανίας αλλά και μια πρόκληση για τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ηλεκτρικά οχήματα συμπεριφέρονται σαν μπαταρίες που εκφορτίζονται κατά τη διάρκεια των μετακινήσεων, ανάλογα με ανάγκες και την οδηγική συμπεριφορά του χρήστη, και φορτίζονται από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της στάθμευσης τους, ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη και την τιμολογιακή πολιτική που επιθυμεί να ακολουθήσει. Τα ηλεκτρικά οχήματα ως παθητικά στοιχεία αποτελούν ένα νέο είδος φορτίου για τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και πιθανή μεγάλη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να επιβαρύνει αισθητά το ηλεκτρικό δίκτυο και να επηρεάσει αρνητικά τον ενεργειακό και αναπτυξιακό προγραμματισμό τους.

Αναλογιζόμενοι τη λειτουργία των μπαταριών σε ένα μικροδίκτυο με την αμφίδρομη ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ μπαταρίας-δικτύου, η στατική θεώρηση των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να επεκταθεί σε μια πιο δυναμική συμπεριφορά σύμφωνα με την οποία τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να παρέχουν ενέργεια στο δίκτυο όταν αυτό είναι επιβαρυνμένο, π.χ. απογευματινές ώρες για τα νοικοκυριά ή μεσημεριανές ώρες στο ωράριο εργασίας, και να φορτίζονται σε ώρες μη αιχμής. Έτσι, με τον όρο V2G (vehicle to grid) αναφερόμαστε στη διαδικασία μεταφοράς ενέργειας από την πλευρά των οχημάτων προς την αντίστοιχη των συστημάτων ενέργειας, όταν τα ηλεκτρικά οχήματα είναι σταθμευμένα. Τα ηλεκτρικά οχήματα που θεωρούμε εδώ μπορεί να είναι μπαταρίας, κυψελών καυσίμου ή υβριδικά οχήματα με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο (plug-in hybrid). Επίσης διαθέτουν ηλεκτρονικά ισχύος που μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου σε συνεχή για τη φόρτιση της μπαταρίας του οχήματος ή μπορούν να λειτουργήσουν κι αντίστροφα, μετατρέποντας τη συνεχή τάση από το όχημα στην εναλλασσόμενη τάση του δικτύου και στη συχνότητα του δικτύου.

Σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω, τα ηλεκτρικά οχήματα θα μπορούν να φορτίζουν κατά τη διάρκεια χαμηλής ζήτησης της ισχύος και να εκφορτίζουν όταν η ζήτηση είναι υψηλή. Παράλληλα η δομή των ενεργειακών συστημάτων είναι τέτοια, που θα πρέπει ανά πάσα στιγμή να ισχύει το ισοζύγιο ανάμεσα στην παραγωγή και το φορτίο. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η σταθερότητα των τιμών τάσης και συχνότητας που με τη σειρά τους καθορίζουν την ποιότητα της προσφερόμενης ισχύος. Έτσι δημιουργώντας κανείς ένα στόλο οχημάτων και εκμεταλλεύοντας τόσο τη χωρητικότητα όσο και την ταχεία απόκριση των μπαταριών, θα μπορούσε να συγκεντρώσει ένα σημαντικό ποσό ισχύος προς εφεδρεία για τις αιχμές που θα παρουσιάζονται στη ζήτηση ισχύος. Επίσης ο στόλος των οχημάτων μπορεί να συμμετέχει στη ρύθμιση συχνότητας, ενώ μελλοντικές σκέψεις κάνουν λόγο και για χρησιμοποίηση των οχημάτων προς αποθήκευση

ενέργειας η οποία θα προέρχεται από τα εγκατεστημένα συστήματα ανανεώσιμων πηγών.

Έτσι, το ενδιαφέρον της εποχής στρέφεται στην έρευνα και πραγματοποίηση ενός ενοποιημένου ευφυούς δικτύου που θα εκμεταλλεύεται τις δυνατότητες της V2G τεχνολογίας τόσο σε αστικό περιβάλλον όσο και σε απομονωμένα δίκτυα για την βέλτιστη εκμετάλλευση ΑΠΕ και συμβατικών πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με πραγματική πρόκληση την αποτελεσματική επικοινωνία και ανταλλαγή ενέργειας για την εύρυθμη λειτουργία του [6].

3. Τεχνική μοντελοποίησης της σχέσης ροπής - ταχύτητας σε κινούμενο όχημα

3.1. Εισαγωγή

Ο προσδιορισμός των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα όχημα κατά την κίνησή του είναι αντικείμενο μελέτης από ερευνητές και κατασκευαστές της αυτοκινητοβιομηχανίας και αυτό γιατί βοηθάει στον προσδιορισμό της επίδοσης ενός οχήματος αλλά και στο εύρος λειτουργίας του. Η δυναμική του οχήματος ως επιστήμη, μελετάει την αλληλεπίδραση μεταξύ του οχήματος, του οδηγού και του περιβάλλοντος και χωρίζεται σε τρία είδη δυνάμεων : διαμήκεις, εγκάρσιες και κατακόρυφες.

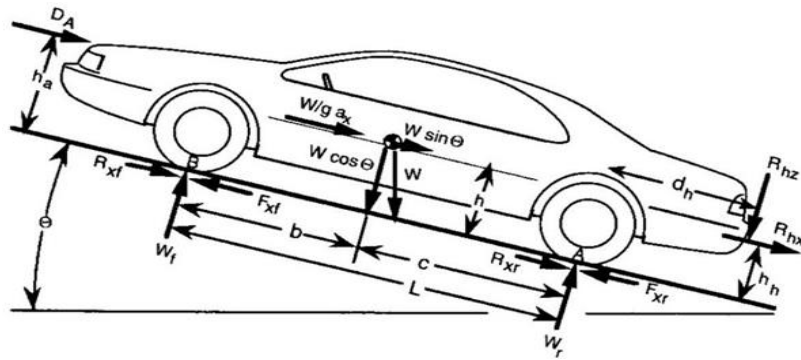
Οι διαμήκεις δυνάμεις που ασκούνται σε ένα όχημα έχουν επίδραση στην ισχύ που απαιτείται να δοθεί στο όχημα για να αποκτήσει και να διατηρήσει την επιθυμητή ταχύτητα και μπορεί να περιγραφεί με μαθηματικές εξισώσεις των δυνάμεων που ασκούνται στο σύστημα. Η συνολική δύναμη που απαιτείται είναι συνάρτηση της αεροδυναμικής αντίστασης, της επιτάχυνσης, της αντίστασης κατά την ολίσθηση και της επίδρασης του βάρους λόγω κεκλιμένου επιπέδου. Η πηγή της δύναμης είναι ο κινητήρας όμως για την κίνηση χρειάζεται ένα σωστό σύστημα μετάδοσης, το οποίο συνήθως αποτελείται από τον συμπλέκτη, το κιβώτιο ταχυτήτων, τα ημιαξόνια και το διαφορικό. Οι διαφορετικές σχέσεις μετάδοσης επιτρέπουν την κίνηση του οχήματος σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων διατηρώντας όμως την ταχύτητα του κινητήρα κοντά στην ονομαστική. Έτσι η οδηγική συμπεριφορά επιδρά σημαντικά στην επίδοση του οχήματος και συνεπώς στην εξοικονόμηση καυσίμου.

Η διαφορά των ηλεκτρικών οχημάτων από τα συμβατικά είναι ότι έχουν σταθερή σχέση μετάδοσης, κάτι που απλοποιεί αρκετά την ανάλυση αλλά και επιτρέπει στον κινητήρα να λειτουργεί σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων πέρα από την ονομαστική.

3.2. Διαμήκεις Δυνάμεις

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι διαμήκεις και κάθετες δυνάμεις που ασκούνται σε ένα κινούμενο όχημα όταν αυτό βρίσκεται σε κεκλιμένο επίπεδο με φορά προς τα πάνω.

Η ανάλυση τους δίνει μια εικόνα για το πόσο σχεδιαστικά μεγέθη (όπως βάρος, μέγεθος, κλπ.) αλλά και διαφορετικές επιλογές στον εξοπλισμό (π.χ. κιβώτιο ταχυτήτων με διαφορετική σχέση μετάδοσης) επηρεάζουν τις επιδόσεις και τα όρια ενός οχήματος ώστε να βελτιστοποιηθεί ένα μοντέλο με βάση συγκεκριμένες ανάγκες χρήσης [3].



Σχήμα 3.1. Δυνάμεις που ασκούνται σε κινούμενο όχημα όταν αυτό βρίσκεται σε κεκλιμένο επίπεδο[4]

3.2.1. Αεροδυναμική Αντίσταση

Το αεροδυναμικό φορτίο είναι η αντίσταση του αέρα κατά την κίνηση του οχήματος και είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας. Είναι μία δύναμη δημιουργούμενη από την ίδια την κίνηση και αποτελείται από την αντίσταση λόγω σχήματος αλλά και την τριβή με την επιφάνεια του οχήματος. Η ανάλυση του φαινομένου για τη ροή του αέρα γύρω από το όχημα είναι εξαιρετικά πολύπλοκη για αυτό και η διαστασιολόγηση αυτής της δύναμης βασίζεται σε μια εμπειρική σταθερά, γνωστή ως συντελεστής οπισθέλκουσας (C_d). Κατά τη μελέτη και το σχεδιασμό ενός οχήματος, υπολογίζεται από προσομοιώσεις και είναι γνωστή για κάθε μοντέλο οχήματος. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται σημαντικά από τον τύπο του οχήματος, και οι τυπικές τιμές για ένα συνηθισμένο αυτοκίνητο είναι από 0.3 έως 0.19. Οι χαμηλότερες τιμές επιτυγχάνονται για ηλεκτρικά οχήματα, καθώς αυτά προσφέρουν μεγαλύτερες ελευθερίες στην χωροθέτηση των επιμέρους συστημάτων κατά το σχεδιασμό, ενώ συνήθως δεν υπάρχει και ανάγκη για αεραγωγούς. Ο συντελεστής λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές σε οχήματα όπως λεωφορεία και μοτοσυκλέτες (κοντά στο 0.7).

Η αεροδυναμική αντίσταση μαθηματικά περιγράφεται από τον τύπο:

$$D_a = \frac{1}{2} * \rho * v^2 * C_d * A \quad (3.1)$$

Όπου:

- ρ : η πυκνότητα του αέρα
- v : η ταχύτητα του οχήματος
- C_d : ο αεροδυναμικός συντελεστής
- A : το εμβαδό της μετωπικής επιφάνειας

3.2.2. Αντίσταση Κύλισης

Η αντίσταση κύλισης είναι αποτέλεσμα της απώλειας ενέργειας στο εσωτερικό του ελαστικού, η οποία μπορεί να αναχθεί στην παραμόρφωση της επιφάνειας επαφής του ελαστικού και τις ιδιότητες απόσβεσης του ελαστικού. Αυτά οδηγούν στην

μετατροπή της μηχανικής σε θερμική ενέργεια, που συμβάλλουν στην αύξηση της θερμοκρασίας του ελαστικού (Reimpell και Stoll, 1996). Εκτός από την τριβή του ελαστικού του οχήματος στο δρόμο, η τριβή στα έδρανα και το κιβώτιο ταχυτήτων παίζουν επίσης το ρόλο τους. Η αντίσταση κύλισης είναι περίπου σταθερή, επηρεάζεται ελάχιστα από την ταχύτητα του οχήματος ενώ είναι ανάλογη με το βάρος του οχήματος.

Ο τύπος υπολογισμού είναι:

$$F_{rr} = \mu_{rr} * m * g \quad (3.2)$$

όπου:

- m: η μάζα του οχήματος
- g: η επιτάχυνση της βαρύτητας
- μ_{rr} : ο συντελεστής αντίστασης κύλισης

Η επίδραση της ταχύτητας του οχήματος στην τριβή ολίσθησης μπορεί να περιγραφεί μέσα από τον τύπο του συντελεστή αντίστασης κύλισης, ο οποίος φυσικά εξαρτάται και από τις διαστάσεις και την κατάσταση των ελαστικών. Για συμβατικά οχήματα ο συντελεστής περιγράφεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\mu_{rr} = 0.01 * \left(1 + \frac{0.62 * v}{100}\right) \quad (3.3)$$

3.2.3. Δύναμη Επιτάχυνσης

Εάν η ταχύτητα του οχήματος αλλάζει, τότε σαφώς δύναμη θα πρέπει να εφαρμόζεται, η οποία θα παρέχει την γραμμική επιτάχυνση του οχήματος, και δίνεται από τη γνωστή εξίσωση που προέρχεται από το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα:

$$F_a = m * a \quad (3.4)$$

όπου a η γραμμική επιτάχυνση του οχήματος

3.2.4. Επίδραση ανηφορικής κλίσης

Η δύναμη που απαιτείται για την οδήγηση του οχήματος σε κεκλιμένο επίπεδο είναι ουσιαστικά η συνιστώσα του βάρους του οχήματος που δρα κατά μήκος του κεκλιμένου επιπέδου με γωνία κλίσης ψ . Στην ανηφόρα, η συνιστώσα δύναμη του βάρους δρα επιβραδύνοντας την κίνηση του οχήματος, ενώ στην κατηφόρα βοηθάει

την κίνηση. Με απλή ανάλυση των δυνάμεων, η δύναμη αυτή μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

$$F_{hc} = m * g * \sin \psi \quad (3.5)$$

3.3. Σύστημα μετάδοσης και απαίτηση ροπής κατά την κίνηση

Η επιτάχυνση του οχήματος παράγει δυνάμεις αντίστασης, όπως η αεροδυναμική τριβή και η αντίσταση κύλισης, όμως και το σύστημα μετάδοσης της κίνησης αυξάνει την απαίτηση ροπής λόγω της αδράνειας των στρεφόμενων μερών του οχήματος. Η απαιτούμενη δύναμη προώθησης $[F_x]$ σε συνάρτηση με την απαιτούμενη ροπή του κινητήρα και τον λόγο μετάδοσης μπορεί να περιγραφεί ως εξής [4]:

$$F_x = \frac{T_e * N_{tf} * \eta_{tf}}{r} - [(I_e + I_d + I_t) * N_{tf}^2 + I_w] * \frac{a_x}{r^2} \quad (3.6)$$

όπου:

- T_e : η απαιτούμενη ροπή στον κινητήρα
- N_{tf} : ο λόγος μετάδοσης κιβωτίου ταχυτήτων
- η_{tf} : η απόδοση συστήματος μετάδοσης
- r : η εξωτερική διάμετρος ελαστικών
- I_e : η ροπή αδράνειας κινητήρα
- I_t : η ροπή αδράνειας κιβωτίου ταχυτήτων
- I_d : η ροπή αδράνειας διαφορικού
- I_w : η ροπή αδράνειας τροχών και ελαστικών
- a_x : η γραμμική επιτάχυνση οχήματος

Συνεπώς, η περιγραφή συνολικά της επίδοσης ενός οχήματος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

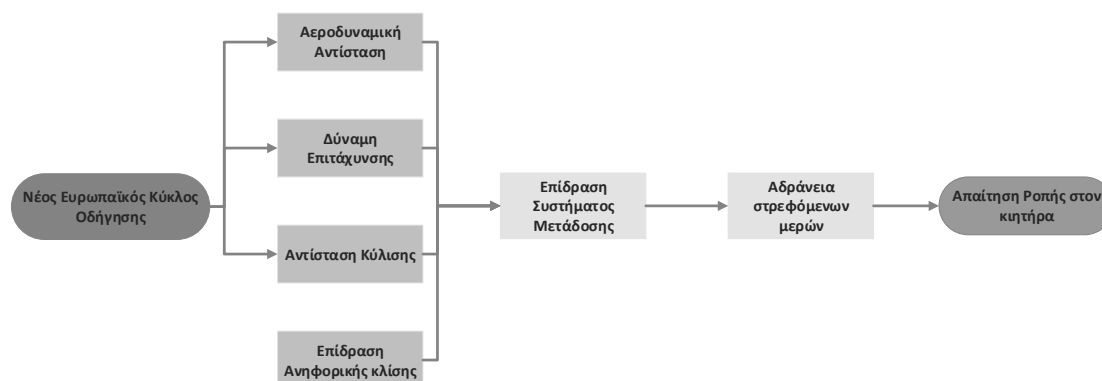
$$F_x = D_a + F_a + F_{rr} + F_{hc} \quad (3.7)$$

Από όπου και προκύπτει ότι ο τελικός τύπος της απαιτούμενης ροπής που πρέπει να δοθεί από τον κινητήρα κατά την κίνηση και την μεταβολή ταχύτητας [4].

$$T_e = \frac{r}{N_{tf} * \eta_{tf}} * [(I_e + I_d + I_t) * N_{tf}^2 + I_w] * \frac{a_x}{r^2} + D_a + F_a + F_{rr} + F_{hc} \quad (3.8)$$

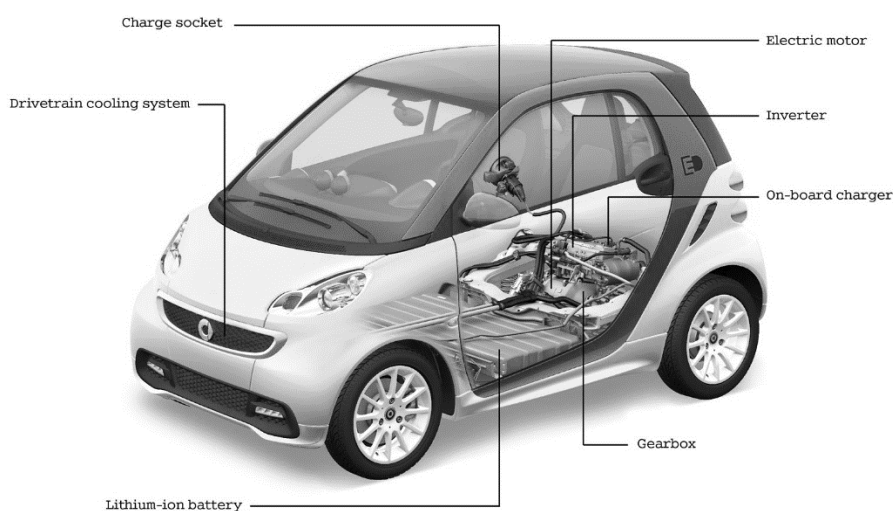
3.4. Παραμετροποιημένο μοντέλο Απαιτήσης Ροπής

Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να εκφραστούν σε ένα συνολικό μοντέλο με το λογισμικό Matlab/Simulink με είσοδο την ταχύτητα και έξοδο την απαιτούμενη ροπή στον κινητήρα. Το μοντέλο αυτό εμπεριέχει σχεδιαστικές παραμέτρους, όπου με ένα κατάλληλο συνδυασμό αυτών μπορεί να περιγραφεί οποιοδήποτε όχημα, όπως η συνολική μάζα, η σχέση μετάδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων, η εξωτερική ακτίνα των ελαστικών, η ροπή αδράνειας του δρομέα του κινητήρα, ο συντελεστής οπισθέλκουσας, η μετωπική επιφάνεια του οχήματος καθώς επίσης και οι συνθήκες κατά την οδήγηση, όπως η γωνία κλίσης του οδοστρώματος. Το μοντέλο σε περιβάλλον Matlab/Simulink μπορεί να βρεθεί στο παράρτημα Α.



Σχήμα 3.2. Σχηματικό διάγραμμα μοντέλου Ροπής-Ταχύτητας

Στην παρούσα εργασία, η διερεύνηση γίνεται πάνω στο ηλεκτρικό μοντέλο **Smart Fortwo Electric Drive** του οποίου οι προδιαγραφές φαίνονται στον πίνακα του σχήματος 3.4.



Σχήμα 3.3. Ηλεκτρικό μοντέλο Smart Fortwo Electric Drive[23]

Κινητήρας (τύπος κατασκευής)	Ηλεκτροκινητήρας (κινητήρας μόνιμου μαγνήτη)
Μεγ. ροπή σε Nm ⁽²⁾	130
Μεγιστή ταχύτητα σε km/h	125
Επιτάχυνση 0-60 km/h σε δευτ.	4,8
Επιτάχυνση 0-100 km/h σε δευτ.	11,5
Μεταδότης κίνησης	Πίσω άξονας
Αυτονομία σε km ⁽²⁾	145
Χωρητικότητα μπαταρίας σε kWh	17,6
Τύπος μπαταρίας	Ιόντων Λιθίου
Αρ. κυψελών μπαταρίας	93
Φορτιστής αυτοκινήτου σε kWh	3,3 (230 V)
Χρόνος φόρτισης (230 V) χωρίς Vwallbox σε h	περ. 7
Χρόνος φόρτισης (230 V) με Vwallbox σε h	περ. 6
Χρόνος ταχείας φόρτισης (400 V/22 kWh) με Vwallbox σε h	περ. 1
Κατανάλωση ρεύματος (σε μικτό κύκλο) σε kWh/100 km ⁽²⁾ , ⁽²⁾ ⁽²⁾ [με φόρτιση σε πρίζα (230 V/8 A), χωρίς Vwallbox]	15,1
Εκπομπές CO2 (σε μικτό κύκλο) σε g/km ⁽²⁾ , ⁽²⁾	0
Κατηγορία ενεργειακής αποδοτικότητας (ισχύει για D) ⁽²⁾ , ⁽²⁾	A
Σύστημα πέδησης/ελεγχος δυναμικής οδήγησης	esp®, με σύστημα υποβοήθησης εκκίνησης, abs με ηλεκτρονική κατανομή ισχύος πέδησης, σύστημα ελεγχου αντιστάθμισης, ηλεκτρονική υποβοήθηση πέδησης, διασκόφραμα εμπρός, ταμπούρα πίσω
Τροχή/ελαστικά (μπροστά, πίσω)	4,5 J x 15//155/60 R 15, 5,5 J x 15//175/55 R 15
Συνολικό μήκος/πλάτος/ύψος (mm)	2.695/1.559/1.565
Μετατρόχιο εμπρός/πίσω σε mm ⁽²⁾	1.283/1.385
Μεταξόνιο σε mm	1.967
Κύκλος στροφής σε m	8,75
Κενό βάρος (χωρίς οδηγό)/ωφέλιμο φορτίο σε kg ⁽²⁾	975/175
Επιτρεπόμενο μικτό βάρος σε kg	1.150

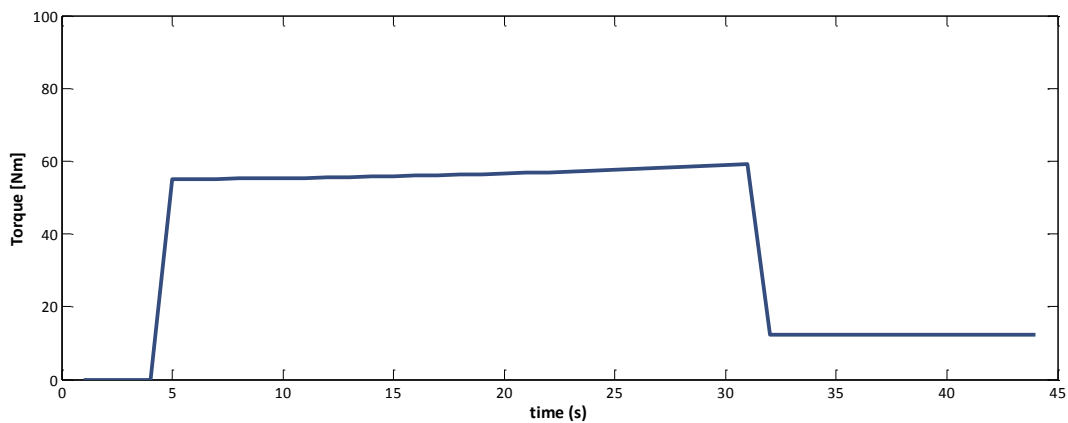
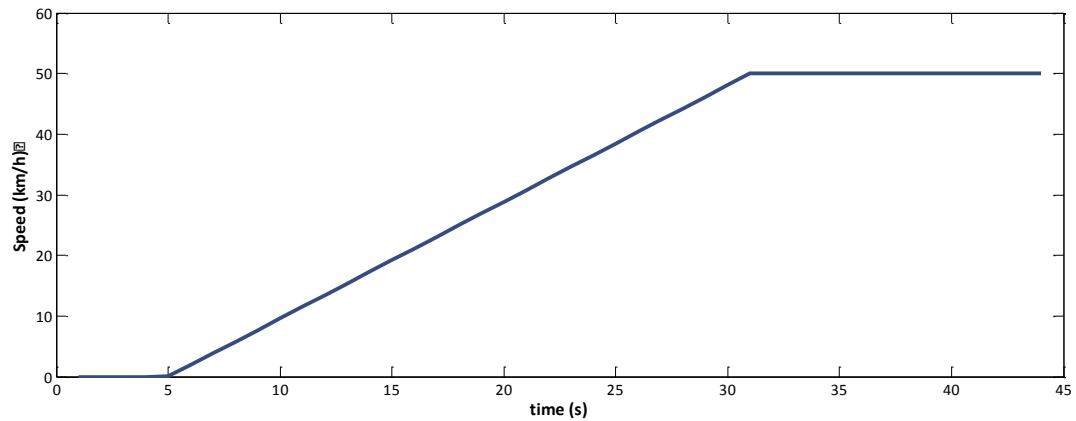
Σχήμα 3.4. Προδιαγραφές οχήματος Smart Fortwo Electric Drive[23]

Εισάγοντας τις παραμέτρους στο μοντέλο για το συγκεκριμένο όχημα και χρησιμοποιώντας σαν είσοδο την μεταβολή της ταχύτητας από 0 σε 50 km/h σε περίπου 25 δευτερόλεπτα μελετάται η απόκριση του μοντέλου για να φθάσει την ταχύτητα αυτή στον απαιτούμενο χρόνο.

Αρχικά παρατηρείται ότι η ροπή αυξάνεται απότομα με την εντολή ταχύτητας ενώ για όσο διάστημα διαρκεί η επιτάχυνση είναι σχεδόν σταθερή, κυρίως για να ικανοποιήσει την ροπή επιτάχυνσης.

Όταν η ταχύτητα δεν μεταβάλλεται ουσιαστικά η επιτάχυνση είναι 0 και συνεπώς ο κινητήρας τροφοδοτεί το όχημα με ροπή αποκλειστικά και μόνο για να καλύψει τις δυνάμεις που αντιτίθενται στην κίνηση, δηλαδή την αεροδυναμική αντίσταση, την τριβή ολίσθησης και αν υπάρχει κλίση στο οδόστρωμα, την δύναμη ανηφορικής κλίσης.

Έτσι, για σταθερή ταχύτητα, η ροπή που απαιτείται από τον κινητήρα είναι σταθερή μιας και εξαρτάται γραμμικά από την ταχύτητα. Παραδείγματος χάρη, για διατήρηση ταχύτητας 50 km/h η ροπή είναι σταθερή και ίση με περίπου 12.5 Nm.



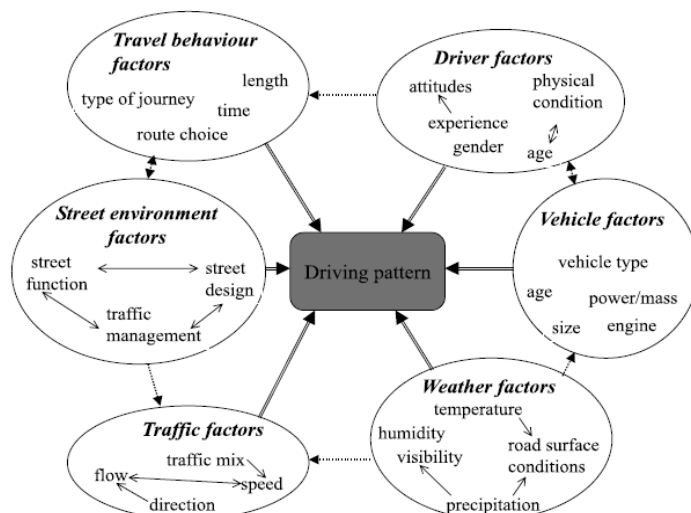
Σχήμα 3.5. Απόκριση μοντέλου στη μεταβολή της ταχύτητας από 0 σε 50 km/h σε 25 second

3.5. Κύκλοι Οδήγησης (Driving Cycles)

Οι κύκλοι οδήγησης είναι κάποια πρότυπα οδήγησης ή με πιο απλά λόγια συναρτήσεις ταχύτητας με το χρόνο βασισμένες σε εμπειρικές παρατηρήσεις πάνω στις συνήθειες οδηγών για συγκεκριμένες περιοχές και τύπους οχημάτων. Εξυπηρετούν πολλούς σκοπούς πέρα από τη στατιστική παρατήρηση της οδηγικής συμπεριφοράς μικροσκοπικά και μακροσκοπικά. Μικροσκοπικά χρησιμοποιούνται κυρίως για την αξιολόγηση κινητήριων συστημάτων ως προς την αντοχή, την καταλληλότητα, την επίδοση, τις εκπομπές ρύπων αλλά και την προκαταρκτική σχεδίαση και τον έλεγχο προσομοιωτικά διαφόρων συστημάτων προώθησης, μετάδοσης, ηλεκτρονικών ισχύος και μπαταριών. Ακόμα, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι κύκλοι οδήγησης μπορούν να λειτουργήσουν ως στατιστικό εργαλείο για την βελτιστοποίηση της επίδοσης και της απόδοσης ενός κινητήριου οχήματος όχι απλά σε ένα ονομαστικό σημείο λειτουργίας αλλά σε ένα φάσμα λειτουργικών καταστάσεων με βάση τις προδιαγραφές που αυτό καλείται να καλύψει. Μακροσκοπικά μπορούν να συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας, στην κατασκευή και τον έλεγχο συνολικών μοντέλων εκπομπών ρύπων και στη διαχείριση και πρόβλεψη της κίνησης σε αστικές περιοχές.

Οι κύκλοι οδήγησης χωρίζονται σε steady-state ή modal κύκλους και σε transient. Οι κύκλοι τύπου steady-state ορίζονται από μία διαδοχή από σταθερά φορτία και ταχύτητες μηχανής και χρησιμοποιούνται κυρίως για την αξιολόγηση μεγάλων μηχανών diesel. Οι transient κύκλοι οδήγησης αποτελούνται από πολλές και σύντομες μεταβολές της ταχύτητας με περιόδους σταθερής επιτάχυνσης και επιβράδυνσης και προσομοιώνουν άλλοι περισσότερο και άλλη λιγότερο την πραγματική οδήγηση.

Ο χαρακτηρισμός της οδηγικής συμπεριφοράς είναι μια πολυπαραμετρική προσέγγιση και η μοντελοποίηση της σε πρότυπα είναι εξαιρετικά δύσκολη [7].



Σχήμα 3.6. Παράγοντες που διαμορφώνουν την οδηγική συμπεριφορά και επηρεάζουν την μοντελοποίηση των κύκλων οδήγησης [7]

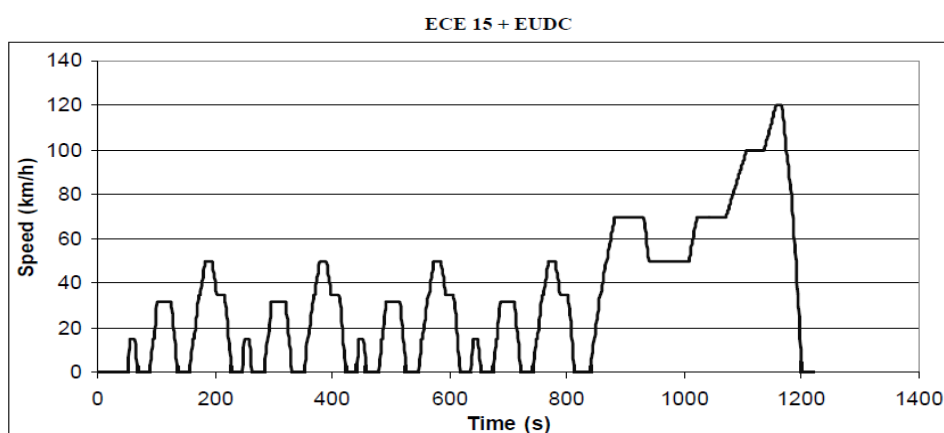
Αυτό φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, γι' αυτό και ίσως κανένας κύκλος δεν μπορεί να προσομοιώσει απόλυτα την πραγματικότητα. Παρόλα αυτά, ερευνητικοί και πολιτειακοί φορείς έχουν μελετήσει εκτενώς το ζήτημα και έχουν καταλήξει σε βασικούς κύκλους οδήγησης ως μια αποτελεσματική προσέγγιση της πραγματικότητας ανά περιβάλλον οδήγησης (αστικό, επαρχιακό, υπεραστικό) και τύπο οχήματος (αυτοκίνητο, μηχανή, φορτηγό) ενώ ενδεχομένως να λαμβάνεται υπόψιν και η εποχικότητα.

3.5.1. Τυποποιημένοι Κύκλοι Οδήγησης

Στα πλαίσια πολλών ερευνητικών δράσεων έχει γίνει μεγάλη προσπάθεια να μοντελοποιηθούν τυπικές συνήθειες οδήγησης για διάφορες περιοχές του κόσμου όσο το δυνατό πιο κοντά στην πραγματικότητα. Σήμερα υπάρχει μεγάλη ποικιλία κύκλων, μερικοί από τους οποίους θα περιγραφούν παρακάτω [7].

- **EU Legislative Cycles** (θεσμοθετημένοι Ευρωπαϊκοί Κύκλοι)
Οι κύκλοι αυτοί ασχολούνται αποκλειστικά με το αστικό και το υπεραστικό περιβάλλον της Ευρώπης. Ο πλέον γνωστός κύκλος οδήγησης είναι ο Νέος Ευρωπαϊκός Κύκλος Οδήγησης (NEDC) που αποτελείται από τέσσερις

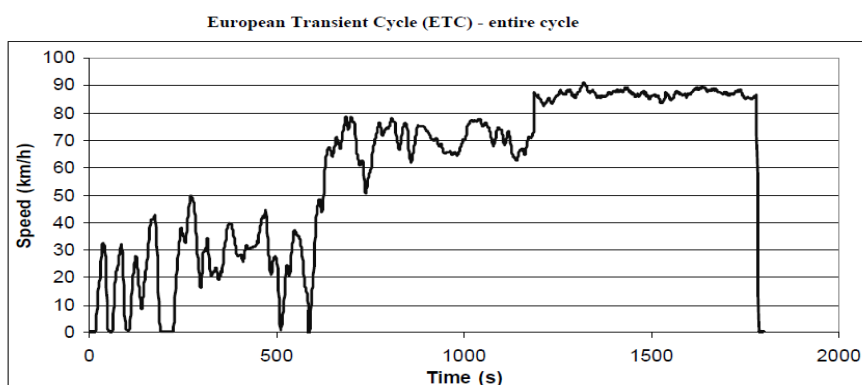
επανάληψεις του Αστικού Κύκλου (UDC ή ECE 15) και μία επανάληψη του Υπεραστικού Κύκλου (EUDC).



Σχήμα 3.7. Νέος Ευρωπαϊκός Κύκλος Οδήγησης[7]

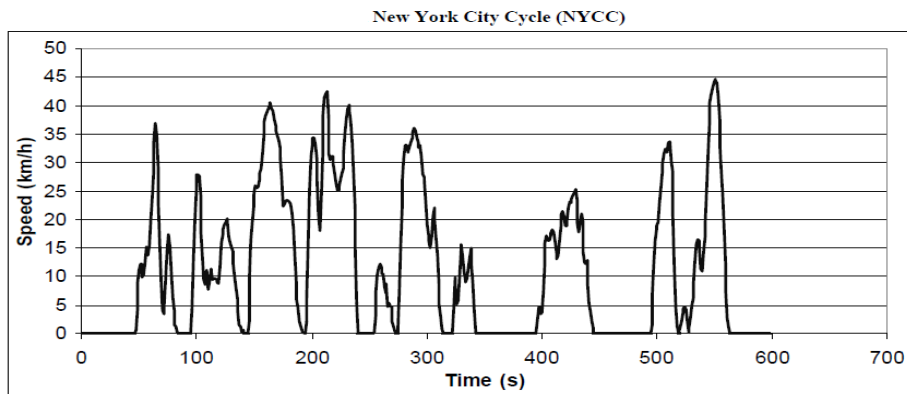
Ο αστικός κύκλος αναπαριστά τις συνθήκες οδήγησης στα μεγάλα αστικά κέντρα των Ευρωπαϊκών χωρών και χαρακτηρίζεται από χαμηλά φορτία, μέγιστη ταχύτητα τα 50 km/h και μέση ταχύτητα τα 18.35 km/h. Αντίθετα, ο υπεραστικός κύκλος αναπαριστά περισσότερο απότομες αλλαγές και υψηλές ταχύτητες με μέγιστη ταχύτητα τα 120 km/h και μέση ταχύτητα τα 62.6 km/h.

Στο πλαίσιο αυτό έχει δημιουργηθεί επίσης ο Ευρωπαϊκός Μεταβατικός Κύκλος (ETC) όπου αποτελείται από πολύ απότομες αλλαγές σε χαμηλές ταχύτητες αρχικά και σε υψηλές έπειτα ενώ δεν υπάρχουν μεγάλα διαστήματα σταθερής ταχύτητας.

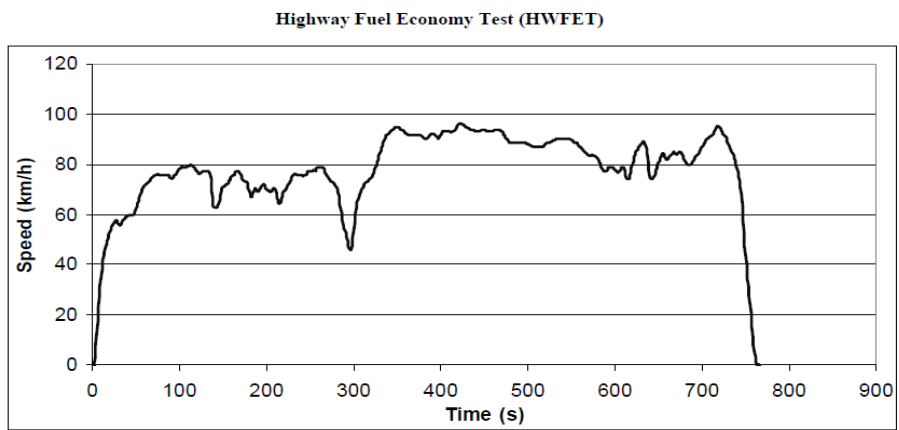


Σχήμα 3.8. Ευρωπαϊκός Μεταβατικός Κύκλος Οδήγησης[7]

- **US Cycles** (Κύκλοι Οδήγησης ΗΠΑ)
Αντίστοιχη προσπάθεια έχει γίνει και για την Αμερική. Οι σημαντικότεροι κύκλοι για συμβατικά οχήματα είναι ο αστικός κύκλος της Νέας Υόρκης (NYCC) και ο κύκλος για αυτοκινητόδρομους με σκοπό τη σύγκριση οχημάτων με βάση την εξοικονόμηση καυσίμου (HWFET). Ο πρώτος προσομοιώνει χαμηλές ταχύτητες και απότομα σταματήματα και εκκινήσεις σε συνθήκες κίνησης ενώ ο δεύτερος αναπαριστά την οδήγηση σε μεγάλους αυτοκινητόδρομους με μέγιστη ταχύτητα τα 100 km/h.



Σχήμα 3.9. Ο αστικός κύκλος οδήγησης της Νέας Υόρκης[7]

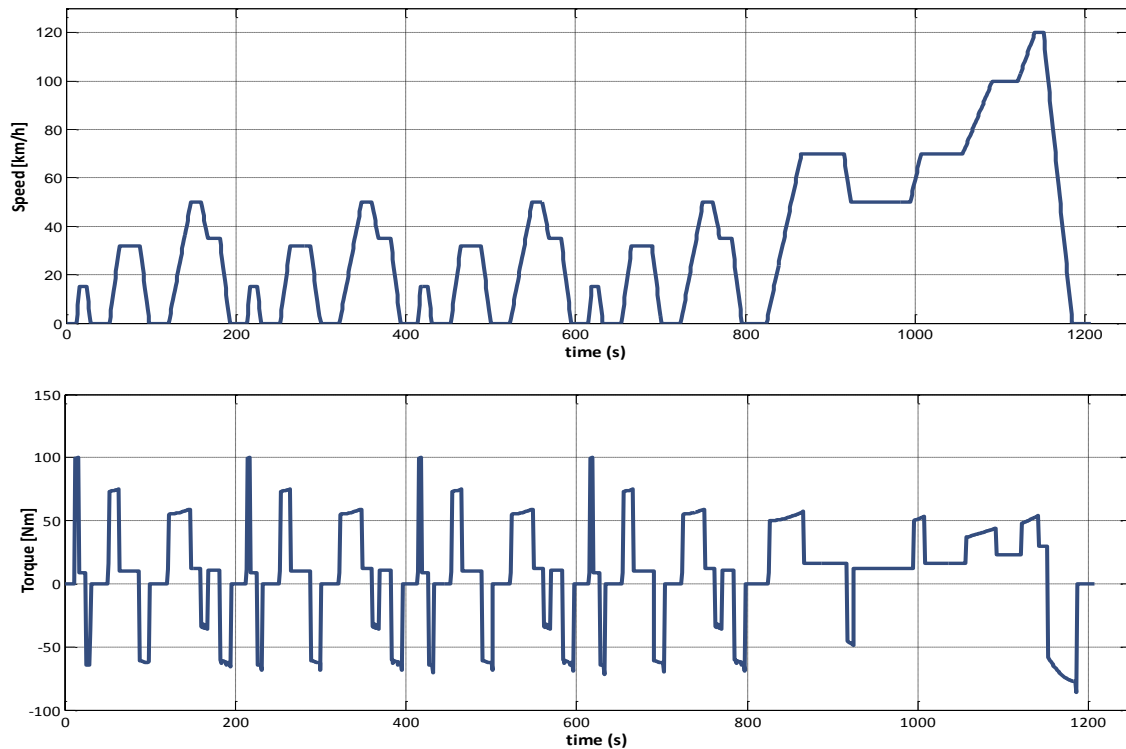


Σχήμα 3.10. Ο κύκλος εξοικονόμησης καυσίμου σε μεγάλους αυτοκινητόδρομους[7]

Ομοίως υπάρχουν αντίστοιχοι κύκλοι για την Ιαπωνία ενώ άλλα ερευνητικά προγράμματα όπως το ARTEMIS, το MODEM-IM, το INRETS και το WSL έχουν αναπαραστήσει συνθήκες οδήγησης για αστικούς, προαστιακούς και αγροτικούς δρόμους σε διάφορα μεγέθη οχημάτων ενώ στο πρόγραμμα TRAMAQ έχει γίνει μία καλύτερη προσέγγιση της κυκλοφοριακής συμμόρφωσης στα αστικά κέντρα.

3.5.2. Απόκριση μοντέλου οχήματος στον Νέο Ευρωπαϊκό κύκλο οδήγησης (NEDC)

Το μοντέλο που περιγράφεται παραπάνω μπορεί να λάβει σαν είσοδο μία σειρά από μεταβολές ταχυτήτων, πράγμα που το κάνει κατάλληλο για την μελέτη των δυνάμεων και την απαίτηση ροπής ενός οχήματος σε διάφορους κύκλους οδήγησης. Ο λόγος που χρησιμοποιούμε τον Νέο Ευρωπαϊκό κύκλο οδήγησης στην παρούσα ανάλυση είναι γιατί έχει παρατηρηθεί ότι είναι μία πολύ καλή προσέγγιση της οδήγησης για μικρά οχήματα πόλης.



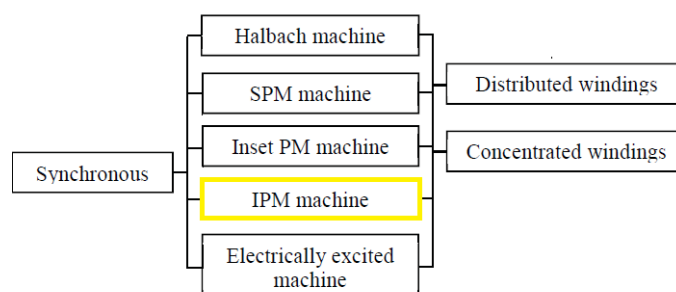
Σχήμα 3.11. Απαίτηση Ροπής στον NEDC για το υπό μελέτη ηλεκτροκίνητο όχημα

Είναι φανερό ότι η ροπή παίρνει την μέγιστη τιμή της σε απότομες εκκινήσεις. Όσο πιο απότομη η αύξηση της ταχύτητας, τόσο μεγαλύτερη η δύναμη επιτάχυνσης και συνεπώς η απαίτηση ροπής. Στο κομμάτι του υπεραστικού κύκλου που η ταχύτητα παίρνει την μέγιστη τιμή, η απαίτηση ροπής δεν είναι τόσο μεγάλη καθώς η μετάβαση στην υψηλή ταχύτητα γίνεται πιο αργά. Το ίδιο συμβαίνει και στην επιβράδυνση, όσο πιο απότομη τόσο πιο μεγάλη σε απόλυτη τιμή είναι η ροπή αλλά με αρνητική τιμή. Επίσης, στα διαστήματα που η ταχύτητα παραμένει σταθερή, η απαίτηση ροπής μειώνεται και σταθεροποιείται γιατί ο κινητήρας καλείται να υπερνικήσει την αεροδυναμική αντίσταση και την αντίσταση κύλισης που επηρεάζονται αναλογικά σε σχέση με την ταχύτητα. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις περιόδους επιβράδυνσης που η ροπή παίρνει αρνητικές τιμές, η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια και επιστρέφει ενέργεια στη διάταξη φορτίζοντας τις μπαταρίες (αναγεννητική πέδηση).

4. Σύγχρονες μηχανές εσωτερικών μονίμων μαγνητών

4.1. Εισαγωγή

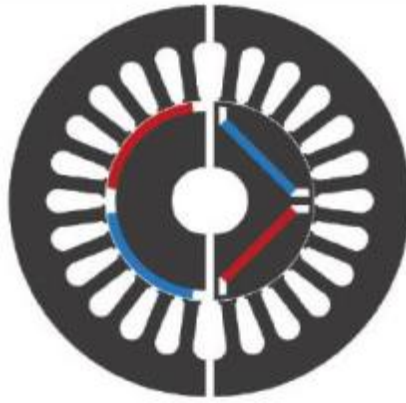
Οι σύγχρονες μηχανές παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλομορφία ως προς την γεωμετρική τους διαμόρφωση. Μια βασική κατηγορία σύγχρονων μηχανών αποτελούν οι μηχανές μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet ή PM). Στην περίπτωση αυτή, η μηχανή δε φέρει δύο αλλά ένα μόνο τύλιγμα, αυτό του στάτη. Ο δρομέας αντί για τύλιγμα είναι εφοδιασμένος με μόνιμους μαγνήτες. Έτσι τα δύο μαγνητικά πεδία που απαιτούνται για την ανάπτυξη ροπής, προκύπτουν αφενός από έναν ηλεκτρομαγνήτη (στάτη), και αφετέρου από ένα μόνιμο μαγνήτη (δρομέα).



Σχήμα 4.1. Οικογένεια σύγχρονων ηλεκτρικών μηχανών[18]

Οι σύγχρονες μηχανές παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλομορφία ως προς την γεωμετρική τους διαμόρφωση. Μια βασική κατηγορία σύγχρονων μηχανών αποτελούν οι μηχανές μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet ή PM). Στην περίπτωση αυτή, η μηχανή δε φέρει δύο αλλά ένα μόνο τύλιγμα, αυτό του στάτη. Ο δρομέας αντί για τύλιγμα είναι εφοδιασμένος με μόνιμους μαγνήτες. Έτσι τα δύο μαγνητικά πεδία που απαιτούνται για την ανάπτυξη ροπής, προκύπτουν αφενός μεν από έναν ηλεκτρομαγνήτη (στάτη), και αφετέρου δε από ένα μόνιμο μαγνήτη (δρομέα).

Οι ηλεκτρικές μηχανές εσωτερικών μονίμων μαγνητών (**Interior Permanent Magnet ή IPM**) αποτελούν μια υποκατηγορία των σύγχρονων μηχανών μόνιμου μαγνήτη. Σε αντίθεση με τη συνηθέστερη περίπτωση των μηχανών επιφανειακού μόνιμου μαγνήτη, στις μηχανές IPM οι μόνιμοι μαγνήτες δεν στερεώνονται στην επιφάνεια του δρομέα, αλλά τοποθετούνται σε κατάλληλες κοιλότητες στο εσωτερικό του. Στο σχήμα 4.2 φαίνεται η διαφοροποίηση της γεωμετρίας, στην περίπτωση του επιφανειακού (αριστερά) και του εσωτερικού (δεξιά) μόνιμου μαγνήτη.



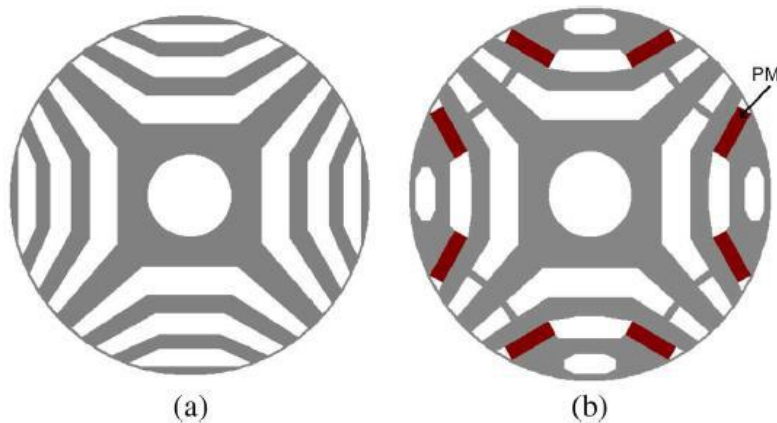
Σχήμα 4.2. Ηλεκτρική μηχανή επιφανειακού (αριστερά) και εσωτερικού (δεξιά) μαγνήτη[18]

Το δεξί μέρος του παραπάνω σχήματος, παρουσιάζει την απλούστερη δυνατή γεωμετρία μιας μηχανής IPM, στην οποία κάθε πόλος της μηχανής αποτελείται από μία μόνο, οριζόντια, ενιαία μπάρα μαγνήτη. Παρατηρούμε επιπλέον ότι στα άκρα του μαγνήτη, απουσιάζει ο σίδηρος, και στη θέση του υπάρχουν μικρές κοιλότητες αέρα. Οι κοιλότητες αυτές ονομάζονται φράγματα ροής αέρα, και αποτελούν σημαντικό σχεδιαστικό χαρακτηριστικό των μηχανών IPM. Τα φράγματα ροής αέρα, σε συνδυασμό με την εσωτερικότητα των μαγνητών, δημιουργούν ανισοτροπία στο δρομέα. Η ανισοτροπία αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι η μαγνητική αντίσταση του αέρα και του μαγνήτη, είναι πολύ μεγάλες σε σύγκριση με αυτή της σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας του δρομέα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μαγνητική αντίσταση του δρομέα να μην είναι σταθερή, αλλά να διαφοροποιείται από τη μια περιοχή του δρομέα στην άλλη.

Η ιδιαιτερότητα αυτή του δρομέα, είναι πολύ σημαντική, καθώς η παραγόμενη ροπή, δεν οφείλεται αποκλειστικά στην αλληλεπίδραση των δύο μαγνητικών πεδίων (**magnet torque**) αλλά διαθέτει και μια συνιστώσα εκτυπότητας, που ονομάζεται ροπή ευθυγράμμισης (**reluctance torque**).

Η ροπή ευθυγράμμισης προκύπτει από τη φυσική τάση της μαγνητικής ροής να «κλείει» μέσω του μονοπατιού ελάχιστης μαγνητικής αντίστασης, ακριβώς όπως το ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται από τον κατά το δυνατό πιο αγώγιμο δρόμο, στα ηλεκτρικά κυκλώματα. Υπό αυτό το πρίσμα, οι μηχανές IPM, παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ομοιότητα με τις μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (Synchronous Reluctance Motors), όταν αυτές υποβοηθούνται από μόνιμους μαγνήτες (PM assisted SynchRel Motors).

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζονται τα προαναφερθέντα μοντέλα μηχανών:



Σχήμα 4.3. Δρομέας μηχανής τύπου SynchRel (a), και PM assisted SynchRel (b)[18]

Στο σχήμα (4.3a), φαίνεται ο δρομέας μιας μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (SynchRel), ενώ στο σχήμα (4.3b), η μηχανή έχει μετατραπεί σε PM assisted SynchRel, με την προσθήκη μονίμων μαγνητών.

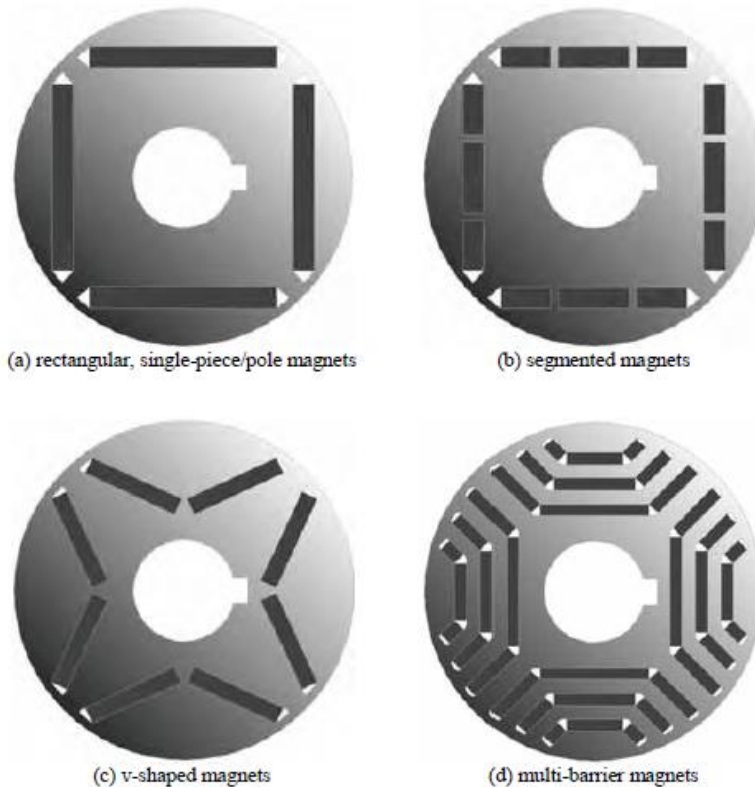
Η τοποθέτηση των μαγνητών στο εσωτερικό και όχι στην επιφάνεια του δρομέα, αφήνει μεγάλα περιθώρια πειραματισμού σε σχέση με την ακριβή γεωμετρική διαμόρφωση του δρομέα. Έχουν έτσι προταθεί κατά καιρούς διάφορες γεωμετρικές δρομέα, που διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το μέγεθος, τη θέση και την κλίση των μαγνητών, καθώς και το πλήθος των στρώσεων μαγνήτη. Οι επιμέρους σχεδιάσεις προσπαθούν να συνδυάσουν καλές επιδόσεις από πλευράς ροπής, υψηλή απόδοση από πλευράς απωλειών, αλλά και να επιτύχουν ικανοποιητική λειτουργία σε μεγάλο εύρος στροφών.

Μερικές από τις συνηθέστερες IPM γεωμετρικές δρομέα παρουσιάζονται στο σχήμα 4.4. Καθεμιά από τις παρακάτω γεωμετρίες διαθέτει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στο σχήμα 4.4 a, φαίνεται η απλούστερη γεωμετρία, που διαθέτει μία μόνο στρώση ενιαίου μαγνήτη οριζόντια τοποθετημένου (**I-shaped magnet**) στο εσωτερικό του δρομέα. Μία παραλλαγή αυτής περιέχει διπλή στρώση ενιαίου οριζόντιου μαγνήτη, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5 (2-I Shaped magnet).

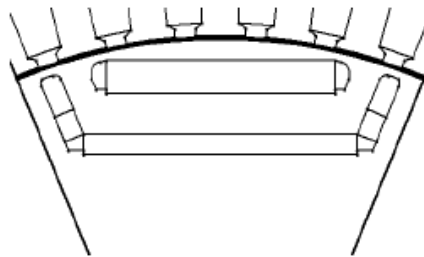
Στο σχήμα 4.4 β, παρουσιάζεται μια παρόμοια γεωμετρία στην οποία όμως ο μαγνήτης τοποθετείται τμηματικά. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μείωση των απωλειών μαγνήτη [10], χάρη στη μικρότερη επιφάνεια που καταλαμβάνει καθένας από τους επιμέρους μικρότερους μαγνήτες που χρησιμοποιούνται. Η τμηματική τοποθέτηση του μαγνήτη επιφέρει κατασκευαστικές δυσκολίες, ενώ μειώνει και την πυκνότητα μαγνητικής ροής, άρα και ισχύος, λόγω των απωλειών σκέδασης στις γέφυρες σιδήρου (iron bridges), που δημιουργούνται μεταξύ των μαγνητών.

Στο σχήμα 4.4 γ, παρουσιάζεται μια διαφορετική γεωμετρία γνωστή ως γεωμετρία τύπου V (**V-shaped magnet**). Στο σχήμα αυτό, κάθε πόλος αποτελείται από δύο μαγνήτες που βρίσκονται υπό κλίση μεταξύ τους. Η σχεδίαση αυτή αποσκοπεί στην μεγαλύτερη συγκέντρωση της μαγνητικής ροής στην επιθυμητή διαδρομή [11]. Οι μαγνήτες τοποθετούνται και εδώ τμηματικά, γεγονός που εισάγει κατασκευαστικές δυσκολίες. Για το λόγο αυτό συνηθίζεται κάθε πόλος της μηχανής να αποτελείται το

πολύ από 4 μαγνήτες, ώστε να διατηρείται η απλότητα και η ευρωστία της συνολικής σχεδίασης.

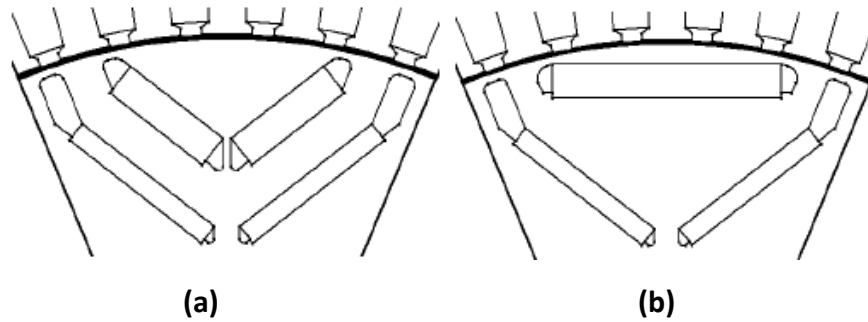


Σχήμα 4.4. Συνήθεις διαμορφώσεις δρομέα μηχανής IPM.[26]



Σχήμα 4.5. 2-l Shaped magnet[29]

Και σε αυτή την περίπτωση υπάρχει εναλλακτική παραλλαγή με διπλή στρώση (2-V Shaped magnet) και με σχηματισμό ανάποδου δέλτα (∇ shaped magnet), η οποία προκύπτει από την βελτιστοποίηση της 2-V ως προς την επίδοση της μηχανής με βάση τη γωνία που σχηματίζουν οι εξωτερικοί μαγνήτες. Οι γεωμετρίες αυτές αυξάνουν σημαντικά την σχεδιαστική και κατασκευαστική πολυπλοκότητα. Παρόλα αυτά η ∇ shaped έχει μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας με υψηλές αποδόσεις συγκριτικά με τις άλλες γεωμετρίες διπλής στρώσης.



Σχήμα 4.6. a) 2-V shaped [29], b) ∇ shaped [29]

Σε γενικές γραμμές, έχει παρατηρηθεί ότι οι μαγνήτες με διπλή στρώση παρουσιάζουν μεγαλύτερη μέγιστη ροπή σε σχέση με τους αντίστοιχους μονής.

Τέλος στο σχήμα 4.4 δ, παρουσιάζεται μια πολυστρωματική γεωμετρία IPM, που διαθέτει μάλιστα 3 επιμέρους στρώσεις μαγνήτη. Η αύξηση των στρώσεων μαγνήτη, προσδίδει εκτυπότητα στη μηχανή, με αποτέλεσμα να αυξάνεται σημαντικά η ροπή ευθυγράμμισης που η μηχανή είναι ικανή να αποδίδει. Παρόλα αυτά, η αύξηση των στρώσεων, επιφέρει αυξημένη κατασκευαστική πίεση στο σίδηρο του δρομέα. Για το λόγο αυτό, ο δυνατός αριθμός των στρώσεων μαγνήτη υφίσταται μηχανικούς περιορισμούς, για λόγους αντοχής υλικών. Άλλες πιθανές γεωμετρικές διαμορφώσεις, αφορούν την τοποθέτηση των μαγνητών εγκάρσια, καθώς επίσης και τη διαφορετική σχεδίαση των φραγμάτων ροής αέρα.

4.2. Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και εφαρμογές των σύγχρονων κινητήρων εσωτερικών μονίμων μαγνητών

Η σχεδιαστική ιδιαιτερότητα του δρομέα, προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στις μηχανές IPM, τα κυριότερα από αυτά είναι:

- **Κατασκευαστική ευρωστία.** Σε αντίθεση με τις μηχανές επιφανειακού μαγνήτη, οι μηχανές IPM διαθέτουν ομοιόμορφη εξωτερική επιφάνεια και στιβαρή κατασκευή δρομέα. Το γεγονός αυτό, τις καθιστά κατάλληλες για χρήση σε εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων, καθώς προσφέρουν μειωμένο θόρυβο κατά τη λειτουργία τους, αλλά και καλύτερη δυναμική συμπεριφορά.
- **Προφύλαξη μαγνητών.** Η σχεδίαση των μηχανών IPM, προσφέρει στους μαγνήτες μεγαλύτερη προστασία είτε από φυσική φθορά, είτε από απομαγνήτιση, η οποία μπορεί να προκληθεί από ένα μεγάλο ρεύμα βραχυκύκλωσης. Αντίθετα, στη σχεδίαση επιφανειακού μαγνήτη, οι μαγνήτες είναι εκτεθειμένοι στην εξωτερική επιφάνεια του δρομέα [12].
- **Εκτυπότητα δρομέα.** Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η εσωτερικότητα των μαγνητών (ειδικά στις πολυστρωματικές γεωμετρίες), σε συνδυασμό με τα φράγματα ροής αέρα, δημιουργούν ανισοτροπία στο δρομέα. Συγκεκριμένα, ο d-άξονας του δρομέα, διέρχεται από τη μέση των μαγνητών, και ορίζει την περιοχή υψηλής μαγνητικής αντίστασης, ενώ ο q-άξονας ορίζει μια διαδρομή που περιέχει μόνο σιδηρομαγνητική λαμαρίνα. Γνωρίζουμε ότι η μαγνητική

διαπερατότητα του μόνιμου μαγνήτη (d-άξονας), είναι πολύ μικρή, και προσεγγίζει αυτή του αέρα. Εφόσον, η μαγνητική διαπερατότητα του σιδήρου είναι μεγάλη, η αυτεπαγωγή του q-άξονα (L_q), μπορεί να είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αυτεπαγωγή του d-άξονα (L_d). Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ροπής λόγω εκτυπότητας. Έτσι οι μηχανές IPM, χρησιμοποιούν δύο μηχανισμούς παραγωγής ροπής. Ο πρώτος αφορά την αλληλεπίδραση των πεδίων του μαγνήτη και του στάτη (magnet torque), ενώ ο δεύτερος αφορά τη ροπή ευθυγράμμισης (reluctance torque) λόγω εκτυπότητας.

- **Εξοικονόμηση μαγνήτη.** Η συνιστώσα της ροπής ευθυγράμμισης επιτρέπει τη μείωση του όγκου μαγνήτη που απαιτείται για μια μηχανή. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό στις σημερινές συνθήκες της αγοράς. Οι ισχυρότεροι μαγνήτες που χρησιμοποιούνται σήμερα (**NdFeB**) χρησιμοποιούν ως βασικό στοιχείο το Νεοδύμιο (Nd), το οποίο και χαρακτηρίζεται ως σπάνιο υλικό στη γη ή σπάνια γαία (**rare earth**). Οι σπάνιες γαίες είναι χημικά στοιχεία, τα οποία συναντώνται μόνο σε συγκεκριμένες περιοχές του πλανήτη, με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζονται από υψηλά κόστη αγοράς και μεταφοράς. Η εξοικονόμηση Νεοδυμίου μπορεί επομένως να μειώσει δραστικά το κατασκευαστικό κόστος της μηχανής. Αξίζει να σημειωθεί ότι, οι μαγνήτες των μηχανών IPM, διαθέτουν κατά κανόνα απλούστερο, ορθογώνιο σχήμα, σε αντίθεση με το κοίλο σχήμα των επιφανειακών μαγνητών [13].
- **Υψηλή απόδοση.** Όπως όλες οι μηχανές μονίμων μαγνητών, οι μηχανές IPM προσφέρουν υψηλή απόδοση. Η απόδοση αυτή οφείλεται κυρίως στη μείωση των απωλειών χαλκού που επιτυγχάνεται χάρη στην απουσία τυλίγματος στο δρομέα.
- **Υψηλή πυκνότητα ισχύος.** Όπως όλες οι μηχανές μονίμων μαγνητών, οι μηχανές IPM χαρακτηρίζονται από υψηλή πυκνότητα ισχύος. Αυτή επιτυγχάνεται χάρη στην πρόοδο που έχει σημειωθεί στον τομέα των μαγνητικών υλικών, και την ενσωμάτωση των μαγνητών Νεοδυμίου (**NdFeB**) στην αγορά. Τελικά προσφέρεται μεγάλη ικανότητα παραγωγής ροπής, ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνεται εξοικονόμηση στον όγκο και το βάρος της μηχανής.
- **Δυνατότητα υπερφόρτωσης (Overload capability).** Οι μηχανές IPM παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά σε συνθήκες υπερφόρτωσης, όταν δηλαδή τροφοδοτούνται με ρεύματα υψηλότερα του ονομαστικού. Με τον τρόπο αυτό, αυξάνεται η παραγόμενη ροπή, και διευκολύνονται ενέργειες όπως π.χ. την επιτάχυνση ενός ηλεκτρικού οχήματος. Η υπερφόρτωση της μηχανής θα πρέπει να έχει σαφώς μικρή διάρκεια (μερικά δευτερόλεπτα), προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν θερμικές καταπονήσεις.
- **Αποτελεσματική λειτουργία εξασθένησης πεδίου (field weakening).** Πολλές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα η οδήγηση του κινητήρα ενός ηλεκτρικού οχήματος, απαιτούν λειτουργία υπό σταθερή ισχύ, σε μεγάλο εύρος στροφών. Η απαίτηση αυτή μπορεί να μην ικανοποιείται εύκολα, σε συστήματα ηλεκτροκίνησης, όπου η παρεχόμενη ισχύς περιορίζεται την dc

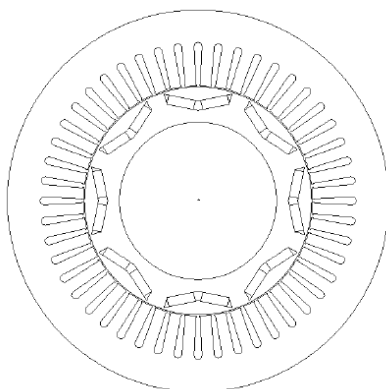
τάση των μπαταριών. Για το λόγο αυτό, αναπτύσσεται σε τέτοιες περιπτώσεις μια λειτουργία ελέγχου γνωστή ως εξασθένιση πεδίου.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που προσφέρουν, οι μηχανές IPM διαθέτουν και ορισμένα μειονεκτήματα, τα κυριότερα από τα οποία είναι:

- **Αυξημένο κόστος.** Συγκρινόμενες με τις μηχανές επαγωγής, οι μηχανές IPM χαρακτηρίζονται από αυξημένο κατασκευαστικό κόστος, το οποίο οφείλεται κυρίως στους ακριβούς μαγνήτες Νεοδυμίου. Έτσι μια μηχανή IPM είναι δυνατό να κοστίζει τελικά 50-100% περισσότερο σε σχέση με μια ασύγχρονη ίδιας ισχύος. Σε εφαρμογές μεταβλητών στροφών, με σύστημα ελέγχου ταχύτητας, το αυξημένο κόστος των μηχανών IPM μπορεί να δικαιολογείται, χάρη στην ικανοποιητική λειτουργία τους σε μεγάλο εύρος στροφών. Όμως σε εφαρμογές σταθερών στροφών, οι μηχανές επαγωγής συνεχίζουν να αποτελούν τη βέλτιστη λύση.
- **Μειωμένη επίδοση σε σχέση με τις μηχανές επιφανειακού μαγνήτη.** Στις μηχανές επιφανειακού μαγνήτη, οι μαγνήτες βρίσκονται πολύ κοντά στο διάκενο, όπου λαμβάνει χώρα και η ανάπτυξη της ροπής στη μηχανή. Αντίθετα, στις μηχανές IPM, δεν εκμεταλλευόμαστε πλήρως την ισχύ των μαγνητών, καθώς μέρος αυτής απορροφάται από το σίδηρο του δρομέα που μεσολαβεί μεταξύ μαγνήτη και διακένου. Όσο βαθύτερα τοποθετούνται οι μαγνήτες, στις μηχανές IPM, αυξάνεται μεν η εκτυπότητα της μηχανής, όμως ταυτόχρονα μειώνεται και ο βαθμός αξιοποίησης της ισχύος τους. Για το λόγο αυτό, σε εφαρμογές που έχουν πολύ υψηλές προδιαγραφές σε ροπή και επίδοση οι μηχανές επιφανειακού μαγνήτη, αποτελούν την προτιμότερη λύση.
- **Κυμάτωση ροπής.** Το πρόβλημα αυτό εντοπίζεται κυρίως σε μηχανές IPM συγκεντρωμένου τυλίγματος. Σε αντίθεση με τις μηχανές επιφανειακού μαγνήτη, οι οποίες συνδυάζονται πολύ καλά με συγκεντρωμένο τύλιγμα, οι μηχανές IPM απαιτούν συγκεκριμένο συνδυασμό πόλων-αυλάκων, προκειμένου η κυμάτωση ροπής της μηχανής να είναι αποδεκτή. Για το λόγο αυτό, στις μηχανές IPM, η επιλογή τύπου τυλίγματος δεν αποτελεί τετριμμένο ζήτημα, και το διανεμημένο τύλιγμα τείνει να χρησιμοποιείται συχνότερα από το συγκεντρωμένο.
- **Νέα τεχνολογία.** Οι μηχανές IPM αποτελούν έναν αρκετά νέο τύπο μηχανής, και το ενδιαφέρον για αυτές αναζωπυρώθηκε την τελευταία μόλις δεκαετία. Αντίθετα οι μηχανές επαγωγής αλλά και οι βενζινοκινητήρες, όσο αφορά τα συστήματα ηλεκτροκίνησης, αποτελούν δοκιμασμένες λύσεις, που λειτουργούν με επιτυχία εδώ και αρκετές δεκαετίες.

Για τους παραπάνω λόγους οι μηχανές εσωτερικών μονίμως μαγνητών έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές. Τα 20 τελευταία χρόνια ήταν μια ενδιαφέρουσα περίοδος με σημαντική πρόοδο στην έρευνα και ανάπτυξη αυτής της κατηγορίας μηχανών που αποκτούν ισχυρή παρουσία στην αγορά της ηλεκτροκίνησης παράλληλα με ιδιαίτερα ευφυή ηλεκτρονικά ισχύος.

Η δυνατότητα λειτουργίας σε μεγάλο εύρος στροφών χάρη στον αποτελεσματικό έλεγχο εξασθένησης πεδίου, σε συνδυασμό με το μειωμένο όγκο και βάρος της μηχανής, καθιστούν τις μηχανές IPM ιδανικές για χρήση σε υβριδικά ή ηλεκτρικά οχήματα. Το υβριδικό μοντέλο **Toyota Prius**, αποτελεί μάλλον το χαρακτηριστικότερο παράδειγμα μηχανής IPM σε ηλεκτρικό όχημα. Ο ηλεκτρικός κινητήρας του, που λειτουργεί επικουρικά ως προς τον βενζινοκινητήρα, φαίνεται στο σχήμα 4.7 :



Σχήμα 4.7. Ο 8-πολικός κινητήρας IPM του υβριδικού Toyota Prius. [28]

Ο 8-πολικός κινητήρας αποτελείται από μία μόνο στρώση εσωτερικών μόνιμων μαγνητών τύπου V (v-shaped magnet) στο δρομέα, που συνδυάζεται με διανεμημένο τύλιγμα ($Q = 48$ αύλακες συνολικά) .

Στα περισσότερα σύγχρονα οχήματα, αν και η βενζίνη συνεχίζει να αποτελεί τη βασική κινητήρια δύναμη, πολλά δευτερεύοντα συστήματα, όπως για παράδειγμα υδραυλικά συστήματα, τείνουν να εξ ηλεκτριστούν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το υδραυλικό τιμόνι, το οποίο αντικαθίσταται πλέον από ένα ηλεκτρικό σύστημα που προσφέρει οικονομία καυσίμου και μείωση εκπομπών CO₂, καθώς ο ηλεκτρικός κινητήρας τίθεται σε λειτουργία μόνο όταν το τιμόνι στρίβει.

Παράλληλα, οι μηχανές εσωτερικών μόνιμων μαγνητών αποκτούν όλο και μεγαλύτερο μερίδιο στην αγορά της αιολικής ενέργειας λόγω υψηλής απόδοσης, μεγάλης πυκνότητας ισχύος, χαμηλού κατασκευαστικού κόστους και δυνατότητας λειτουργίας στο σημείο παραγωγής μέγιστης ισχύος για κάθε ταχύτητα ανέμου χάρη στην υψηλή ελεγχιμότητά τους. Ακόμα χρησιμοποιούνται ως σερβοκινητήρες στον άξονα εργαλειομηχανών αλλά και όλο και περισσότερο σε μικρές οικιακές συσκευές.

4.3. Μαθηματικό μοντέλο της μηχανής IPM

4.3.1. Το πλαίσιο αναφοράς d-q

Πριν προταθεί ο μετασχηματισμός του Park (1929), η αναλυτική περιγραφή μιας τριφασικής μηχανής ac απαιτούσε την επίλυση σύνθετων διαφορικών εξισώσεων με ημιτονοειδώς μεταβαλλόμενες ποσότητες (ρεύματα, τάσεις ,πεπλεγμένες ροές). Ο μετασχηματισμός του Park επιτρέπει τη μεταφορά αυτών των χρονικά

μεταβαλλόμενων ποσοτήτων από το ακίνητο πλαίσιο του στάτη, στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς του δρομέα.

Η μήτρα του μετασχηματισμού Park, η οποία πολλαπλασιάζει τα τριφασικά μεγέθη για να προκύψουν ποσότητες d-q, παρουσιάζεται παρακάτω:

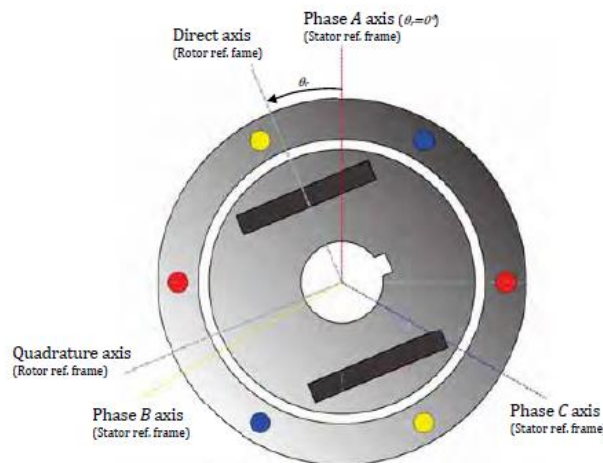
$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Σχήμα 4.8. Μετασχηματισμός Park[18]

Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται η μετατροπή των τριφασικών μεγεθών σε ποσότητες DC ευθέως (d-axis) και εγκάρσιου (q-axis) άξονα. Οι δύο αυτοί άξονες ορίζονται ως εξής:

- Ο **d-άξονας** ή **άξονας ροής**, ευθυγραμμίζεται με το μαγνητικό άξονα της φάσης A του τυλίγματος στάτη.
- Ο **q-άξονας** είναι μετατοπισμένος κατά 90 ηλεκτρικές μοίρες σε σχέση με τον d-άξονα.

Στο σχήμα 4.9 φαίνεται μια διπολική IPM μηχανή, στην οποία είναι σχεδιασμένοι οι άξονες του d-q πλαισίου αναφοράς.



Σχήμα 4.9. Το d-q πλαίσιο αναφοράς.[18]

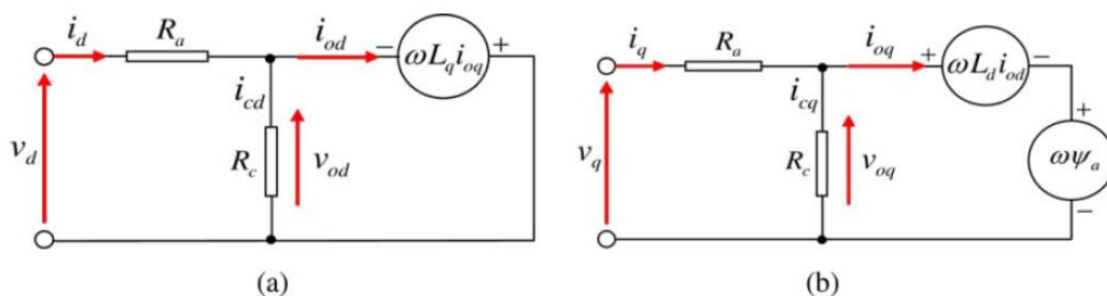
Στο d-q πλαίσιο αναφοράς, οι τάσεις και τα ρεύματα θεωρούνται χωρικά διανύσματα, το πλάτος και η φάση των οποίων καθορίζει την επίδοση της μηχανής. Για το λόγο αυτό, ο έλεγχος των ποσοτήτων αυτών μέσω ηλεκτρονικών ισχύος, για την οδήγηση της μηχανής, ονομάζεται διανυσματικός έλεγχος (**vector control**).

Η ανάλυση που ακολουθεί, χρησιμοποιεί το μετασχηματισμό σε στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς, προκειμένου να εξαχθεί το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα, το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα, και οι αναλυτικές σχέσεις περιγραφής της μηχανής IPM.

4.3.2. Ισοδύναμο κύκλωμα

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το ισοδύναμο κύκλωμα που προκύπτει από τη μαθηματική μοντελοποίηση της μηχανής IPM στο d-q πλαίσιο αναφοράς.

Στο σχήμα (4.10 a) παρουσιάζεται το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα για τον d-άξονα, ενώ στο σχήμα (4.10 b) παρουσιάζεται το αντίστοιχο κύκλωμα για τον q-άξονα της μηχανής [16].



Σχήμα 4.10. Ισοδύναμο κύκλωμα d-άξονα (a) και q-άξονα (b) μηχανής IPM. [30]

Όπου :

- V_d V_q οι φασικές τάσεις εισόδου d-άξονα και q-άξονα αντίστοιχα.
- i_d i_q τα ρεύματα d-άξονα και q-άξονα αντίστοιχα.
- L_d L_q οι αυτεπαγωγές d-άξονα και q-άξονα αντίστοιχα.
- η ισοδύναμη αντίσταση R_c , χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση των απωλειών σιδήρου.
- i_{cd} i_{cq} τα ρεύματα απωλειών πυρήνα d-άξονα και q-άξονα αντίστοιχα.
- R_a η ισοδύναμη ανά φάση αντίσταση.
- ω είναι η γωνιακή συχνότητα.
- ψ_a ή Φ_{mag} είναι η ροή του μόνιμου ανά πόλο.

4.3.3. Αναλυτικές σχέσεις μηχανής IPM

Αγνοώντας τον κλάδο των απωλειών πυρήνα, η κυκλωματική ανάλυση διευκολύνεται σημαντικά, και προκύπτει τελικά η αναλυτική περιγραφή του συστήματος, με τη χρήση των βασικών νόμων του Kirchhoff.

Προκύπτουν έτσι οι ακόλουθες σχέσεις:

$$V_d = R_a * I_d - \omega * \Phi_q = R_a * I_d - \omega * L_q * I_q \quad (4.1)$$

$$V_q = R_a * I_q + \omega * \Phi_d = R_a * I_q + \omega * L_d * I_d + \omega * \Phi_{mag} \quad (4.2)$$

Όπου:

$$I_d = -I_a * \sin \gamma \quad (4.3)$$

$$I_q = I_a * \cos \gamma \quad (4.4)$$

- β : η γωνία μεταξύ του διανύσματος του ρεύματος στάτη και του q-άξονα

$$\Phi_d = L_d * I_d + \Phi_{mag} \quad (4.5)$$

$$\Phi_q = L_q * I_q \quad (4.6)$$

Τα ρεύματα και οι τάσεις d-άξονα και q-άξονα, μπορούν να υπολογιστούν από τη θεμελιώδη πολική τάση και το ρεύμα οπλισμού που υπολογίζονται από το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων Femm, ή μπορούν να μετρηθούν σε μια φυσική πειραματική διάταξη.

Ισχύουν κατά τα γνωστά οι σχέσεις:

$$V_a = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (4.7)$$

$$I_a = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (4.8)$$

Οι αυτεπαγωγές L_d, L_q και η ροή του μόνιμου μαγνήτη Φ_{mag} μπορούν να υπολογιστούν εύκολα από το λογισμικό Femm, αν προσομοιώσουμε διαδοχικά τη λειτουργία της μηχανής με ρεύμα μόνο d-άξονα, q-άξονα και σε κενό φορτίο, αντίστοιχα.

Χρειάζεται να επισημάνουμε στο σημείο αυτό ότι τόσο οι αυτεπαγωγές L_d, L_q όσο και η ροή μαγνήτη Φ_{mag} , δεν αποτελούν σταθερές παραμέτρους της μηχανής. Συγκεκριμένα, οι αυτεπαγωγές μεταβάλλονται ανάλογα με το φορτίο της μηχανής, και τείνουν γενικά να μειώνονται, καθώς το ρεύμα οπλισμού (στάτη) αυξάνει. Η ροή μαγνήτη επίσης μεταβάλλεται με το φορτίο, καθώς σε συνθήκες υψηλού φορτίου επέρχεται μαγνητικός κορεσμός στον πυρήνα της μηχανής.

Με τις ποσότητες αυτές γνωστές, μπορούμε πλέον να υπολογίσουμε τη ροπή σύμφωνα με τη σχέση:

$$T = p * \Phi_{mag} * I_q + p * (L_d - L_q) * I_d * I_q \quad (4.9)$$

Όπου με p συμβολίζουμε τα ζεύγη πόλων της μηχανής.

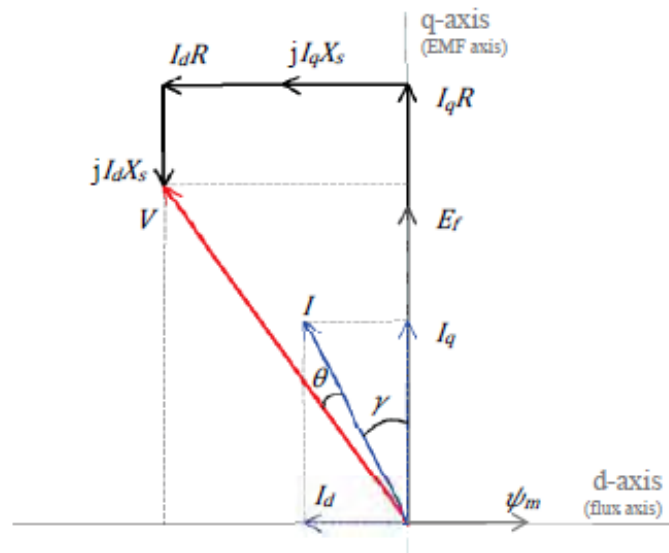
Παρατηρούμε ότι η αναλυτική σχέση της ροπής αποτελείται από 2 όρους:

- **ο πρώτος όρος** αφορά τη ροπή μαγνήτισης (**magnet torque**) και είναι ανάλογος της ροής του μόνιμου μαγνήτη, του αριθμού των πόλων της μηχανής και του ρεύματος του q-άξονα.
- **Ο δεύτερος όρος** αφορά τη ροπή ευθυγράμμισης (**reluctance torque**), και είναι ανάλογος των ρευμάτων του d-q πλαισίου αναφοράς, του αριθμού των πόλων και της διαφοράς $(L_d - L_q)$ των αυτεπαγωγών της μηχανής. Παρατηρούμε επομένως ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ανισοτροπία του δρομέα, η διαφορά $(L_d - L_q)$ αυξάνει σε απόλυτη τιμή, αυξάνοντας έτσι και την ικανότητα παραγωγής ροπής ευθυγράμμισης για τη μηχανή. Σημειώνουμε ότι προκειμένου η ροπή ευθυγράμμισης να προστίθεται στη

ροπή μαγνήτισης, χρειάζεται το ρεύμα i_d να είναι αρνητικό, καθώς στις μηχανές IPM ισχύει γενικά $L_d < L_q$.

4.3.4. Διανυσματικό διάγραμμα μηχανής IPM

Παρουσιάζεται στη συνέχεια (Σχήμα 4.11) το διανυσματικό διάγραμμα που προκύπτει για τη μηχανή IPM, με βάση τις παραπάνω αναλυτικές σχέσεις.



Σχήμα 4.11. Διανυσματικό διάγραμμα μηχανής IPM [26]

Παρατηρούμε τα εξής:

- Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση R_a του ισοδύναμου κυκλώματος, έχει αναλυθεί στο διανυσματικό διάγραμμα σε μια ωμική συνιστώσα R και σε μια επαγωγική X_s .
- **το ρεύμα i_d λαμβάνει** πράγματι **αρνητικές τιμές**. Η φυσική σημασία του αρνητικού πρόσημου είναι ότι τα κύματα ΜΕΔ που παράγει αυτή η συνιστώσα του ρεύματος, αντιτίθενται στο πεδίο του μόνιμου μαγνήτη και τείνουν να το συμπιέσουν.
- Γίνεται εμφανής ο ρόλος της **γωνίας γ** . Σε ταχύτητες μικρότερες της βασικής, η γωνία θα πρέπει να λαμβάνει τιμές κοντά στο μηδέν. Όμως κατά τον έλεγχο εξασθένησης πεδίου, η γωνία γ θα πρέπει να λαμβάνει αρκετά μεγάλες τιμές, έτσι ώστε να απομειώνεται η q-συνιστώσα του ρεύματος στάτη, και να ενισχύεται η επιθυμητή d-συνιστώσα, η οποία τείνει να συμπιέσει το πεδίο μαγνήτη.

4.4. Εξασθένηση πεδίου

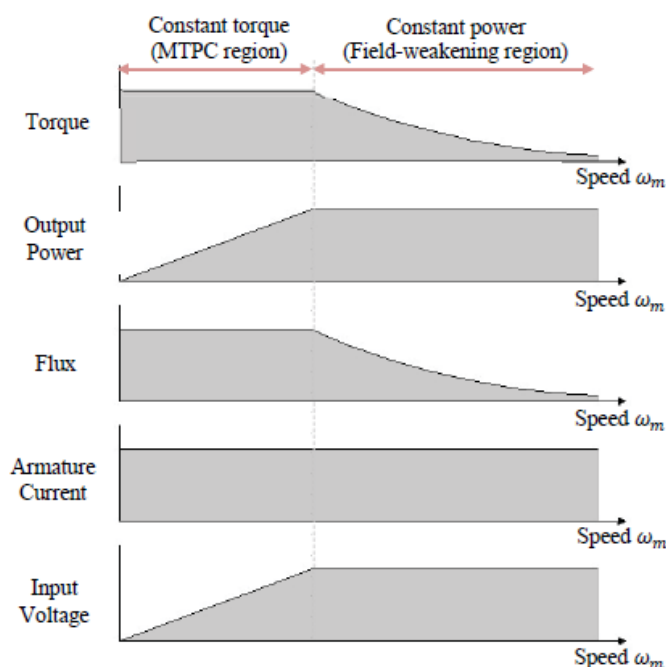
Η εξασθένηση πεδίου (field weakening), είναι μια λειτουργία ελέγχου που επιβάλλεται στη μηχανή σε συνθήκες μέγιστης τάσης τροφοδοσίας (V_{max}) από την έξοδο του inverter, και σε ταχύτητες μεγαλύτερες της ταχύτητας βάσης (base speed).

Ως ταχύτητα βάσης του κινητήρα ορίζουμε την ταχύτητα εκείνη, μέχρι την οποία η μηχανή είναι σε θέση να αποδίδει την ονομαστική της ροπή. Στο σημείο αυτό, η τάση

ακροδεκτών ισούται με τη μέγιστη τάση που μπορεί να παρέχει ο inverter, ενώ το ρεύμα λαμβάνει επίσης την ονομαστική του τιμή [14]. Όσο η μηχανή λειτουργεί σε ταχύτητα χαμηλότερη της βασικής, τόσο η τάση ακροδεκτών των μπαταριών, όσο και η ισχύς εξόδου αυξάνονται γραμμικά, ενώ το ρεύμα στάτη παραμένει πάντα ονομαστικό.

Καθώς η ταχύτητα αυξάνει σε τιμές μεγαλύτερες της βασικής, και δεδομένου ότι επιθυμούμε σταθερή ισχύ εξόδου, είμαστε υποχρεωμένοι να μειώσουμε τη ροπή σύμφωνα με τη σχέση ($P=T \cdot \omega$).

Έτσι η οδήγηση του κινητήρα μπορεί να χωριστεί σε δύο διακριτές περιοχές: την περιοχή σταθερής ροπής (**constant torque region**), που φτάνει μέχρι τη βασική ταχύτητα, και την περιοχή σταθερής ισχύος (**constant power region**) που ξεκινά από τη βασική και φτάνει μέχρι τη μέγιστη ταχύτητα. Οι επιθυμητές χαρακτηριστικές της ροπής, της ισχύος εξόδου, της ροής, της τάσης εισόδου και του ρεύματος οπλισμού συναρτήσει της ταχύτητας του δρομέα, φαίνονται στο σχήμα 4.12:



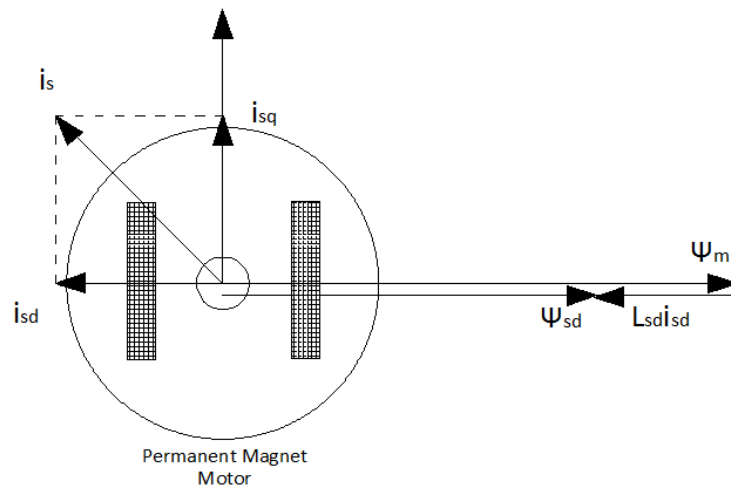
Σχήμα 4.12. Επιθυμητές χαρακτηριστικές βασικών μεγεθών συναρτήσει της ω_m . [18]

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, σε ταχύτητες μεγαλύτερες της βασικής, χρειάζεται να επιβληθεί κατάλληλος έλεγχος για την απομείωση της ροπής.

Σε μια μηχανή με τύλιγμα στο δρομέα, θα μπορούσαμε εύκολα να μειώσουμε το ρεύμα διέγερσης, και να εξασθενήσουμε έτσι το αντίστοιχο πεδίο, και τελικά τη ροπή. Στις μηχανές μονίμων μαγνητών όμως, η διέγερση του δρομέα είναι σταθερή, και το αντίστοιχο πεδίο δεν μπορεί να απομειωθεί από μόνο του, παρά μόνο από κάποιο άλλο πεδίο αντίθετης φοράς.

Το πεδίο αυτό, θα προέρχεται από το τύλιγμα οπλισμού, και θα προκύπτει με την επιβολή ρεύματος στάτη με αρνητική d συνιστώσα έτσι ώστε η μαγνητική ροή στάτη να αντιτίθεται σε αυτή του μόνιμου μαγνήτη.

Η παραπάνω ιδέα, αντικατοπτρίζεται σχηματικά στο σχήμα 4.13 :



Σχήμα 4.13. Διανυσματική αναπαράσταση της λειτουργίας εξασθένησης πεδίου[27]

Η επιβολή του κατάλληλου ρεύματος γίνεται μέσω της αυξομείωσης της **γωνίας γ** που ορίζεται ως η γωνία μεταξύ του διανύσματος του ρεύματος και του q άξονα. Καθώς η γωνία γ πλησιάζει τις 90° , η q συνιστώσα του ρεύματος μειώνεται πολύ και βρισκόμαστε σε κατάσταση βαθιάς εξασθένησης [15]. Η μεταβολή της γωνίας του ρεύματος στο d-q πλαίσιο, μεταφράζεται ουσιαστικά στην εισαγωγή μιας χρονικής καθυστέρησης, στο αντίστοιχο σήμα στο πεδίο του χρόνου.

Ο έλεγχος αυτός μας επιτρέπει να απομειώσουμε τη ροπή και συγκεκριμένα τη ροπή μαγνήτισης της μηχανής (magnet torque). Για το λόγο αυτό, η άλλη συνιστώσα της ροπής, δηλαδή η ροπή εκτυπότητας θα έχει πολύ σημαντική συνεισφορά στη συνολική ροπή κατά τη field weakening λειτουργία.

Τελικά η εξασθένηση πεδίου, επιτρέπει στις IPM μηχανές να συνεχίζουν να αυξάνουν ταχύτητα, διατηρώντας ταυτόχρονα ικανοποιητικά χαρακτηριστικά επίδοσης, παρά τους περιορισμούς που θέτει η τάση τροφοδοσίας.

5. Μεθοδολογία χαρτογράφησης ηλεκτρικών μηχανών

5.1. Επιλογή Γεωμετρίας και υλικών

Όπως έχει γίνει κατανοητό από την εκτενή περιγραφή του προηγούμενου κεφαλαίου, ο τύπος της μηχανής που θα μελετηθεί είναι μία γεωμετρία τετραπολικής σύγχρονης μηχανής με εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες (**IPM-SM**), εφόσον όπως ήδη αναφέρθηκε εξετάζεται η εφαρμογή της σε μικρό όχημα πόλης με απαίτηση να λειτουργεί σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων. Οι σχεδιαστικές επιλογές που μπορούν να γίνουν είναι ως προς την διάταξη των μαγνητών, τη διαμόρφωση του τυλίγματος και τα κατασκευαστικά υλικά.

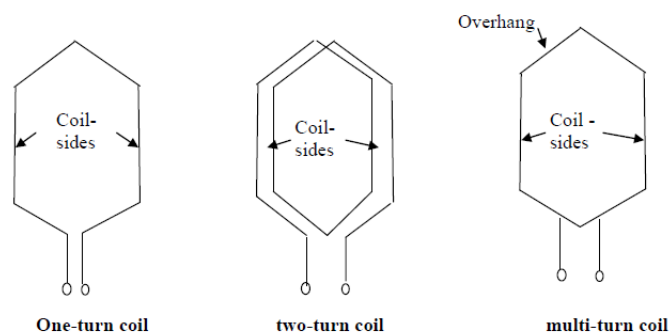
5.1.1. Διατάξεις εσωτερικών μόνιμων μαγνητών

Οι μαγνήτες στο εσωτερικό του δρομέα μπορούν να διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το μέγεθος, τη θέση και την κλίση τους, καθώς και το πλήθος των στρώσεων. Διάφορες τοπολογίες έχουν περιγραφεί εκτενώς στο 4^ο κεφάλαιο.

5.1.2. Τυλίγματα ηλεκτρικών μηχανών [17]

Για να μπορέσει να επιτευχθεί η σαφής περιγραφή ενός τυλίγματος, είναι ανάγκη να καθορίσουμε αρχικά ορισμένες βασικές έννοιες. Ορίζουμε έτσι τα εξής:

- **Αγωγός(conductor):** Ως αγωγός ορίζεται ένα μήκος σύρματος που λαμβάνει ενεργό μέρος στη διαδικασία της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής.
- **Σπείρα(turn):** Κάθε σπείρα αποτελείται ουσιαστικά από δύο αγωγούς (μας ενδιαφέρει το ενεργό μέρος του σύρματος).
- **Πηνίο(coil):** Κάθε πηνίο αποτελείται από οποιονδήποτε αριθμό σπειρών
- **Πλευρές Πηνίου (coil-sides):** Κάθε πηνίο με οποιονδήποτε αριθμό σπειρών έχει πάντα 2 πλευρές πηνίου.



Σχήμα 5.1. Πηνία με μία , δύο και περισσότερες σπείρες. [17]

Για την επιλογή της μορφής του πηνίου υπάρχουν οι παρακάτω επιλογές:

- Συγκεντρωμένο ή διανεμημένο τύλιγμα

- Τυλίγματα πλήρους ή κλασματικού βήματος
- Τυλίγματα απλής ή διπλής στρώσης

Συγκεντρωμένο και διανεμημένο τύλιγμα

Η βασικότερη διάκριση των τυλιγμάτων των ηλεκτρικών μηχανών είναι αυτή ανάμεσα στο συγκεντρωμένο και στο διανεμημένο τύλιγμα.

Το **διανεμημένο** τύλιγμα αποτελεί την πιο καθιερωμένη και ευρέως χρησιμοποιούμενη επιλογή. Η ιδέα του διανεμημένου τυλίγματος προέκυψε από την ανάγκη για παραγωγή ημιτονοειδούς ΗΕΔ ή ΜΕΔ στο διάκενο (χωρική κατανομή), προκειμένου να παραχθεί στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Γνωρίζουμε όμως ότι το κύμα ΜΕΔ ενός πηνίου έχει γενικά τετραγωνική μορφή. Άρα για να επιτευχθεί ημιτονικότητα, είναι αναγκαία η κατάλληλη τοποθέτηση των πηνίων στα αυλάκια ώστε να καταφέρουμε χρησιμοποιώντας ορθογωνικές κατανομές, να προσεγγίσουμε την ημιτονική. Αυτό σημαίνει ότι οι σπείρες κάθε τυλίγματος, κατανέμονται κατάλληλα στα αυλάκια, προκειμένου να σχηματίσουν πηνία πλήρους ή κλασματικού βήματος. Όσο περισσότερες είναι οι **πλευρές πηνίου ανά πόλο και φάση**, τόσο καλύτερα προσεγγίζουμε την ημιτονική κυματομορφή.

Σε αντίθεση με το διανεμημένο, στο **συγκεντρωμένο** τύλιγμα, όλες οι σπείρες τυλίγονται σε σειρά σχηματίζοντας ένα πολύκλωνο πηνίο. Κάθε πηνίο, τυλίγεται γύρω από ένα δόντι κι έτσι κατασκευάζεται το τύλιγμα της μηχανής.

Αν γνωρίζουμε τους πόλους και τις αύλακες μιας μηχανής, ένας γρήγορος τρόπος να διαπιστώσουμε αν το τύλιγμα της είναι συγκεντρωμένο είναι, να εξετάσουμε τον αριθμό αυλάκων ανά πόλο και φάση q . Ο αριθμός αυτός δίνεται από τη βασική σχέση:

$$q = \frac{Q}{m \cdot P} \quad (5.1)$$

Όπου m ο αριθμός των φάσεων (συνήθως $m = 3$).

Εάν ισχύει $q < 1$, τότε το τύλιγμα είναι συγκεντρωμένο.

Το συγκεντρωμένο τύλιγμα αποτελεί μια μοντέρνα τοπολογία, η επιλογή της οποίας γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλής χάρη στα σημαντικά **πλεονεκτήματα** που παρουσιάζει. Τα κυριότερα από αυτά είναι τα εξής:

- Κοντύτερα, μη επικαλυπτόμενα άκρα τυλιγμάτων (μειωμένες απώλειες Cu).
- Εύκολη κατασκευή, λιγότερα πηνία.
- Δεν υπάρχουν αμοιβαίες αυτεπαγωγές μεταξύ φάσεων, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερη ανοχή σε αντίστοιχα σφάλματα.
- Κατάλληλα για λειτουργία field weakening, λόγω υψηλής αυτεπαγωγής ευθέως άξονα L_d .
- Μεγαλύτερες τιμές συντελεστή πληρότητας χαλκού στην αύλακα.

Από την άλλη πλευρά, το **διανεμημένο τύλιγμα**:

- Προσφέρει καλύτερη ημιτονικότητα, άρα μικρότερη αρμονική παραμόρφωση τάσης, και χαμηλότερες παρασιτικές ροπές (cogging torque) και μικρότερη κυμάτωση ροπής.
- Παρέχει περισσότερες κατασκευαστικές επιλογές, όσον αφορά τους δυνατούς συνδυασμούς για τον αριθμό των πόλων και των αυλακιών.
- Συνδυάζεται καλύτερα με ασύγχρονες μηχανές.
- Προσφέρει μεγαλύτερη ΗΕΔ και καλύτερη επίδοση, χάρη στον υψηλότερο συντελεστή τυλίγματος k_w , που επιτυγχάνεται, ειδικά σε μηχανές IPM.

Το συγκεντρωμένο τύλιγμα, είναι δυνατό να υλοποιηθεί μόνο με τους συνδυασμούς πόλων και αυλακιών, ενώ κάθε συνδυασμός αντιστοιχεί σε μία τιμή συντελεστή τυλίγματος που επιτυγχάνεται για κάθε δυνατό συνδυασμό πόλων-αυλάκων. Ικανοποιητικές τιμές συντελεστή τυλίγματος, θεωρούνται αυτές που προσεγγίζουν την μονάδα, και ένα συχνό όριο είναι να απαιτείται $k_w \geq 0.866$, έτσι ώστε να μην προκαλείται μεγάλη απομείωση της θεμελιώδους της επαγόμενης τάσης. Έχει παρατηρηθεί ότι για μια ολιγοπολική μηχανή, η επιλογή συγκεντρωμένου τυλίγματος μας περιορίζει σημαντικά όσον αφορά των αριθμό των αυλάκων που θα επιλέξουμε.

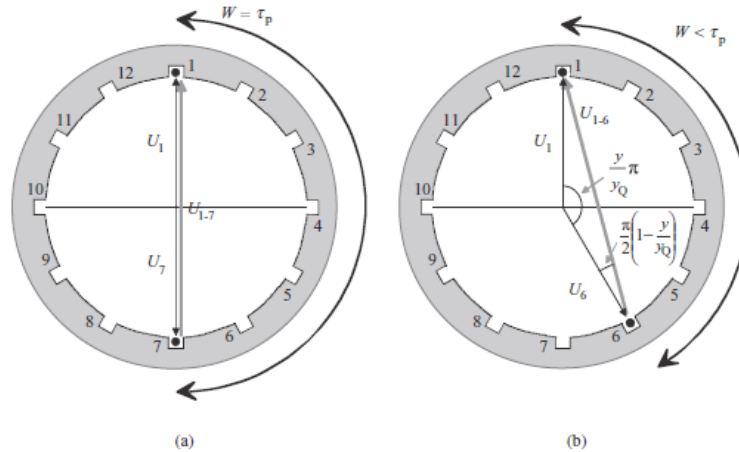
Τύλιγμα πλήρους και κλασματικού βήματος

Ως **πολικό βήμα** ορίζεται η γωνιακή απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πόλων της μηχανής. Ανεξάρτητα από τον αριθμό των πόλων της μηχανής, ένα πολικό βήμα αντιστοιχεί πάντοτε σε 180 ηλεκτρικές μοίρες. Η μηχανική γωνία που αντιστοιχεί σε ένα πολικό βήμα είναι:

$$\rho_p = \frac{360^\circ}{p} \quad (5.2)$$

Ως **βήμα ενός πηνίου (coil-pitch)** ορίζεται η γωνιακή απόσταση μεταξύ των δύο πλευρών του εν λόγω πηνίου (coil sides). Αν η απόσταση αυτή είναι ίση με την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πόλων, τότε λέμε ότι έχουμε τύλιγμα **πλήρους βήματος**. Αντίθετα, αν η απόσταση αυτή είναι μικρότερη, και αποτελεί ένα κλάσμα του πολικού βήματος, τότε έχουμε τύλιγμα **κλασματικού βήματος**.

Για παράδειγμα ένα πηνίο κλασματικού βήματος 5/6, καλύπτει τα πέντε έκτα της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών πόλων της μηχανής. Στο σχήμα 5.2, αναπαρίσταται η ίδια τοπολογία, αρχικά με τύλιγμα πλήρους, και στη συνέχεια με τύλιγμα κλασματικού βήματος:



Σχήμα 5.2. Τοπολογία πλήρους (a) και κλασματικού (b) τυλίγματος. [17]

Γενικότερα, το βήμα ενός πηνίου κλασματικού βήματος, δίνεται σε ηλεκτρικές μοίρες, από την παρακάτω σχέση:

$$\rho = \frac{\theta_m}{\rho_p} \cdot 180^\circ \quad (5.3)$$

Το κλασματικό βήμα αποτελεί μια ιδιαίτερα διαδεδομένη σχεδιαστική επιλογή, καθώς επιτυγχάνει την απομείωση των ανώτερων αρμονικών χώρου που εισάγουν τα τυλίγματα. Η απομείωση αυτή επιτυγχάνεται με τον ακόλουθο τρόπο:

Η χρήση του κλασματικού βήματος διπλής στρώσης σε μια μηχανή, συνεπάγεται ότι σε κάποιες από τις αύλακές της, θα φιλοξενούνται αγωγοί διαφορετικών φάσεων μέσα στην ίδια αύλακα.

Αυτό έχει ως συνέπεια την δημιουργία ρευμάτων, οι γωνίες των οποίων (αν αυτά περιγραφούν ως διανύσματα χώρου) θα λαμβάνουν τιμές μεταξύ των γωνιών των δύο διαφορετικών φάσεων, που συνυπάρχουν στη συγκεκριμένη αύλακα.

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η δημιουργία ρευμάτων (άρα και αντίστοιχων κυμάτων ΜΕΔ) με ενδιάμεσες τιμές φάσης, οι οποίες συμβάλλουν στην ημιτονικότητα της κατανομής.

Εκτός βέβαια από στην απομείωση των αρμονικών, με το κλασματικό βήμα απομειώνεται σε κάποιο βαθμό και η θεμελιώδης συνιστώσα των παραγόμενων κυμάτων ΜΕΔ, γεγονός που έχει δυσμενείς συνέπειες στην ικανότητα ροπής της μηχανής. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιείται κατά τη σχεδίαση ένας συμβιβασμός μεταξύ των αντικρουόμενων κριτηρίων, και μια τυπική απαίτηση προβλέπει οι αρμονικές να περιορίζονται τελικά στο 5% της θεμελιώδους συνιστώσας.

Ειδικά στις **ασύγχρονες** μηχανές όπου το πεδίο του δρομέα δεν προκύπτει από δική μας διέγερση, αλλά ακολουθεί το πεδίο του στάτη, οι ανώτερες αρμονικές στάτη και δρομέα συμβάλλουν δημιουργώντας σοβαρά προβλήματα απωλειών, θορύβου και μηχανικών καταπονήσεων.

Στις **σύγχρονες** μηχανές η επιτακτικότητα για τύλιγμα κλασματικού βήματος δεν είναι τόσο μεγάλη, καθώς φροντίζουμε το τύλιγμα δρομέα να δημιουργεί χωρικές αρμονικές διαφορετικής τάξης από αυτές του στάτη. Τέλος, στις μηχανές **μονίμων μαγνητών**, όπως αυτή της εφαρμογής μας, δεν υπάρχουν τυλίγματα στο δρομέα με αποτέλεσμα να μην τίθεται ζήτημα συμβολής των επιμέρους αρμονικών.

Συντελεστές βήματος και πλάτους τυλίγματος

Η μείωση που προκαλείται στην αντι-ΗΕΔ λόγω κλασματικού βήματος, ποσοτικοποιείται μέσω του **συντελεστή βήματος k_p (pitch factor)**, ο οποίος ορίζεται ως:

$$K_{pn} = \sin\left(\frac{n \cdot \text{βήμα πηνίου}}{2}\right) \quad (5.4)$$

όπου n η τάξη της αρμονικής, για την οποία γίνεται ο υπολογισμός.

Μπορούμε επομένως να διαλέξουμε κατάλληλο κλασματικό βήμα, προκειμένου να επιτύχουμε μοναδιαίο συντελεστή βήματος για την τάξη αρμονικής που μας ενδιαφέρει.

Στη γεωμετρία διανεμημένου τυλίγματος με $q > 1$, πηνία της ίδιας φάσης τοποθετούνται σε διαδοχικές αύλακες. Οι επιμέρους τάσεις προστίθενται διανυσματικά, με αποτέλεσμα η συνολική τάση στα άκρα του τυλίγματος να είναι ελαφρώς απομειωμένη λόγω της γωνίας μεταξύ των διανυσμάτων. Η απομείωση αυτή της επαγόμενης τάσης ποσοτικοποιείται με το **συντελεστή βήματος k_d (distribution factor)**, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

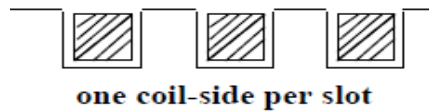
$$K_{dn} = \frac{\sin\left(\frac{nma}{2}\right)}{m \cdot \sin\left(\frac{a}{2}\right)} \quad (5.5)$$

Όπου:

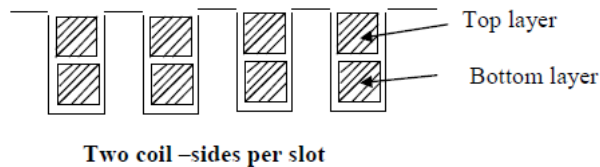
- n η τάξη της αρμονικής
- m ο αριθμός πηνίων ανά φάση
- a το βήμα αύλακος

Τύλιγμα απλής και διπλής στρώσης

Μια βασική διάκριση των τυλιγμάτων ηλεκτρικών μηχανών είναι σε τυλίγματα απλής και διπλής στρώσης. Στα τυλίγματα απλής στρώσης, σε κάθε αύλακα όλος ο χώρος καταλαμβάνεται από **μία μόνο πλευρά πηνίου** (Σχήμα 5.3). Αντίθετα, στα τυλίγματα διπλής στρώσης, μέσα στην ίδια αύλακα υπάρχει άρτιος αριθμός (συνήθως 2) πλευρών πηνίου, που χωρίζουν το αυλάκι σε δύο στρώματα (Σχήμα 5.4).

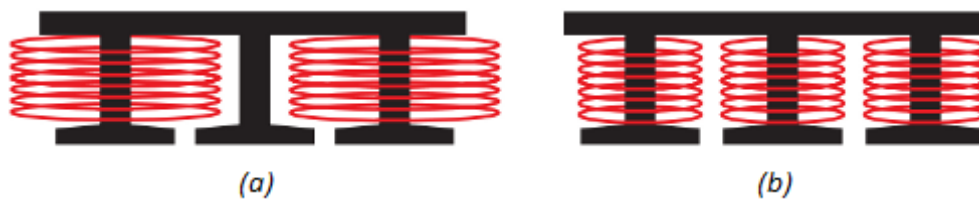


Σχήμα 5.3. Τύλιγμα απλής στρώσης.



Σχήμα 5.4. Τύλιγμα διπλής στρώσης. [17]

Στην περίπτωση του **συγκεντρωμένου** τυλίγματος, το τύλιγμα διπλής στρώσης θα έχει ένα πηνίο τυλιγμένο γύρω από κάθε δόντι (σχήμα 5.5.b), ενώ στο απλής στρώσης (σχήμα 5.5.a), τα πηνία θα τυλίγονται γύρω από εναλλασσόμενα δόντια (“δόντι παρά δόντι”).



Σχήμα 5.5 Συγκεντρωμένο τύλιγμα απλής (a) και διπλής (b) στρώσης.

Το τύλιγμα διπλής στρώσης, το οποίο επιλέγεται και για τη δική μας εφαρμογή, παρουσιάζει ένα πλήθος από πλεονεκτήματα σε σχέση με το τύλιγμα μονής στρώσης, του οποίου η χρήση περιορίζεται σε μικρές μηχανές.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του τυλίγματος διπλής στρώσης είναι τα εξής:

- Επιτρέπει τη δημιουργία διανεμημένου τυλίγματος κλασματικού βήματος.
- Επιτυγχάνεται πιο ημιτονοειδής αντι-ΗΕΔ.
- Ευκολότερη κατασκευή, και χαμηλότερο κόστος πηνίων.
- Πιο κοντά άκρα τυλιγμάτων, άρα μικρότερες σκεδάσεις σε αυτά.

5.1.3. Επιλογή κατασκευαστικών υλικών

Το σώμα του στάτη και του δρομέα κατασκευάζονται από **σιδηρομαγνητικά υλικά**. Η επιλογή των υλικών αυτών οφείλεται κυρίως στην υψηλή μαγνητική διαπερατότητα που εμφανίζει ο σίδηρος ως υλικό. Σε εφαρμογές χαμηλών απαιτήσεων, είναι δυνατό να χρησιμοποιείται συμπαγής σίδηρος για το σώμα της μηχανής. Όμως σε πιο απαιτητικές εφαρμογές, ο σίδηρος τεμαχίζεται, και το σώμα της μηχανής κατασκευάζεται από πολλά λεπτά στρώματα σιδηρομαγνητικής

λαμαρίνας. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται απομείωση των απωλειών δινορρευμάτων που προκαλούνται λόγω επιδερμικού φαινομένου, και αποτελούν βασική συνιστώσα των απωλειών πυρήνα της μηχανής.

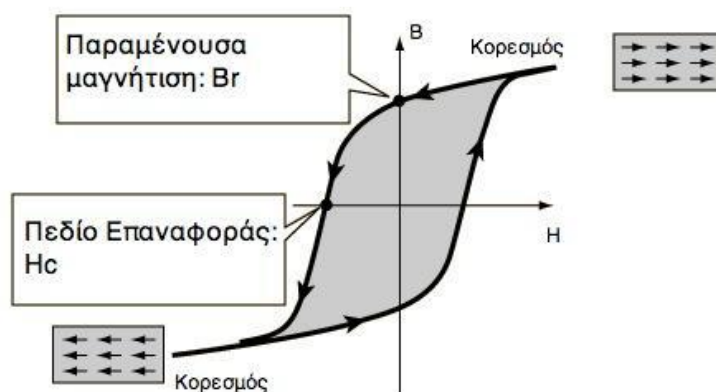
Στη συνέχεια συνοψίζονται οι βασικές ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες, που καθιστούν τα σιδηρομαγνητικά υλικά κατάλληλα για την κατασκευή ηλεκτρικών μηχανών [19]:

- Υψηλή μαγνητική διαπερατότητα, δηλαδή χαμηλή μαγνητική αντίσταση η οποία ελαχιστοποιεί την μείωση της πεπλεγμένης ροής στο μαγνητικό κύκλωμα της μηχανής.
- Υψηλή μαγνητική επαγωγή κορεσμού, έτσι ώστε να διέρχεται όσο το δυνατόν περισσότερη μαγνητική ροή ανά μονάδα όγκου, και να ελαχιστοποιούνται οι διαστάσεις και το βάρος της μηχανής.
- Μικρό εμβαδό βρόχου υστέρησης και σχετικά μεγάλη ηλεκτρική αντίσταση. Οι ιδιότητες αυτές εξασφαλίζουν μειωμένες ειδικές απώλειες, και περιορισμένη αύξηση της θερμοκρασίας. Έτσι διευκολύνεται σημαντικά η ψύξη της μηχανής, και μειώνεται το κατασκευαστικό της κόστος.

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα μαλακά και τα σκληρά. Τα **μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά**, όπως για παράδειγμα ο μαλακός σίδηρος και ο πυριτιούχος χάλυβας, μαγνητίζονται και απομαγνητίζονται εύκολα. Αντίθετα, τα **σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά**, όπως για παράδειγμα τα κράματα Alnico, δεν απομαγνητίζονται εύκολα, και διατηρούν τις μαγνητικές τους ιδιότητες σχηματίζοντας μόνιμους μαγνήτες.

Στα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά, η καμπύλη μαγνήτισης εμφανίζει μεγάλη κλίση, και ο βρόχος υστέρησης έχει μικρό εμβαδό, γεγονός που συνεπάγεται μειωμένες απώλειες υστέρησης. Οι μειωμένες απώλειες υστέρησης, σε συνδυασμό με την μεγάλη σχετική του διαπερατότητα, καθιστούν τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά κατάλληλα για χρήση σε μετασχηματιστές ισχύος και ηλεκτρικές μηχανές.

Στο σχήμα 5.6 φαίνεται ο βρόχος υστέρησης ενός σιδηρομαγνητικού υλικού:



Σχήμα 5.6. Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού.[18]

Η μαγνητική επαγωγή στο σημείο όπου το πεδίο μηδενίζεται, ονομάζεται **παραμένουσα μαγνήτιση B_r** .

Στα σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μονίμων μαγνητών, διαθέτουν γενικά μεγάλες τιμές παραμένουσας μαγνήτισης B_r . Μεγάλες τιμές είναι επιθυμητές και για το μαγνητικό **πεδίο επαναφοράς H_c** , που αντιστοιχεί στην ένταση του μαγνητικού πεδίου που απαιτείται για την απομαγνήτιση του υλικού.

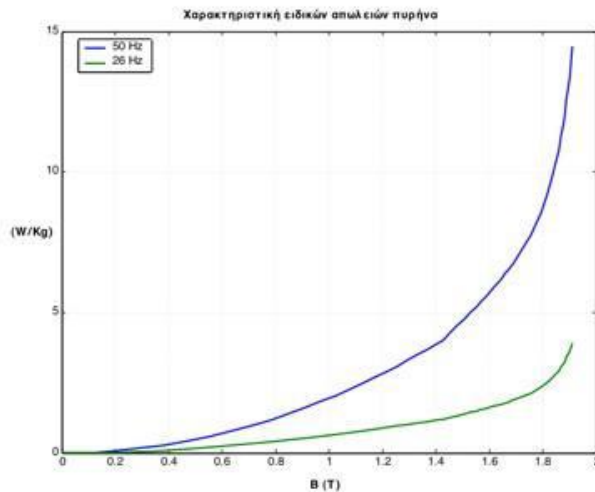
Προσμίξεις πυριτίου χρησιμοποιούνται συχνά, ως προσθήκη στο συμπαγή σίδηρο, προκειμένου να βελτιώσουν ορισμένες ιδιότητες του υλικού. Το πυρίτιο, ως ημιαγωγός, αυξάνει την ηλεκτρική αντίσταση του σιδήρου, ενώ παράλληλα μειώνει τη μαγνητική του αντίσταση και βελτιώνει τη σταθερότητα των μαγνητικών ιδιοτήτων στο χρόνο. Παρ' όλα αυτά, η αύξηση της περιεκτικότητας σε πυρίτιο, μπορεί να μειώσει την αντοχή και τη στιβαρότητα του υλικού. Επιπλέον, οι θερμικές και μηχανικές διεργασίες που απαιτούνται για την κατασκευή του κράματος σιδήρου-πυριτίου, αυξάνουν το κατασκευαστικό κόστος της μηχανής.

Σε εφαρμογές εναλλασσόμενου ρεύματος, ο συμπαγής σίδηρος αντικαθίσταται από λεπτή σιδηρομαγνητική λαμαρίνα, για τον περιορισμό των δινορρευμάτων που επάγονται από το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο.

Η κατάτμηση του σιδήρου, σε ελάσματα, τα οποία μάλιστα καλύπτονται από μονωτικό υλικό, μειώνει την αγωγή διαδρομή των δινορρευμάτων, ενώ ταυτόχρονα προστατεύουν και το σίδηρο από την οξείδωση.

Η σιδηρομαγνητική λαμαρίνα διακρίνεται σε δύο βασικούς τύπους: με κατευθυνόμενους κόκκους ή χωρίς. Τα **ελάσματα χωρίς κατευθυνόμενους κόκκους** είναι ιστροπικά και χρησιμοποιούνται κυρίως στις ηλεκτρικές μηχανές. Όσο πιο λεπτή είναι η μαγνητική λαμαρίνα, τόσο χαμηλότερες απώλειες δινορρευμάτων αναμένεται να εμφανίσει. Έτσι, το πάχος της μαγνητικής λαμαρίνας μειώνεται διαρκώς με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, κα μπορεί να φτάσει πολύ χαμηλές τιμές (0.35mm). Τυπικές τιμές ειδικών απωλειών σε μαγνητική επαγωγή 1.5 T και συχνότητα πεδίου 50 Hz, είναι 3 W/Kg και 4 W/Kg για ελάσματα πάχους 0.35 mm και 0.5 mm αντίστοιχα. Αντιθέτως, τα **ελάσματα με κατευθυνόμενους κόκκους** παρουσιάζουν μία κατεύθυνση στην οποία οι μαγνητικές ιδιότητες είναι βελτιωμένες και χρησιμοποιούνται κυρίως σε μετασχηματιστές ισχύος, καθώς και σε εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων. Στην περίπτωση αυτή, οι απώλειες μειώνονται ακόμη περισσότερο, με μια τυπική τιμή απωλειών να είναι 1 W/Kg σε 1.5 T, 50 Hz, για έλασμα πάχους 0.35 mm.

Στο σχήμα 5.7 φαίνεται μια τυπική καμπύλη ειδικών απωλειών, που δείχνει πως μεταβάλλονται οι απώλειες (W/kg), συναρτήσει της μαγνητικής επαγωγής, για μια σιδηρομαγνητική λαμαρίνα χωρίς κατευθυνόμενους κόκκους.



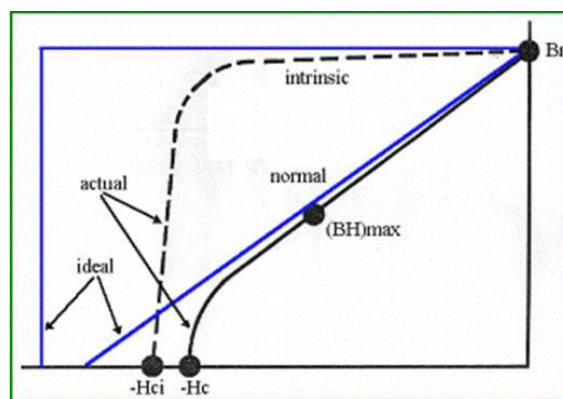
Σχήμα 5.7. Τυπική καμπύλη ειδικών απωλειών σιδηρομαγνητικού υλικού[18]

Το παραπάνω γράφημα αναφέρεται σε μια κοινή λαμαρίνα χαμηλού κόστους. Παρατηρούμε ότι το γόνατο κορεσμού εμφανίζεται σε τιμές μαγνητικής επαγωγής κοντά στο 1.5T, και οι απώλειες στο σημείο αυτό είναι περί τα 5 W/kg για συχνότητες 50Hz. Παρατηρείται επίσης σημαντική μείωση των απωλειών, σε μικρότερες ηλεκτρικές συχνότητες.

Στην εφαρμογή που εξετάζουμε χρησιμοποιούμε τη σιδηρομαγνητική λαμαρίνα M235 – 35A της εταιρίας Thyssen Krupp Steel, υλικό κατάλληλο για εφαρμογές υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων όπως οι ηλεκτρικές μηχανές και οι κινητήρες ειδικού σκοπού.

Το πιο σημαντικό υλικό για την κατασκευή μιας ηλεκτρικής μηχανής παραμένουν οι μόνιμοι μαγνήτες, καθώς είναι σπάνιο και περιορισμένο στη γη και συνεπώς αυξάνει το κόστος υλοποίησης σημαντικά. Λειτουργικά, αντικαθιστούν συνήθως το τύλιγμα πεδίου που τροφοδοτείται με DC ρεύμα, στο δρομέα των σύγχρονων μηχανών.

Οι μόνιμοι μαγνήτες, αποτελούνται από σκληρά σιδηρομαγνητικά υλικά, τα οποία τείνουν να διατηρούν τη μαγνήτισή τους απουσία μαγνητικού πεδίου, ή ακόμη και υπό την παρουσία αντίθετου, ασθενούς μαγνητικού πεδίου. Στο σχήμα 5.8 φαίνεται μια τυπική καμπύλη απομαγνήτισης ενός μόνιμου μαγνήτη:



Σχήμα 5.8. Τυπική καμπύλη απομαγνήτισης μόνιμου μαγνήτη[18]

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το πεδίο επαναφοράς H_c , αντιστοιχεί σε εκείνη την τιμή ενός εξωτερικά επιβαλλόμενου, αντίθετου μαγνητικού πεδίου που μπορεί να απομαγνητίσει το υλικό. Για το λόγο αυτό, πρέπει να αποφεύγεται η λειτουργία κοντά στο γόνατο της παραπάνω καμπύλης, καθώς αντιστοιχεί σε λειτουργικές καταστάσεις όπου ο μαγνήτης τείνει να απομαγνητιστεί. Όσον αφορά το **σημείο $(BH)_{max}$** , του σχήματος, αυτό αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή ενέργειας του μαγνήτη. Το ακριβές σημείο στο οποίο λειτουργεί ο μαγνήτης, επί της καμπύλης απομαγνήτισης, εξαρτάται από το εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο, και τη χωρική γεωμετρία. Πρέπει επομένως οι παράμετροι αυτές να λαμβάνονται υπόψιν κατά τη σχεδίαση, προκειμένου ο μαγνήτης να λειτουργεί κοντά στο σημείο $(BH)_{max}$.

Στην εφαρμογή που εξετάζουμε θα χρησιμοποιηθούν μαγνήτες κράματος Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου (NdFeB), καθώς:

- προσφέρουν την μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας
- είναι ανθεκτικοί σε φαινόμενα απομαγνήτισης

Τα κυριότερα μειονεκτήματα αυτού του τύπου μαγνητών , είναι ότι:

- δεν είναι ιδιαίτερα ανθεκτικοί σε εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών
- το Νεοδύμιο αποτελεί σπάνια γαία (Rare earth element) , και η προμήθεια μαγνητών Νεοδυμίου μπορεί να γίνει μόνο από πολύ συγκεκριμένες χώρες (κυρίως την Κίνα)

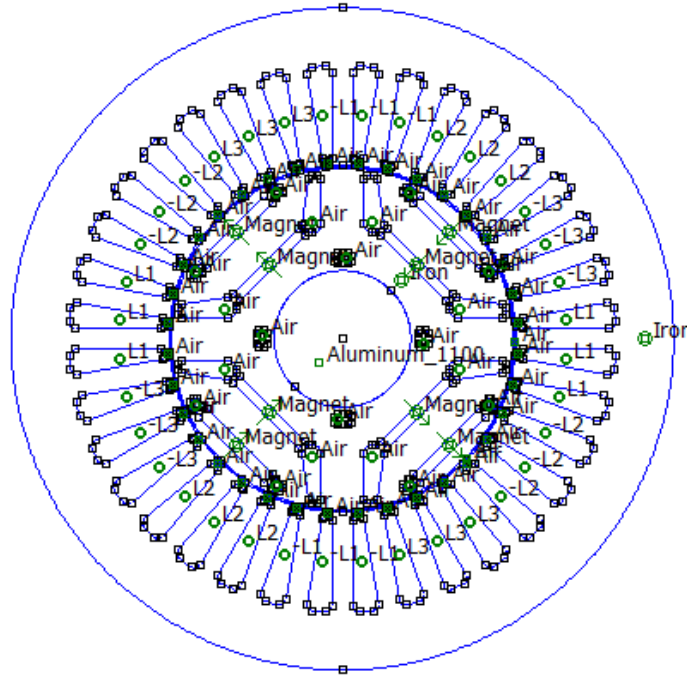
5.1.4. Γεωμετρία της υπό μελέτη Σύγχρονης Μηχανής Εσωτερικών μόνιμων μαγνητών

Για το όχημα που εξετάζεται η βέλτιστη λειτουργία του στον ευρωπαϊκό κύκλο οδήγησης η ταχύτητα βάσης για τη μηχανή ορίζεται τυπικά στα 50km/h, δηλαδή 2000 Σ.Α.Λ. όπου με βάση τη μοντελοποίηση που έχει γίνει απαιτεί ονομαστική ροπή 100 Nm και συνεπώς ονομαστική ισχύ 21 kW. Για το σκοπό της μετέπειτα μελέτης χρησιμοποιείται μία γεωμετρία που έχει διαστασιολογηθεί και σχεδιαστεί με βάση αυτές τις προδιαγραφές και περιέχει διπλή στρώση οριζόντιων μαγνητών ανά πόλο και διανεμημένο τύλιγμα με 3 αύλακες ανά πόλο και φάση (συνολικά 36 αύλακες), μονής στρώσης κλασματικού βήματος, το οποίο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα όπου χρειάζεται δύο επαναλήψεις για να ολοκληρώσει το συνολικό τύλιγμα της μηχανής [18].



Σχήμα 5.9. Διανεμημένο τύλιγμα με 3 αύλακες ανά πόλο και φάση [18]

Στο σχήμα 5.10 φαίνεται η βελτιστοποιημένη εκδοχή της γεωμετρίας υπό μελέτη που στη συνέχεια θα παρουσιαστεί η μεθοδολογία χαρτογράφησης.



Σχήμα 5.10. Γεωμετρία υπό μελέτη[18]

5.2. Μεθοδολογία χαρτογράφησης λειτουργικής κατάστασης ηλεκτρικών μηχανών σε πολλαπλά σημεία λειτουργίας

5.2.1. Η μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM) και το λογισμικό FEMM

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων, που δε μπορούν να επιλυθούν με ακρίβεια με τη χρήση αναλυτικών μεθόδων. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε προβλήματα πολύπλοκων γεωμετριών που περιλαμβάνουν μη γραμμικά υλικά, όπως για παράδειγμα στη σχεδίαση ηλεκτρικών μηχανών. Η ιδέα είναι βασισμένη στο διαχωρισμό μιας περιοχής σε μικρότερες υποπεριοχές, απλούστερης γεωμετρίας, που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Μέσα σε κάθε στοιχείο χρησιμοποιείται μια πολυωνυμική εξίσωση για την προσέγγιση της λύσης. Με άλλα λόγια, η διαδικασία της διακριτοποίησης μετατρέπει τη διαφορική εξίσωση μερικών παραγώγων σε ένα μεγάλο αριθμό μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων. Επομένως, αν η αρχική γεωμετρία χωρισθεί σε αρκετά μεγάλο αριθμό υποπεριοχών, το υπολογιζόμενο μέγεθος μπορεί να προσεγγισθεί με την επιθυμητή ακρίβεια. Η διακριτοποίηση του χώρου πραγματοποιείται συνήθως με τρίγωνα στην περίπτωση δισδιάστατης γεωμετρίας, ή με τετράεδρα στην περίπτωση τρισδιάστατης γεωμετρίας, αντίστοιχα. Με αυτό τον τρόπο ένα συνεχές φυσικό πρόβλημα μετατρέπεται σε διακριτό, στο οποίο οι άγνωστοι απαρτίζονται από τις τιμές του πεδίου στις κορυφές των διαδοχικών τριγώνων ή τετραέδρων. Το πρόβλημα που προκύπτει με τη χρήση FEM είναι ένα αλγεβρικό σύστημα εξισώσεων όπου οι τιμές του πεδίου στο εσωτερικό των

στοιχείων (τρίγωνα ή τετράεδρα) μπορούν να υπολογισθούν χρησιμοποιώντας τις τιμές των αντίστοιχων κορυφών τους.

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων έχει μελετηθεί από το 1940, όμως η πρώτη της εφαρμογή έγινε 10 χρόνια αργότερα στην αεροναυπηγική. Τα επόμενα χρόνια υιοθετήθηκε από πολλούς κλάδους της επιστήμης με σκοπό να επιλυθούν πολλά φυσικά και μαθηματικά προβλήματα. Σήμερα, είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την επίλυση πεδιακών προβλημάτων.

Στην μελέτη προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης της επίδοσης ηλεκτρομαγνητικών διατάξεων σε σημεία που οι κλασικές αναλυτικές μέθοδοι αποτυγχάνουν ενώ δίνει τη δυνατότητα για πιο εκτενή και προσεκτική τοπική ανάλυση σε φαινόμενα όπως ο κορεσμός. Το μειονεκτήματα της είναι ότι τα αποτελέσματα είναι προσεγγιστικά και σε περίπτωση μη ορθής εφαρμογής, ανακριβή καθώς και ο αυξημένος υπολογιστικός χρόνος σε πολύπλοκες και μεγάλες διατάξεις. Παρόλα αυτά, με την εκμετάλλευση της συμμετρίας και της περιοδικότητας βελτιώνεται η ανάλυση και μειώνεται ο υπολογιστικός χρόνος. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων επηρεάζεται από τις διαστάσεις και την ομοιογένεια των πεπερασμένων στοιχείων, ενώ βελτιώνεται όσο μικραίνει το μέγεθος κάθε πεπερασμένου στοιχείου, κάτι που όμως επιβαρύνει τον υπολογιστικό χρόνο. [21]

Τα προγραμματιστικά πακέτα, που χρησιμοποιούν τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, είναι ικανά να επιλύσουν μαγνητικά προβλήματα με μεγάλη ακρίβεια. Η σχεδίαση και ανάλυση ενός τέτοιου προβλήματος πραγματοποιείται σε τρία στάδια: Pre-processing, solving και post-processing. Κατά τη διαδικασία του pre-processing δημιουργείται το επιθυμητό προς ανάλυση μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Σχεδιάζεται παραμετροποιημένα η επιθυμητή γεωμετρία και αποδίδονται οι ιδιότητες κάθε υλικού στις διάφορες περιοχές του μοντέλου. Στη συνέχεια, ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες και η διέγερση του μοντέλου. Τέλος, ορίζεται το επιθυμητό πλήθος πεπερασμένων στοιχείων και προκύπτει το πλέγμα. Κατά τη διαδικασία της επίλυσης, εφαρμόζεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής του πλέγματος, όπου μία εκτίμηση σφάλματος παράγεται από τη λύση, το πλέγμα καθορίζεται ξανά και η λύση επαναλαμβάνεται. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου επιτευχθεί το απαιτούμενο επίπεδο ακρίβειας. Κατά το post-processing, γίνεται η πεδιακή ανάλυση που παρέχει την κατανομή του μαγνητικού πεδίου και μέσω αυτής, με κατάλληλη επεξεργασία μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια τα περισσότερα μεγέθη που αφορούν την επίδοση και την απόδοση μιας ηλεκτρομαγνητικής διάταξης.

Το ελεύθερο λογισμικό femm ανήκει στην κατηγορία αυτών των προγραμματιστικών πακέτων και επιλύει δισδιάστατα και μαγνητοστατικά προβλήματα, όπως επίσης προβλήματα όπου τα μαγνητικά μεγέθη μεταβάλλονται με μια συγκεκριμένη συχνότητα. Η σχεδίαση στο Femm μπορεί να πραγματοποιηθεί αρκετά εύκολα, χρησιμοποιώντας το ποντίκι στο γραφικό περιβάλλον του ίδιου του προγράμματος. Όμως η απαίτηση για παραμετροποιημένη σχεδίαση, στην οποία οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά της μηχανής, θα είναι μεταβλητά και οριζόμενα από εμάς, καθιστά αναγκαία την χρήση κώδικα για τη σχεδίαση της μηχανής. Ο **κώδικας** αυτός γράφεται

σε περιβάλλον **Matlab**, και χρησιμοποιεί ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας με το πρόγραμμα Femm, το οποίο περιλαμβάνει ένα σύνολο εξειδικευμένων εντολών που χρησιμοποιούνται στο Femm, ενώ ταυτόχρονα αναλαμβάνει την επικοινωνία των δύο λογισμικών.

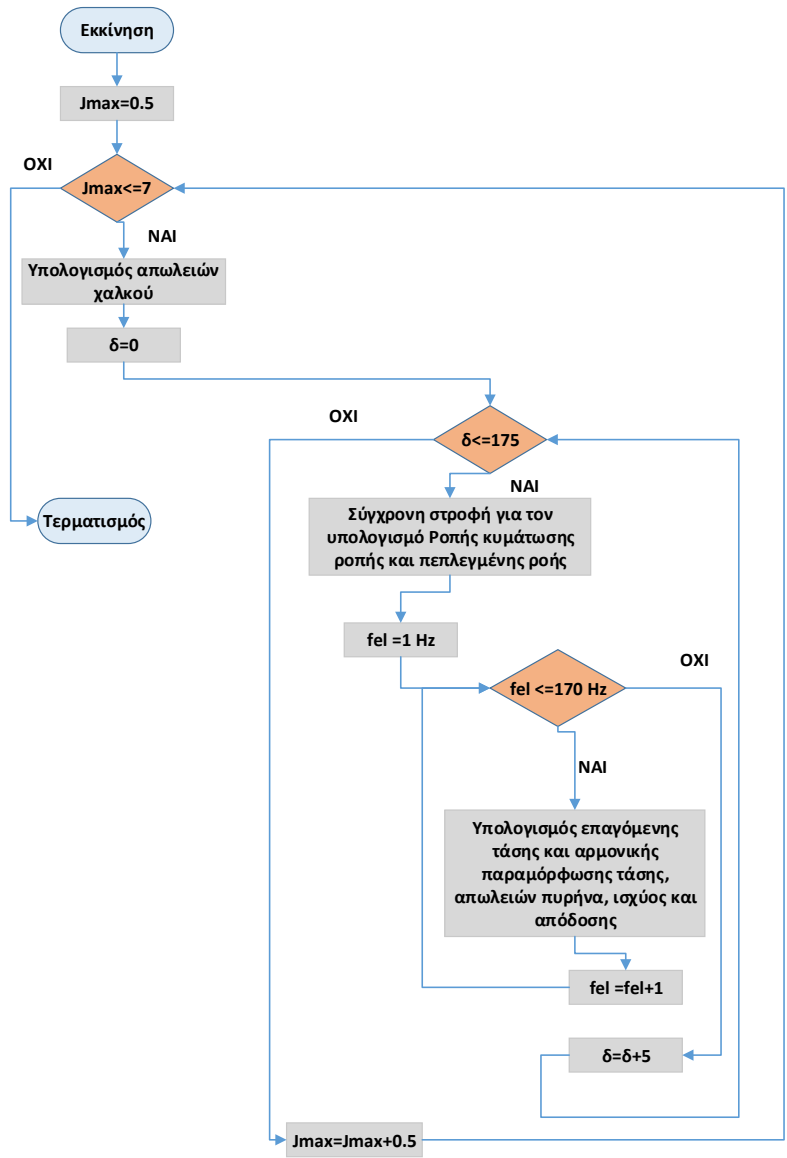
Το πρόγραμμα Femm αποτελείται από δύο βασικά περιβάλλοντα εργασίας:

- Το περιβάλλον **προεπεξεργασίας (Pre-Processing)**. Πρόκειται για το περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιείται η σχεδίαση της γεωμετρίας της μηχανής. Η σχεδίαση γίνεται χρησιμοποιώντας πολύ απλά γραφικά εργαλεία όπως κόμβοι (nodes), ευθείες (segments) και καμπύλες arcs). Επιπλέον στο στάδιο του Pre-Processing, ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες της γεωμετρίας, καθώς επίσης και τα κατάλληλα υλικά για κάθε περιοχή. Τελευταίο στάδιο της προεπεξεργασίας, είναι η δημιουργία πλέγματος, με κατάλληλο αριθμό κόμβων, προκειμένου να ακολουθήσει η τελική επίλυση του προβλήματος.
- Το **περιβάλλον μετεπεξεργασίας (Post-Processing)**. Πρόκειται για το περιβάλλον στο οποίο η σχεδίαση της προεπεξεργασίας, έχει επιλυθεί ως πρόβλημα συνοριακών συνθηκών για τον υπολογισμό του μαγνητοστατικού δυναμικού, και χρησιμοποιείται ως βάση, για τον υπολογισμό βασικών μεγεθών. Τα σημαντικότερα μεγέθη που υπολογίζονται από το Post-Processing είναι η μαγνητική επαγωγή σε κάθε σημείο της μηχανής, καθώς επίσης και η ροπή στο διάκενο, χρησιμοποιώντας ολοκληρωτικές σχέσεις του τανυστή του Maxwell. Επιπλέον, το περιβάλλον μετεπεξεργασίας επιτρέπει τον υπολογισμό της επαγόμενης τάσης, των απωλειών χαλκού και πυρήνα της μηχανής, των αυτεπαγωγών d-q άξονα καθώς και την εύρεση της γωνίας μέγιστης ροπής και γενικότερα μας δίνει τη δυνατότητα να ξεφύγουμε από τις αναλυτικές σχέσεις μιας ηλεκτρικής μηχανής και να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς λαμβάνοντας υπόψιν τις μη γραμμικότητες του εκάστοτε μοντέλου προς μελέτη.

5.2.2. Αλγόριθμος χαρτογράφησης λειτουργίας σύγχρονου κινητήρα μονίμων μαγνητών και αποτελέσματα προσομοίωσης

Για την χαρτογράφηση μιας ηλεκτρικής μηχανής που έχει σχεδιαστεί με τη βοήθεια των λογισμικών Femm-Matlab και επειδή το Femm λύνει το κάθε πρόβλημα μαγνητοστατικά και όχι χρονομεταβλητά, η σύγχρονη λειτουργία της μηχανής προσομοιώνεται μέσω σύγχρονης μετατόπισης της θέσης του δρομέα και των ρευμάτων στο στάτη. Στην συνέχεια η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για διάφορες ηλεκτρικές φορτίσεις και για διάφορες γωνίες ρευμάτων, έτσι ώστε να επιτευχθεί η λεπτομερής χαρτογράφηση της λειτουργίας του κινητήρα για διάφορες φορτίσεις. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε φόρτιση, μεταβάλλεται η γωνία του ρεύματος του στάτη με κάποιο βήμα ικανό να δώσει αρκετή λεπτομέρεια στα αποτελέσματα και μέσα από εμφολευμένους βρόγχους που προσομοιώνεται κάθε λειτουργική κατάσταση στη Matlab, καλούμε το μοντέλο στο Post-processing toolbox του Femm και κάνουμε τους κατάλληλους υπολογισμούς για τον προσδιορισμό της

πεπλεγμένης ροής, της ροπής, της κυμάτωσης ροπής και άλλων μεγεθών χρήσιμων για την επιλογή των βέλτιστων λειτουργικών καταστάσεων. Στο σχήμα 5.11 φαίνονται τα βήματα της μετεπεξεργασίας του μοντέλου ώστε να εξαγάγουμε μία πλήρη χαρτογράφηση της σχεδιασμένης μηχανής. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή για κάθε υπολογισμό και τα αποτελέσματα της χαρτογράφησης.



Σχήμα 5.11. Σχηματικό διάγραμμα αλγορίθμου χαρτογράφησης

5.2.2.1. Απώλειες Χαλκού

Πρόκειται για τις ωμικές απώλειες που προκαλούνται απ' την διέλευση ρεύματος απ' τα πηνία της μηχανής. Όπως προκύπτει από το νόμο του Ohm, οι απώλειες χαλκού είναι ευθέως ανάλογες της συνολικής αντίστασης ανά φάση και ανάλογες του τετραγώνου της ενεργού τιμής του ρεύματος που διαρρέει τα πηνία κάθε φάσης. Για μια τριφασική μηχανή, οι απώλειες δίνονται από τη σχέση:

$$P_{cu} = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad (5.6)$$

Η ύπαρξη αρμονικών συνιστωσών στο φασικό ρεύμα προκαλεί επιπλέον απώλειες χαλκού ανώτερης τάξης. Είναι επομένως σημαντικό, η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος να είναι περιορισμένη, ώστε να περιορίζονται και οι αντίστοιχες απώλειες χαλκού.

Για να μοντελοποιήσουμε τις απώλειες χαλκού σε μία μηχανή πρέπει πρώτα να προσδιοριστεί η ωμική αντίσταση ανά φάση και έπειτα το ρεύμα ανά φάση.

Υπολογισμός Ωμικής Αντίστασης μιας Φάσης

Για τον υπολογισμό αυτό απαιτείται πρώτα να ορίσουμε τα παρακάτω μεγέθη:

- p : ο αριθμός πόλων κινητήρα
- N_{slot} : ο αριθμός σπειρών ανά πηνίο
- L : το ενεργό μήκος της μηχανής
- S_{slot} : το εμβαδόν αύλακας στάτη
- ff : ο συντελεστής πληρότητας τυλίγματος

Ως συντελεστής πληρότητας ff ορίζεται ο λόγος του εμβαδού της αύλακας που θα απαιτούνταν, εάν το τύλιγμα αν ήταν ιδανικά συμπιεσμένο (χωρίς κενά και μονώσεις) προς το εμβαδόν της αύλακας, που απαιτείται για το ίδιο τύλιγμα στην πράξη.

Ο συντελεστής τυλίγματος, λαμβάνει τυπικά τιμές μεταξύ 0.4 έως 0.65, ανάλογα με το μέγεθος της μηχανής, τον τύπο του τυλίγματος (συγκεντρωμένο-διανεμημένο, απλής-διπλής στρώσης), και τα διαθέσιμα μέσα περιέλιξης (περιελίτρια μηχανή κλπ.).

Για την εφαρμογή μας ορίστηκε συντελεστής πληρότητας 0.55 που αποτελεί μια καλή τιμή για συμβατικές τεχνικές περιέλιξης. Το εμβαδό αύλακος, υπολογίζεται εύκολα με τη χρήση της εντολής `mo_blockintegral(5)`, στη μετεπεξεργασία του Femm. Με δεδομένες αυτές τις δύο ποσότητες, προκύπτει η επιφάνεια της αύλακας που καταλαμβάνεται από χαλκό ως εξής:

$$S_{cu} = ff \cdot S_{slot} \quad (5.7)$$

Εάν το εμβαδό αυτό διαιρεθεί, με τον αριθμό των σπειρών ανά πηνίο N , θα προκύψει η διατομή του κλώνου χαλκού που θα χρησιμοποιηθεί στο τύλιγμα.

$$S_{wire} = \frac{S_{cu}}{N_{slot}} \quad (5.8)$$

Υπολογίσαμε έτσι τη διατομή του αγωγού, στοιχείο απαραίτητο, για την υπολογισμό της ωμικής αντίστασης. Απομένει να υπολογίσουμε το μήκος του τυλίγματος. Ορίζουμε ως μέσο μήκος μιας σπείρας ενός πηνίου, το μήκος που αν πολλαπλασιαστεί με τον αριθμό των σπειρών, δίνει το συνολικό μήκος του πηνίου. Το μέσο μήκος σπείρας ισούται όπως είναι λογικό, με το διπλάσιο του ενεργού μήκους της μηχανής L , συν το διπλάσιο του μήκους κεφαλής τυλίγματος L_{ends} . Το

μήκος κεφαλής τυλίγματος υπολογίζεται με τη σειρά του, ως συνάρτηση των πόλων της μηχανής, και της μέσης ακτίνας αύλακος, ως εξής:

$$L_{ends} = \frac{2\pi}{p} * R_{slot_{avg}} \quad (5.9)$$

Στη συνέχεια ορίζεται ένας ακόμη συντελεστής, που αφορά τη χωροταξική διαμόρφωση του τυλίγματος. Κάθε πηνίο, διαμορφώνεται σχηματικά με κατάλληλο τρόπο, προκειμένου να επιτρέψει στο επόμενο πηνίο να τοποθετηθεί ακριβώς με τον ίδιο τρόπο και να προκύψει ένα ομοιόμορφο τύλιγμα. Η περαιτέρω αύξηση του μήκους κεφαλής που προκαλείται έτσι, εκφράζεται από το συντελεστή πλέξης olf , ο οποίος λαμβάνει τυπική τιμή $olf = 1.2$, για τύλιγμα πλήρους βήματος.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το μέσο μήκος σπείρας θα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$L_{speiras} = (2 * olf * L_{ends} + 2 * L) \quad (5.10)$$

Αν συμβολίσουμε με N_c τον αριθμό των σπειρών σε κάθε φάση του τυλίγματος, προκύπτει τελικά, το συνολικό μήκος του τυλίγματος μιας φάσης, ως εξής :

$$L_{W_{phase}} = N_c * L_{speiras} \quad (5.11)$$

Πλέον, γνωρίζουμε όλες τις απαιτούμενες παραμέτρους για τον υπολογισμό της ωμικής αντίστασης μιας φάσης, η οποία υπολογίζεται ως συνάρτηση της διατομής αγωγού (S_{wire}) και του συνολικού μήκους του τυλίγματος ($L_{W_{phase}}$), από τη γνωστή σχέση:

$$R_{phase} = \rho_{cu} * \frac{L_{W_{phase}}}{S_{wire}} \quad (5.12)$$

Όπου ρ_{cu} η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του χαλκού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 20°C ($\rho_{cu} = 1.955 * 10^{-8} \Omega * \text{m}$).

Υπολογισμός απωλειών χαλκού

Το ονομαστικό ρεύμα φάσης του στάτη, δεν ορίζεται άμεσα στο Femm, αλλά προκύπτει αν πολλαπλασιάσουμε την πυκνότητα ρεύματος (RMS τιμή), με το εμβαδό αύλακος.

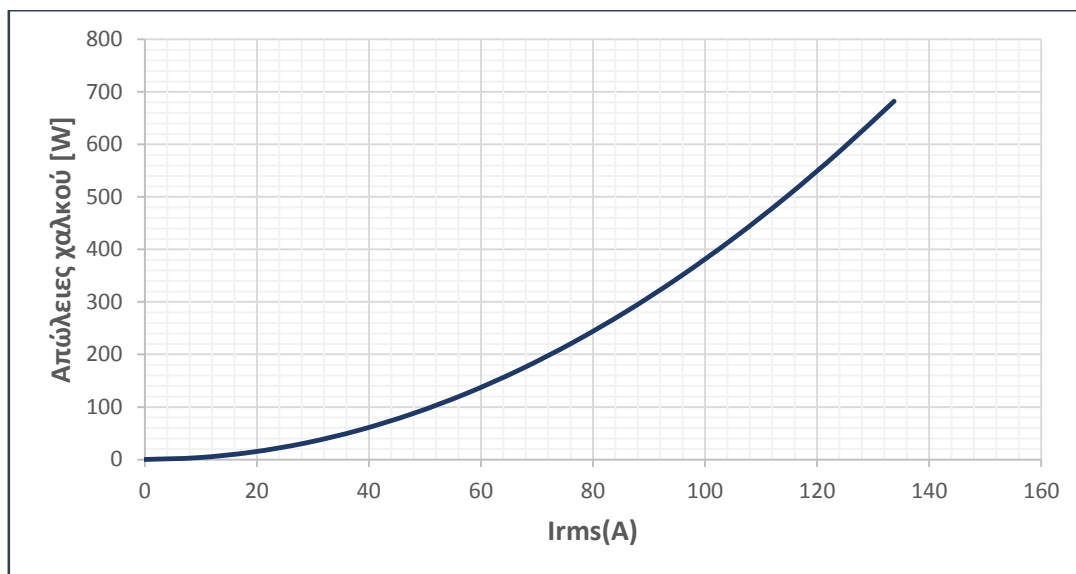
Η RMS τιμή του ρεύματος μιας φάσης, υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{rms} = J * \frac{S_{wire}}{\sqrt{2}} \quad (5.13)$$

Τελικά οι απώλειες χαλκού υπολογίζονται από τη γνωστή σχέση:

$$P_{cu} = 3 * R_{phase} * I_{rms}^2 \quad (5.14)$$

Κάνοντας τους υπολογισμούς για τις δεδομένες προδιαγραφές του κινητήρα υπό εξέταση καταλήγουμε στο παρακάτω διάγραμμα για τις απώλειες πυρήνα υπό διάφορες τιμές φόρτισης.



Σχήμα 5.12. Απώλειες χαλκού σε διάφορες τιμές φόρτισης

5.2.2.2. Απώλειες πυρήνα

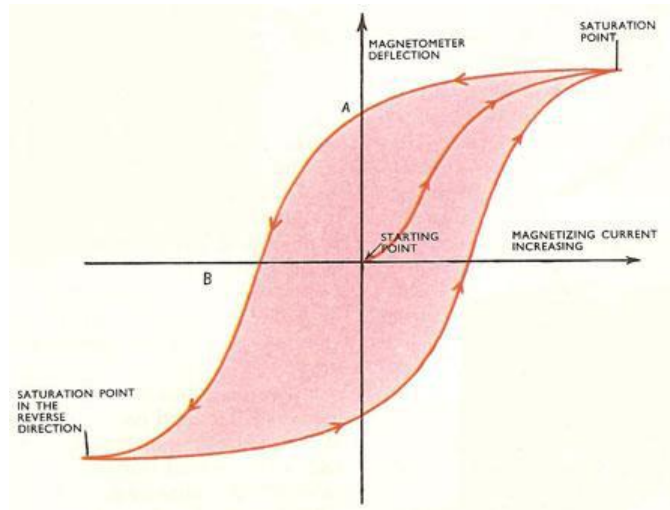
Όταν ένα σιδηρομαγνητικό υλικό βρίσκεται μέσα σε χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, εμφανίζει τις λεγόμενες απώλειες πυρήνα υπό μορφή θερμότητας. Υπάρχουν δύο βασικοί μηχανισμοί μετατροπής της ενέργειας του πεδίου σε θερμότητα, οπότε προκύπτουν τα αντίστοιχα είδη απωλειών πυρήνα: απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων. Παρακάτω περιγράφονται οι μηχανισμοί αυτοί και ορισμένοι τρόποι μοντελοποίησης τους για την εκτίμηση των συνολικών απωλειών πυρήνα στις ηλεκτρικές μηχανές.

Απώλειες υστέρησης

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

$$w = \int_{B_1}^{B_2} H \cdot dB \quad (\text{J/m}^3) \quad (5.15)$$

Τα σιδηρομαγνητικά υλικά τείνουν να διατηρήσουν τη μαγνητική ροή στο σώμα τους έπειτα από την επιβολή μαγνητικού πεδίου, ακόμα και μετά την αφαίρεσή του. Για το λόγο αυτό οι καμπύλες μαγνήτισης και απομαγνήτισης διαφέρουν, σχηματίζοντας τελικά τον βρόχο υστέρησης όπως φαίνεται στο σχήμα 5.13:



Σχήμα 5.13. Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικού υλικού.[18]

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

Θεωρώντας ότι η μαγνητική ροή μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με συχνότητα f , και αγνοώντας την ύπαρξη μικρότερων βρόχων, οι απώλειες υστέρησης δίνονται από την ακόλουθη εμπειρική σχέση [20]:

$$p_h = k_h * f * B_m^x \quad (\text{W/m}^3) \quad (5.16)$$

Όπου:

- k_h σταθερά που εξαρτάται από τη δομή του υλικού
- x η σταθερά του Steinmetz, η οποία συνήθως λαμβάνει την τιμή 2

Η παραπάνω μοντελοποίηση των απωλειών υστέρησης προϋποθέτει ότι η μαγνητική ροή μεταβάλλεται ως προς το μέτρο, αλλά διατηρεί σταθερή διεύθυνση. Η θεώρηση αυτή είναι βάσιμη στους μετασχηματιστές, στο μεγαλύτερο μέρος του πυρήνα τους. Όμως στις ηλεκτρικές η διεύθυνση της μαγνητικής ροής αλλάζει. Με αποτέλεσμα να εμφανίζεται επιπλέον απώλεια υστερήσεως λόγω περιστροφής.

Απώλειες δινορρευμάτων

Η χρονική μεταβολή της μαγνητικής ροής επάγει ηλεκτρικό πεδίο στο σώμα του πυρήνα, σύμφωνα με το νόμο του Faraday. Λόγω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των σιδηρομαγνητικών υλικών, εμφανίζονται ρεύματα στο σώμα του πυρήνα, που

ονομάζονται δινορρεύματα και ρέουν κυκλικά σε επίπεδο κάθετο προς τη διεύθυνση της μαγνητικής ροής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια ενέργειας, λόγω φαινομένου Joule, και τη μετατροπή της σε ανεπιθύμητη θερμότητα.

Θεωρώντας μια απλουστευμένη περίπτωση όπου η μαγνητική ροή μεταβάλλεται ημιτονοειδώς, και μόνο κατά μέτρο, η ειδική απώλεια λόγω δινορρευμάτων, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$p_e = k_e * B^2 * f^2 \quad (\text{W/m}^3) \quad (5.17)$$

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

Παρατηρούμε ότι η απώλεια από δινορρεύματα εξαρτάται πολύ από τη συχνότητα καθώς είναι ανάλογη προς το τετράγωνο αυτής. Είναι επίσης ανάλογη προς το τετράγωνο του πάχους του ελάσματος και το τετράγωνο της πυκνότητας της ροής, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογη της ειδικής αντίστασης του υλικού.

Όπως και στις απώλειες υστέρησης, οι απώλειες δινορρευμάτων μοντελοποιούνται ικανοποιητικά από την παραπάνω σχέση, όταν υπολογίζονται απώλειες μετασχηματιστή. Στην περίπτωση στρεφόμενης μηχανής όμως, προστίθεται ένας ακόμη όρος περιστροφής, στις απώλειες, ο οποίος οφείλεται στη μεταβολή της διεύθυνσης της μαγνητικής επαγωγής.

Απώλειες δινορρευμάτων στους μαγνήτες

Η σχετικά υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα των μαγνητών Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου (NdFeB) ενδέχεται να προκαλέσει επιπλέον απώλεια λόγω δινορρευμάτων, στις μηχανές μόνιμων μαγνητών. Μεγάλα δινορρεύματα μπορούν να προκαλέσουν μερική ή πλήρη απομαγνήτιση των μαγνητών. Σε σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη με κοντινούς αριθμούς πόλων και αυλάκων, η μαγνητεγερτική δύναμη του πεδίου του στάτη περιέχει μεγάλο αριθμό χωρικών αρμονικών, που προκαλούν απώλειες δινορρευμάτων στους μαγνήτες. Ειδικά στην περίπτωση που η μηχανή οδηγείται από μετατροπέα πηγής τάσης, οι αρμονικές του φασικού ρεύματος απ' την πλευρά της γεννήτριας επαυξάνουν αυτές τις απώλειες.

Προκειμένου να περιοριστούν οι απώλειες στους μαγνήτες, μία καλή λύση είναι η τεχνική ελεγχόμενης ανόρθωσης PWM, μέσω της οποίας καταστέλλονται οι ανώτερες αρμονικές του φασικού ρεύματος. Μία άλλη ιδιαίτερα αποδοτική μέθοδος σχετική με την κατασκευή της μηχανής είναι η κατάτμηση των μαγνητών στο δρομέα. Η απώλεια λόγω δινορρευμάτων στους μαγνήτες είναι αντιστρόφως ανάλογη με τον αριθμό των επιμέρους μαγνητών σ' ένα πολικό βήμα. Συνεπώς, «τεμαχίζοντας» το μαγνήτη ενός πόλου σε περισσότερα τμήματα, οι απώλειες στους μαγνήτες περιορίζονται σημαντικά. Ο αριθμός των μαγνητών ανά πόλο μηχανής, δεν πρέπει συνήθως να ξεπερνά τους 4, καθώς περαιτέρω κατάτμηση οδηγεί σε μεγαλύτερη

κατασκευαστική πολυπλοκότητα, ενώ προκαλείται και έντονος κορεσμός στις γέφυρες σιδήρου του δρομέα.

Μοντελοποίηση απωλειών πυρήνα

Πολλά πακέτα λογισμικού πεδιακής ανάλυσης, διαθέτουν ενσωματωμένα εργαλεία εκτίμησης απωλειών πυρήνα. Το πρόγραμμα Femm δεν παρέχει αυτή τη δυνατότητα, επιτρέπει όμως σε συνδυασμό με το toolbox διεπαφής Femm και Matlab, την ανάπτυξη κατάλληλου πηγαίου κώδικα, ώστε να επιτευχθεί μια προσέγγιση των απωλειών σιδήρου της σχεδιασμένης μηχανής.

Στην παρούσα ενότητα, αναπτύσσεται μια απλή μέθοδος εκτίμησης των απωλειών πυρήνα, η οποία βασίζεται στην καμπύλη ειδικών απωλειών της σιδηρομαγνητικής λαμαρίνας που χρησιμοποιείται.

Θεωρήσαμε για την εφαρμογή την λαμαρίνα χαμηλών απωλειών Thyssen M235-35A η οποία χαρακτηρίζεται από μειωμένες απώλειες χάρη στο μικρό πάχος της (0.35mm). Ανατρέχοντας στο εγχειρίδιο της συγκεκριμένης λαμαρίνας, βρίσκουμε τους πίνακες απωλειών πυρήνα, συναρτήσεως της συχνότητας. Η κατασκευάστρια εταιρία δίνει τιμές ειδικών απωλειών για συχνότητες $f = 50\text{Hz}$, $f = 100\text{Hz}$ και $f = 200\text{Hz}$, επομένως εφαρμόζεται γραμμική παρεμβολή στους πίνακες τιμών προκειμένου να υπολογιστούν οι ειδικές απώλειες τις οποίες θα χρησιμοποιήσουμε αργότερα για να βρούμε τις απώλειες για κάθε συχνότητα με γραμμική παρεμβολή μέσω των καμπυλών.

Για την εξαγωγή των πολυωνύμων από τους πίνακες χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση **polyfit(x, y)** της **Matlab**, η οποία επιστρέφει τους συντελεστές του πολυωνύμου στο οποίο αντιστοιχεί η γραφική παράσταση που ορίζεται από τα σημεία x, y .

Τα πολυώνυμα που προέκυψαν για κάθε μία καμπύλη έχουν την ακόλουθη μορφή:

$$\bullet \quad f=50\text{Hz} \quad (Y(x) = 0.385x^3 - 0.0554x^2 + 0.757x - 0.0715) \quad (5.18)$$

$$\bullet \quad f=100\text{Hz} \quad (Y(x) = 1.977x^3 - 3.226x^2 + 4.609x - 0.9798) \quad (5.19)$$

$$\bullet \quad f=200\text{Hz} \quad (Y(x) = 7.65x^3 - 14.89x^2 + 17.21x - 4.016) \quad (5.20)$$

Στην παραπάνω σχέση, η μεταβλητή x αντιστοιχεί στη μαγνητική επαγωγή B , και η μεταβλητή Y αντιστοιχεί στις ειδικές απώλειες πυρήνα μετρούμενες σε W/kg .

Frequenzabhängige Kennwerte bei mittleren Frequenzen
Frequency dependent properties at middle frequencies

f = 50Hz								
J T	H A/m			μ_a 0°/90°	P _s W/kg			S _s VA/kg 0°/90°
	0°	90°	0°/90°		0°	90°	0°/90°	
0,5	26	99	63	6343	0,23	0,44	0,33	0,65
0,6	29	114	72	6674	0,31	0,59	0,45	0,87
0,7	32	131	82	6826	0,41	0,74	0,57	1,13
0,8	37	149	94	6802	0,52	0,90	0,71	1,45
0,9	45	171	109	6600	0,64	1,07	0,85	1,82
1,0	58	198	128	6197	0,78	1,25	1,02	2,31
1,1	79	234	157	5578	0,94	1,44	1,19	2,94
1,2	115	293	204	4688	1,14	1,65	1,40	3,87
1,3	189	428	310	3343	1,36	1,91	1,64	5,63
1,4	400	895	619	1800	1,65	2,25	1,95	10,30
1,5	953	2284	1683	710	1,93	2,63	2,27	28,14
1,6	2403	4738	3835	333	2,22	2,89	2,59	71,91
1,7	5983	8305	7523	181	2,52	3,13	2,92	159,98
1,8	10726	13555	12590	115				
1,9	20186	23152	21890	70				

f = 100Hz					f = 200Hz				
J T	H A/m 0°/90°	μ_a 0°/90°	P _s W/kg 0°/90°	S _s VA/kg 0°/90°	J T	H A/m 0°/90°	μ_a 0°/90°	P _s W/kg 0°/90°	S _s VA/kg 0°/90°
0,6	73	6515	1,04	1,83	0,6	79	6041	2,55	4,03
0,7	83	6718	1,34	2,38	0,7	88	6305	3,30	5,21
0,8	94	6743	1,66	3,02	0,8	99	6439	4,13	6,60
0,9	109	6575	2,01	3,80	0,9	112	6399	5,03	8,21
1,0	128	6201	2,39	4,76	1,0	130	6121	6,03	10,22
1,1	157	5594	2,81	6,03	1,1	157	5567	7,13	12,83
1,2	204	4687	3,30	7,92	1,2	203	4695	8,39	16,61
1,3	304	3405	3,88	11,31	1,3	302	3424	9,88	23,40
1,4	621	1795	4,61	20,84	1,4	620	1798	11,93	42,85
1,5	1694	706	5,36	57,05	1,5	1671	715	14,14	116,66
1,6	3877	329	6,22	146,93	1,6				
1,7					1,7				
1,8					1,8				
1,9					1,9				

Σχήμα 5.14. Πίνακες απωλειών Πυρήνα για τη μαγνητική λαμαρίνα Thyssen M235-35A [33]

Εφόσον ολοκληρωθούν τα παραπάνω προκαταρκτικά βήματα, συνεχίζουμε με το κυρίως μέρος της μεθοδολογίας. Η γεωμετρία χωρίζεται μέσω του πλέγματος σε πολλά μικρά τρίγωνα. Διατρέχουμε όλα τα στοιχειώδη τρίγωνα της γεωμετρίας, και για κάθε επιμέρους τρίγωνο, εκτελούμε τα ακόλουθα βήματα:

- Υπολογισμός των συντεταγμένων του κέντρου βάρους του τριγώνου με χρήση της εντολής `mo_getelement(n)`.

- Υπολογισμός του εμβαδού του τριγώνου, του όγκου καθώς και του group στο οποίο ανήκει, με χρήση της ίδιας εντολής.
- Υπολογισμός των συνιστωσών B_x , B_y της μαγνητικής επαγωγής, στο κέντρο βάρους, με χρήση της εντολής `mo_getb(x, y)`.
- Έλεγχος αν το κέντρο βάρους ανήκει στο σίδηρο του δρομέα, ή στο σώμα του στάτη. Αν το σημείο δεν αντιστοιχεί σε περιοχή με σίδηρο, αγνοείται.
- Αν το σημείο αντιστοιχεί σε περιοχή με σίδηρο, η μαγνητική του επαγωγή αντικαθίσταται στο παραπάνω πολυώνυμο, ώστε να προκύψουν οι ειδικές απώλειες για το σημείο σε W/kg.
- Υπολογισμός του βάρους της περιοχής που καταλαμβάνει το τρίγωνο, πολλαπλασιάζοντας τον αντίστοιχο όγκο με την πυκνότητα του σιδήρου ($7.7 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$).
- Το βάρος που προκύπτει πολλαπλασιάζεται με τις ειδικές απώλειες, ώστε να προκύψουν τελικά οι απώλειες πυρήνα σε Watt.

Επαναλαμβάνοντας την παραπάνω διαδικασία για όλα τα στοιχειώδη τρίγωνα του πλέγματος, και αθροίζοντας κάθε φορά τις απώλειες, προκύπτουν τελικά οι συνολικές απώλειες πυρήνα, τόσο στο δρομέα όσο και στο στάτη.

Σε κάθε στιγμιότυπο του κινητήρα τα μαγνητικά του μεγέθη δεν εξαρτώνται από την ταχύτητα περιστροφής του, συνεπώς και από τη συχνότητα εφόσον η ανάλυση που γίνεται στο femm είναι μαγνητοστατική. Οπότε υπολογίζουμε σε κάθε στιγμιότυπο λειτουργίας τις απώλειες πυρήνα για συχνότητες $f = 50\text{Hz}$, $f = 100\text{Hz}$ και $f = 200\text{Hz}$ χρησιμοποιώντας κάθε φορά το αντίστοιχο πολυώνυμο, ενώ τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα για κάθε συχνότητα προσεγγίζουμε με παρεμβολή χρησιμοποιώντας τις δύο κοντινότερες συχνότητες για τις οποίες έχουμε υπολογίσει τις απώλειες. Αν η συχνότητα f_{el} είναι ανάμεσα στα 50Hz και στα 100Hz, η παρεμβολή που θα κάνουμε είναι:

$$P_{\text{losscore}} = a * f_{el} + b * f_{el}^2 \quad (5.21)$$

$$\text{Όπου: } b = \frac{\left(\frac{P_{\text{losscore}100}}{100} - \frac{P_{\text{losscore}50}}{50}\right)}{50} \quad \text{και} \quad a = \frac{P_{\text{losscore}100}}{100} - b * 100$$

Ενώ, αν η συχνότητα f_{el} είναι ανάμεσα στα 100Hz και στα 200Hz, η παρεμβολή που θα κάνουμε είναι:

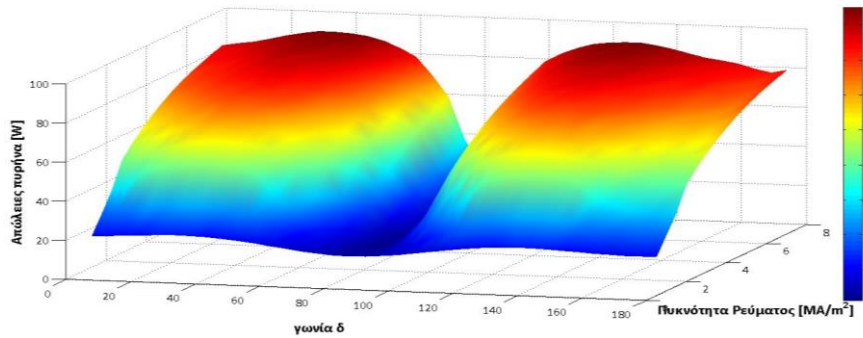
$$P_{\text{losscore}} = a * f_{el} + b * f_{el}^2 \quad (5.21)$$

$$\text{Όπου: } b = \frac{\left(\frac{P_{\text{losscore}200}}{200} - \frac{P_{\text{losscore}100}}{100}\right)}{100} \quad \text{και} \quad a = \frac{P_{\text{losscore}200}}{200} - b * 200$$

Αν η συχνότητα είναι μικρότερη από 50Hz τότε για λόγους απλοποίησης και χωρίς να χάνεται ιδιαίτερα η ακρίβεια της μεθόδου, θεωρούμε πως οι απώλειες πυρήνα είναι

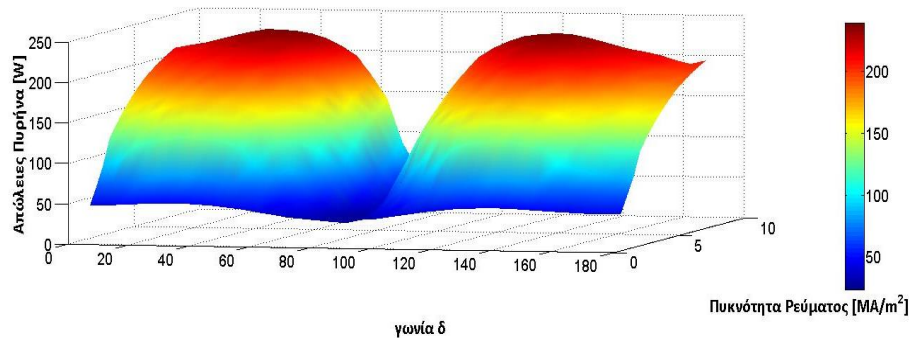
ίσες με τις απώλειες 50Hz. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται ο τρόπος που μεταβάλλονται οι απώλειες πυρήνα για διάφορες φορτίσεις και γωνίες δ υπό σταθερή συχνότητα 50Hz, 100Hz και 170Hz ως μέγεθος εξαρτώμενο μόνο από την πεδιακή κατάσταση της μηχανής σε κάθε στιγμιότυπο λειτουργίας. Οι ενδιάμεσες συχνότητες για κάθε ένα πεδιακό στιγμιότυπο μπορούν να υπολογιστούν με παρεμβολή όπως περιγράφεται παραπάνω.

- $f_{\eta\lambda}=50\text{Hz}$



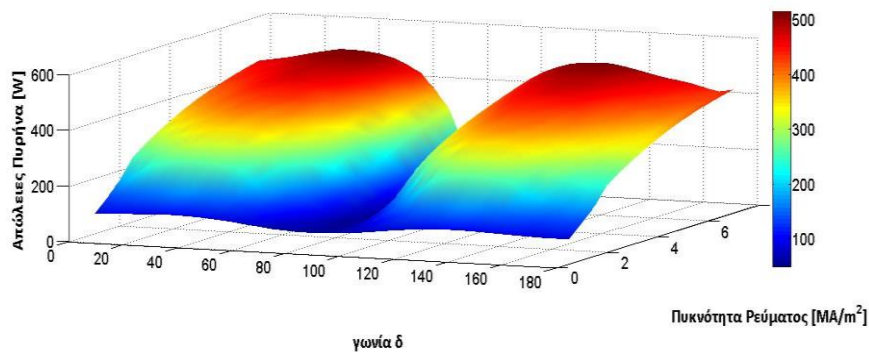
Σχήμα 5.15. Απώλειες πυρήνα για συχνότητα 50Hz

- $f_{\eta\lambda}=100\text{Hz}$



Σχήμα 5.16. Απώλειες πυρήνα για συχνότητα 100Hz

- $f_{\eta\lambda}=170\text{Hz}$



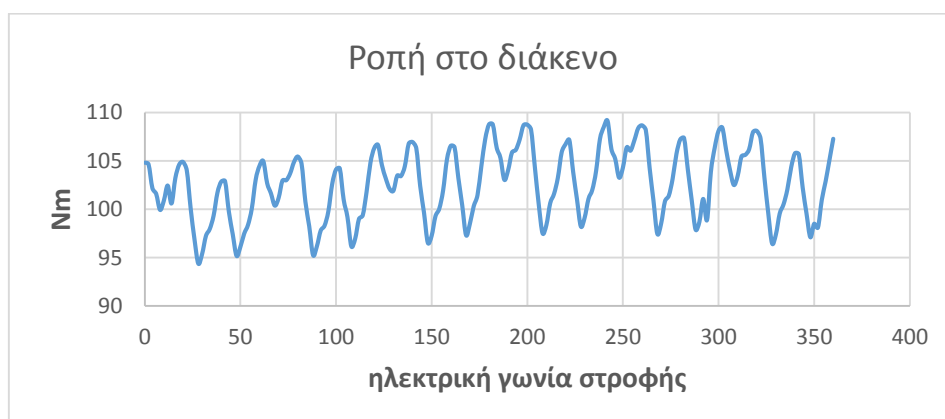
Σχήμα 5.17. Απώλειες πυρήνα για συχνότητα 170Hz που είναι η μέγιστη ηλεκτρική συχνότητα που χρησιμοποιούμε στα πλαίσια αυτής της μελέτης

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι οι απώλειες πυρήνα αυξάνονται με την αύξηση της πυκνότητας ρεύματος και της ισχύος και μεγιστοποιούνται γύρω από της περιοχές γωνιών μέγιστης ροπής και πριν από αυτή τη γωνία στην περιοχή ενίσχυσης του πεδίου ενώ μειώνεται στις περιοχές εξασθένησης πεδίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν ανάλογα την κατανομή του μαγνητικού πεδίου το οποίο όπως είναι λογικό μειώνεται στις περιοχές εξασθένησης πεδίου.

5.2.2.3. Σύγχρονη στροφή

Για να προσομοιωθεί η πραγματική στροφή μιας μηχανής, ο στάτης τροφοδοτείται με ημιτονοειδές ρεύμα και ο δρομέας στρέφεται μηχανικά μεταβάλλοντας τα ρεύματα του στάτη με τη διπλάσια από τη μηχανική γωνία στροφής. Ο λόγος που επαρκεί η παραδοχή της ημιτονικότητας, είναι γιατί οι μηχανές με εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες έχουν στο ισοδύναμο κύκλωμα μεγάλη τιμή αυτεπαγωγής, που έχει ως αποτέλεσμα να απομειώνονται σημαντικά οι αρμονικές του ρεύματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αρχική θέση του δρομέα σε σχέση με το στάτη είναι πολύ σημαντική καθώς καθορίζει την γωνία των αυλάκων του στάτη με το πλαίσιο αναφοράς $d - q$ του δρομέα και επηρεάζει το συνολικό μαγνητικό πεδίο. Ορίζουμε τη γωνία $\delta=0^\circ$ ως το σημείο που το πεδίο του μαγνήτη (d άξονας) ευθυγραμμίζεται με το πεδίο της φάσης A των τυλιγμάτων και μετράμε κάθε φορά την πεπλεγμένη ροή στη φάση A, ώστε να έχουμε σωστή αναφορά. Από εδώ και έπειτα όταν αναφέρεται η γωνία δ , θα εννοείται ότι είναι η γωνία του ρεύματος στάτη σε σχέση με τον d άξονα.

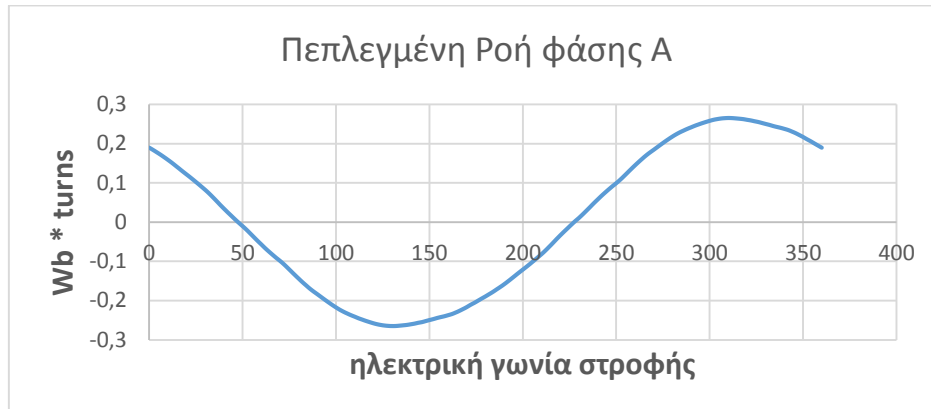
Τα μεγέθη που μπορούν να υπολογιστούν άμεσα από το εργαλείο μετεπεξεργασίας του femm είναι η ροπή και η πεπλεγμένη ροή στα τυλίγματα. Πραγματοποιώντας μία σύγχρονη στροφή για πυκνότητα ρεύματος 4 MA/m^2 και γωνία $\delta=60^\circ$ τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι:



Σχήμα 5.17. Ροπή στο διάκενο κατά τη σύγχρονη στροφή

Παρατηρείται ότι η ροπή στο διάκενο δεν είναι σταθερή αλλά έχει έντονη παρουσία αρμονικών φαινομένων, και αυτό είναι το πλεονέκτημα της παρούσας ανάλυσης καθώς η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων παρέχει τη δυνατότητα να ληφθούν

υπόψιν μη γραμμικότητες των σιδηρομαγνητικών υλικών. Κατά τη σύγχρονη στροφή και καθώς μεταβάλλεται η σχετική θέση των δοντιών του στάτη και του d και q άξονα του δρομέα και λόγω μικρότερης διαπερατότητας των μαγνητών σε σχέση με τη λαμαρίνα, η μαγνητική ροή συναντάει μονοπάτια διαφορετικής μαγνητικής αντίστασης και παρουσιάζει αυξομειώσεις, οι οποίες αντιστοιχούν σε γρήγορες διακυμάνσεις της ροπής. Είναι σημαντικό το συγκεκριμένο μέγεθος να διατηρεί χαμηλές τιμές έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι μηχανικές καταπονήσεις στον άξονα και στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης καθώς και ο θόρυβος.



Σχήμα 5.18. Πεπλεγμένη ροή φάσης A κατά τη σύγχρονη στροφή

Η πεπλεγμένη ροή σε κάθε φάση μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο [21]:

$$\Lambda_j = 2 * p * L_{Fe} * \frac{n_q}{n_{pp}} * \sum_{q=1}^{\frac{Q}{2 * p}} k_{jq} * \frac{1}{S_q} * \int_{S_q} A_z * dS \quad (5.22)$$

Όπου:

- p τα ζεύγη πόλων της μηχανής
- L_{Fe} το ενεργό μήκος της μηχανής
- n_q οι αγωγοί ανά αύλακα
- n_{pp} ο αριθμός παράλληλων πηνίων
- $k_{jq} = 1$, αν η q -οστή αύλακα περιέχει αγωγούς της j -οστής φάσης, και το ρεύμα είναι θετικό
 $k_{jq} = -1$, αν η q -οστή αύλακα περιέχει αγωγούς της j -οστής φάσης, και το ρεύμα είναι αρνητικό
 $k_{jq} = 0$, αν η q -οστή αύλακα δεν περιέχει αγωγούς της j -οστής φάσης.
- S_q το εμβαδό της αύλακας
- A_z το διανυσματικό δυναμικό στη στοιχειώδη επιφάνεια dS

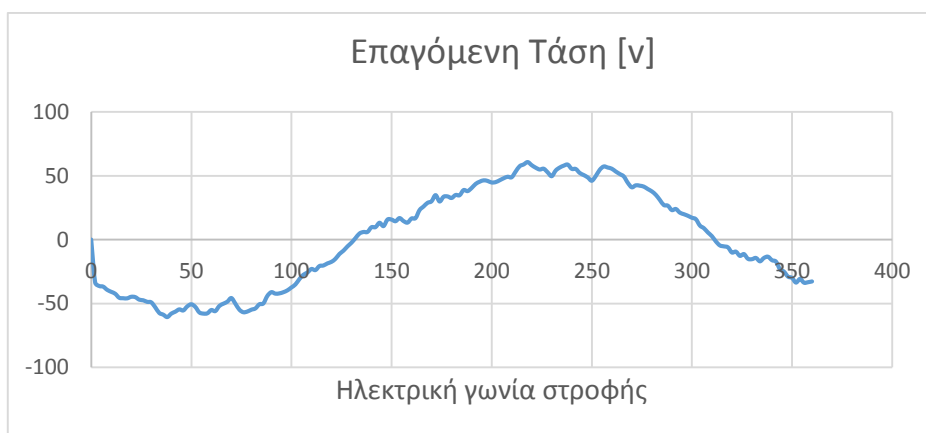
Επειδή η σύγχρονη στροφή γίνεται με τη μεταβολή της γωνίας στροφής, το femm δεν αντιλαμβάνεται πόσο γρήγορα συμβαίνει η μεταβολή αυτή, που σημαίνει ότι το πεδιακό στιγμιότυπο είναι ίδιο για κάθε ταχύτητα στροφής αρκεί να διατηρούνται σταθερά τα μεγέθη της πυκνότητας ρεύματος και γωνίας δ .

Από τη μεταβολή της πεπλεγμένης ροής και από την σχέση 5.23 υπολογίζεται η επαγόμενη τάση που φαίνεται στο σχήμα 5.18 [21].

$$V = \frac{d\Lambda_A(\theta_m)}{d\theta_m} * \frac{\theta_m}{dt} = \frac{d\Lambda_A(\theta_m)}{d\theta_m} * \omega_m \quad (5.23)$$

Όπου:

- Λ_A η πεπλεγμένη ροή στη βάση A
- θ_m η μηχανική γωνία στροφής
- ω_m η μηχανική ταχύτητα στροφής



Σχήμα 5.18. Επαγόμενη τάση για ηλεκτρική συχνότητα 67 Hz

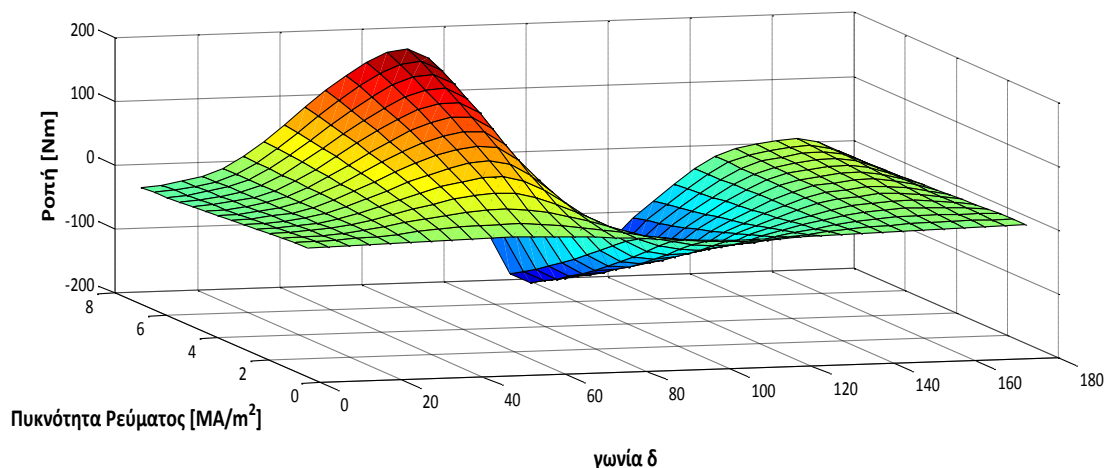
Η τάση προσεγγίζει αρκετά την ημιτονοειδή μορφή έχοντας κάποιες αρμονικές υψηλότερης τάξης. Η αρμονική παραμόρφωση είναι επίσης ένα μέγεθος που λαμβάνεται υπόψιν και καθώς είναι επιθυμητές καταστάσεις λειτουργίας με χαμηλό συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης THD% με σκοπό την μείωση των απωλειών στο σύστημα οδήγησης.

5.2.2.4. Αποτελέσματα αλγορίθμου χαρτογράφησης

5.2.2.4.1. Χάρτης Ροπής και Κυμάτωσης Ροπής

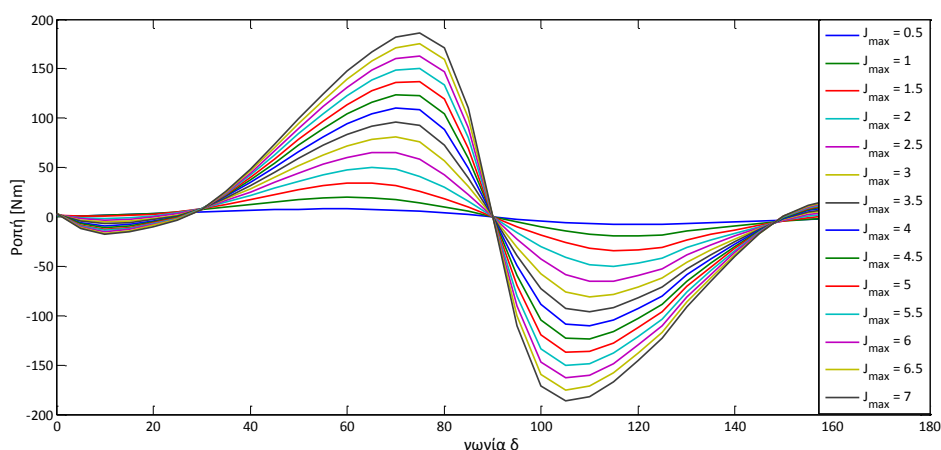
Η ροπή στο διάκενο της μηχανής, σε μία δεδομένη σχεδίαση είναι ένα μέγεθος που εξαρτάται από τη φόρτιση και την γωνία δ και όχι από την ταχύτητα που στρέφεται ο δρομέας. Σε κάθε σύγχρονη στροφή με δεδομένη πυκνότητα ρεύματος και γωνία δ η ροπή δεν είναι σταθερή αλλά υπάρχει μία σχετική κυμάτωση, όμως για την ανάλυση και τη χαρτογράφηση θα χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή της ενώ το ποσοστό της κυμάτωσης θα αποτελέσει ένα σημαντικό κριτήριο στην αξιολόγηση των λειτουργικών σημείων.

Με την διαδικασία που περιεγράφηκε παραπάνω για την χαρτογράφηση και με αλληπάλληλες προσομοιώσεις, ο χάρτης Ροπής στο διάκενο και η κυμάτωση της φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 5.19. Παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπής συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος και της γωνίας του ρεύματος

Μια διαφορετική απεικόνιση της Ροπής για κάθε φόρτιση και γωνία δ φαίνεται επίσης στο σχήμα 5.20.

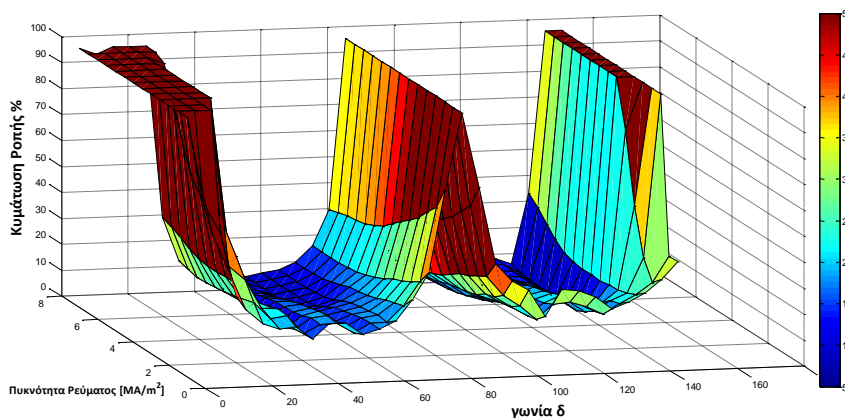


Σχήμα 5.20. Απεικόνιση κατανομής Ροπής στο φάσμα των γωνιών δ σε διάφορες φορτίσεις

Από τα παραπάνω σχήματα εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η μέγιστη Ροπή αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας του ρεύματος που επιβάλουμε στα τυλίγματα, δηλαδή με το πλάτος του ρεύματος.
- Η γωνία που επιτυγχάνεται η μέγιστη ροπή ανά φόρτιση (μέγιστη ροπή ανά ρεύμα- ΜΤΡΑ) δεν είναι σταθερή αλλά αυξάνεται επίσης με την αύξηση της πυκνότητας ρεύματος (μη γραμμικότητα) και είναι ελαφρώς μετατοπισμένη από τις 45 μηχανικές μοίρες (90 ηλεκτρικές) λόγω εκτυπότητας του δρομέα, ενώ η μέγιστη ροπή εμφανίζεται σε ελαφρώς μικρότερες γωνίες.

Η κυμάτωση ροπής είναι όπως περιεγράφηκε προηγουμένως είναι ένα ακόμα μέγεθος που επηρεάζεται μόνο από τη φόρτιση και τη γωνία δ και αποτελεί ένα μέτρο εκτίμησης της ποιότητας της παραγόμενης ροπής κατά την κίνηση.



Σχήμα 5.21. Κυμάτωση Ροπής σε κάθε λειτουργική κατάσταση

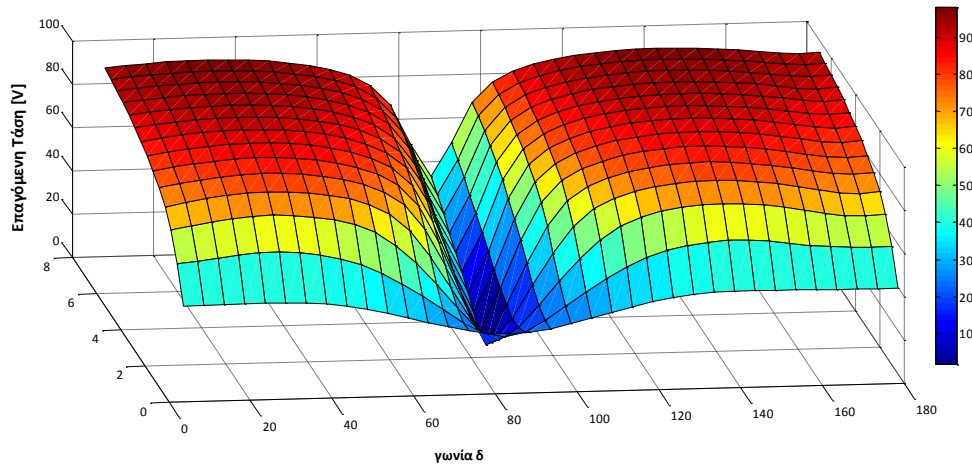
Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.21, η κυμάτωση ροπής διατηρεί χαμηλές τιμές κοντά στις περιοχές γωνιών δ όπου συναντώνται οι μεγαλύτερες απόλυτες τιμές Ροπής, σημεία στα οποία φαίνεται σχεδόν σταθερή στη μεταβολή της πυκνότητας ρεύματος. Όπως ήταν αναμενόμενο, η κυμάτωση ροπής παίρνει ακραίες τιμές για γωνίες 0° , 90° και 180° και αυτό γιατί σε σημεία έντονης εξασθένησης πεδίου, το πεδίο δημιουργεί τοπικούς κορεσμούς στο σίδηρο που προκαλούν έντονα αρμονικά φαινόμενα.

5.2.2.4.2. Επαγόμενη τάση στα άκρα του τυλίγματος και αρμονική παραμόρφωση αυτής (THD%)

Η επαγόμενη τάση στα άκρα του τυλίγματος είναι ένα μέγεθος που όπως αναφέρεται προηγουμένως, εξαρτάται από το λόγο μεταβολής της πεπλεγμένης ροής στα τυλίγματα ως προς τη γωνία στροφής κατά τη σύγχρονη στροφή δρομέα και ρευμάτων του στάτη. Έχει σχετικά ημιτονοειδή μορφή και εξαρτάται γραμμικά από την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής.

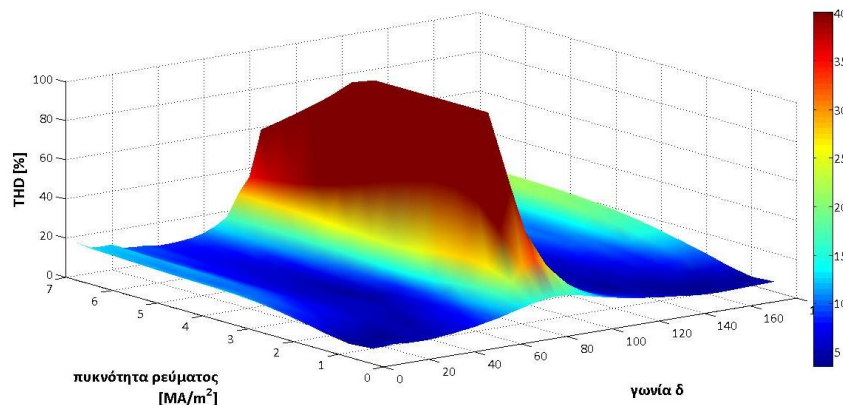
Εφόσον το πλάτος της EMF μεταβάλλεται με σταθερή αναλογία σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής άρα και την ηλεκτρική συχνότητα, θα μελετηθεί η κατανομή της σε πεδιακά στιγμιότυπα διάφορων φορτίσεων και γωνιών δ με σταθερή συχνότητα ίση με τη συχνότητα βάσης. Ένας εποπτικός τρόπος είναι να μελετήσουμε την θεμελιώδη συνιστώσα της και το αρμονικό της περιεχόμενο με το συντελεστή αρμονικής παραμόρφωσης THD%, ο οποίος είναι σταθερός για όλο το εύρος συχνοτήτων.

Όπως παρατηρούμε από το σχήμα 5.22, η θεμελιώδης συνιστώσα της τάσης αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας ρεύματος και μεγιστοποιείται στα σημεία ΜΤΡΑ και πριν από αυτή τη γωνία που έχουμε ενίσχυση του πεδίου ενώ μειώνεται σε περιοχές εξασθένησης πεδίου. Καθώς όλα τα συστήματα κίνησης διαθέτουν ηλεκτρονικά ισχύος για τα οποία υπάρχει περιορισμός στην τάση, αυτό καθιστά τις μηχανές εσωτερικών μόνιμων μαγνητών κατάλληλες για εφαρμογές μεγάλου εύρους ταχυτήτων.



Σχήμα 5.22. Κατανομή θεμελιώδους συνιστώσας της επαγόμενης τάσης για σταθερή συχνότητα 100Hz

Αντίστοιχα, ο συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης αυξάνεται απότομα στις περιοχές με έντονη εξασθένιση πεδίου ενώ στις υπόλοιπες καταστάσεις φαίνεται να διατηρεί σταθερή και χαμηλή τιμή.



Σχήμα 5.23. Κατανομή αρμονικού περιεχομένου επαγόμενης τάσης για συχνότητα ίση με 100Hz

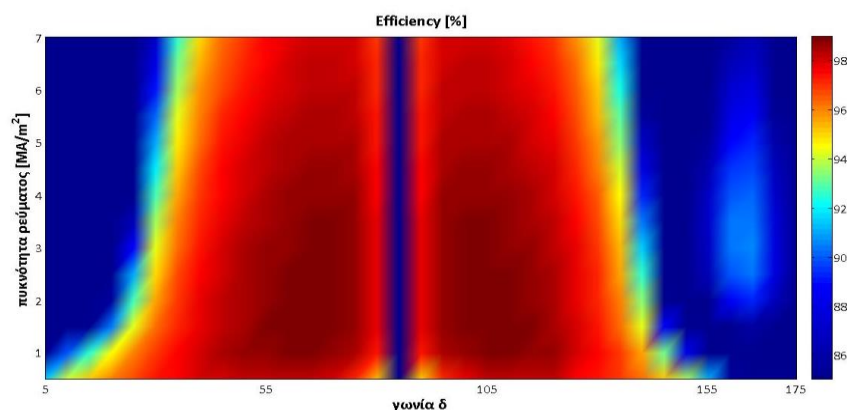
5.2.2.4.3. Απόδοση

Ως απόδοση της μηχανής ορίζουμε το πηλίκο της ισχύος προς το άθροισμα των απωλειών και της ισχύος.

$$efficiency = \frac{T * \omega}{T * \omega + C_{u_{losses}} + C_{core_{losses}}} * 100\% \quad (5.24)$$

Είναι ένα μέγεθος που εξαρτάται από το πεδιακό στιγμιότυπο της μηχανής σε κάθε κατάσταση φόρτισης και γωνίας δ και από την ταχύτητα περιστροφής. Επιλέγοντας

σταθερή συχνότητα και ίση με $f_{ei}=67\text{Hz}$ για την οποία ο κινητήρας στρέφεται με την ταχύτητα βάσης παρατηρούμε:



Σχήμα 5.24. Κατανομή απόδοσης για ταχύτητα βάσης

Η απόδοση είναι ένα από τα κυριότερα κριτήρια επιλογής μιας λειτουργικής κατάστασης ώστε να επιτυγχάνεται η οικονομικότερη οδήγηση. Παρατηρούμε ότι η απόδοση μεγιστοποιείται γύρω από τις περιοχές μέγιστης ροπής ανά ρεύμα (MTPA) σε λειτουργία κινητήρα και γεννήτριας, ενώ μειώνεται με την αύξηση της πυκνότητας ρεύματος, αποτέλεσμα αναμενόμενο εφόσον οι απώλειες χαλκού είναι ανάλογες με το τετράγωνο της RMS τιμής του ρεύματος.

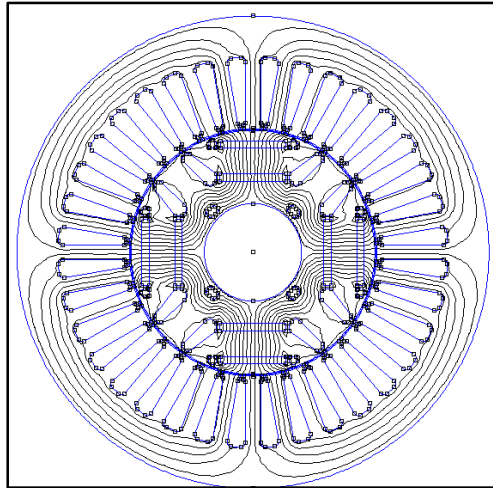
5.2.3. Παράμετροι μηχανής

Οι παράμετροι της μηχανής που θα αναπτυχθούν στη συνέχεια είναι οι αυτεπαγωγές ευθέως και κάθετου άξονα και η πεπλεγμένη ροή του μαγνήτη. Η εκτίμηση τους είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον προσδιορισμό του δυναμικού μοντέλου της μηχανής καθώς επίσης και το ισοδύναμο κύκλωμα.

5.2.3.1. Ροή Μαγνήτη Φ_{mag}

Για τον υπολογισμό της ροής μαγνήτη Φ_{mag} , μηδενίζονται τα ρεύματα στάτη και η μηχανή λειτουργεί εν κενώ. Στη συνέχεια υπολογίζεται η πεπλεγμένη ροή από τη σχέση (5.22) [21].

Στο σχήμα 5.25 φαίνεται η κατανομή του πεδίου σε λειτουργία εν κενώ.



Σχήμα 5.25. Μαγνητική φόρτιση της μηχανής, υπό την επίδραση μόνο του μόνιμου μαγνήτη (κενό φορτίο).

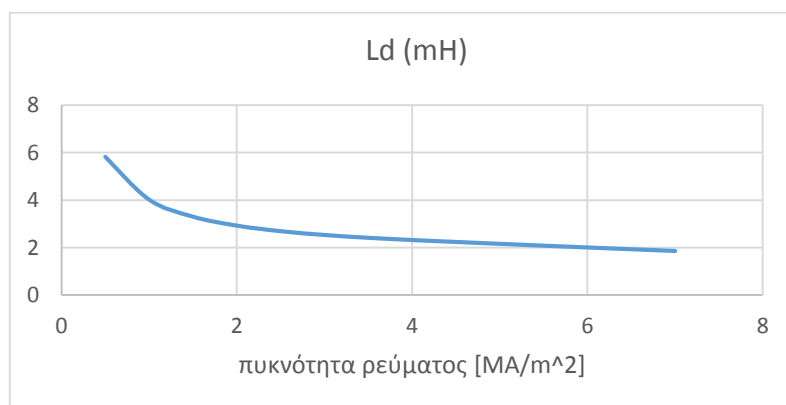
Κάνοντας υπολογισμό της πεπλεγμένης ροής ανά φάση χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση, η ροή από το πεδίο του μαγνήτη προκύπτει:

$$\Phi_{mag} = 0.0837 \text{ Wb} * \text{turns}$$

5.2.3.2. Αυτεπαγωγή ευθέως άξονα L_d

Για τον υπολογισμό της αυτεπαγωγής ευθέως άξονα, ο μαγνητικός άξονας της φάσης A του στάτη, ευθυγραμμίζεται με τον d-άξονα της μηχανής. Για τον υπολογισμό της αυτεπαγωγής L_d σε πολλές φορτίσεις της μηχανής, το ρεύμα της φάσης A θα είναι το μέγιστο για κάθε φόρτιση, επομένως τα ρεύματα των φάσεων B,C θα έχουν το μισό μέτρο και αντίθετη κατεύθυνση. Επιπλέον ο μαγνήτης αφαιρείται (δηλαδή στο λογισμικό της προσομοίωσης αντικαθίσταται το υλικό του μαγνήτη αντικαθίσταται με αέρα). Υπολογίζοντας ξανά την πεπλεγμένη ροή από τη γνωστή σχέση, προκύπτει τελικά η αυτεπαγωγή ευθέως άξονα από τη σχέση :

$$L_d = \frac{\Psi_d}{I_d} \quad (5.25)$$



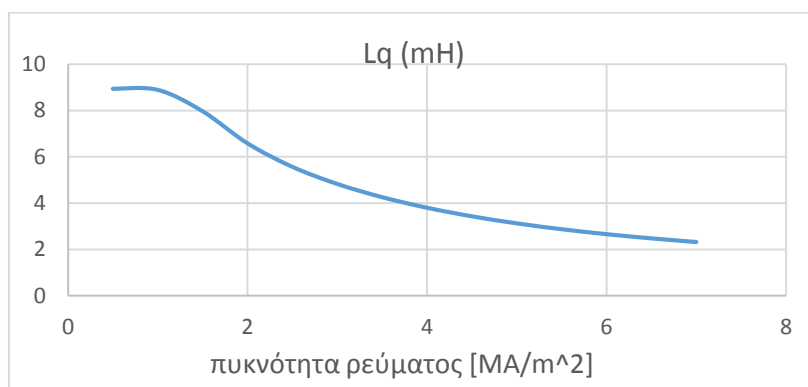
Σχήμα 5.26. Αυτεπαγωγή άξονα d σε διάφορες φορτίσεις

5.2.3.3. Αυτεπαγωγή εγκάρσιου άξονα L_q

Για τον υπολογισμό της αυτεπαγωγής ευθέως άξονα, ο μαγνητικός άξονας της φάσης A του στάτη, ευθυγραμμίζεται με τον q-άξονα της μηχανής. Το ρεύμα της φάσης A επιλέγεται ξανά μέγιστο για την κάθε φόρτιση, επομένως το ρεύμα I_q θα ισούται με το ονομαστικό ρεύμα της μηχανής. Επιπλέον ο μαγνήτης αντικαθίσταται με αέρα στο λογισμικό Femm για τις ανάγκες της προσομοίωσης.

Υπολογίζοντας ξανά την πεπλεγμένη ροή, προκύπτει τελικά η αυτεπαγωγή ευθέως άξονα από τη σχέση :

$$L_q = \frac{\Psi_q}{I_q} \quad (5.26)$$



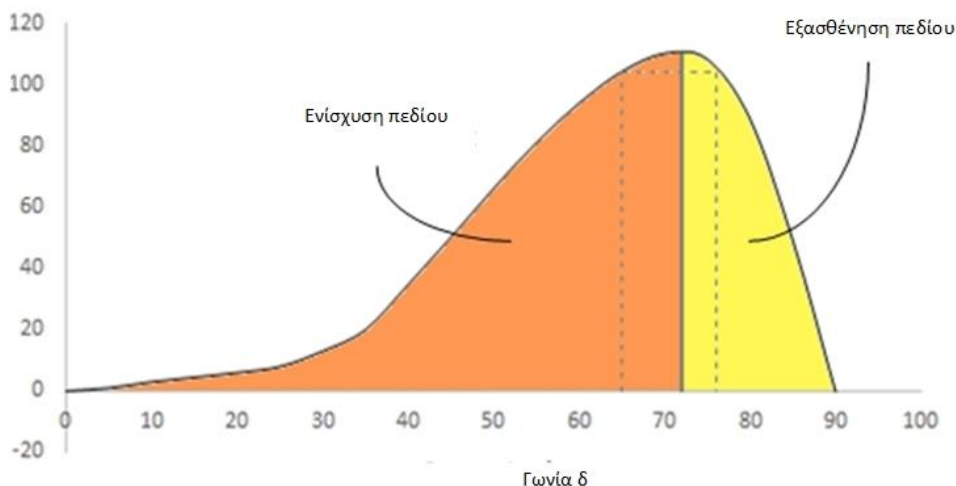
Σχήμα 5.27. Αυτεπαγωγή άξονα q σε διάφορες φορτίσεις

Όπως ήταν αναμενόμενο, σε κάθε φόρτιση ισχύει ότι $L_q > L_d$.

5.3. Περιοχές ενίσχυσης και εξασθένησης πεδίου

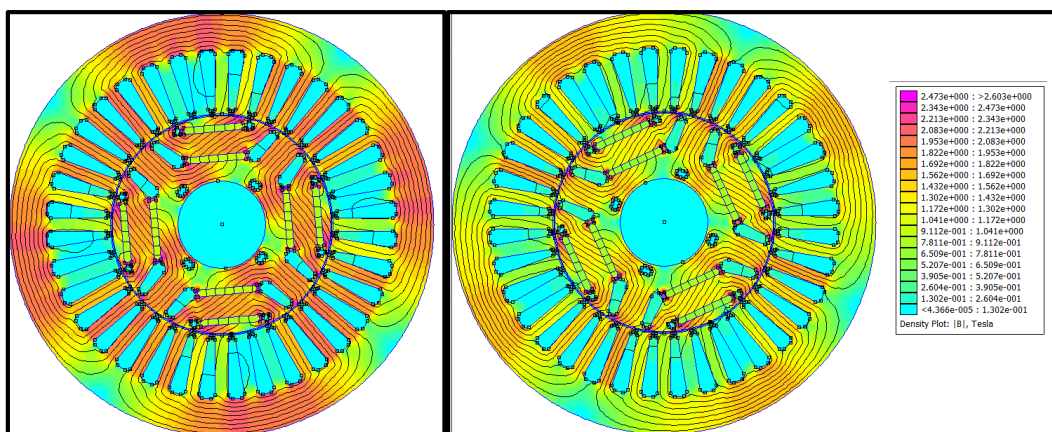
Από τα αποτελέσματα της χαρτογράφησης είναι φανερό πως πρέπει να γίνει εκτενέστερη αναφορά των φαινομένων στις περιοχές που ενισχύεται ή εξασθενεί το πεδίο του μαγνήτη. Έχει ήδη περιγραφεί στην χαρτογράφηση της ροπής ότι αυτή ακολουθεί σχεδόν ημιτονική διαμόρφωση με τη μεταβολή της γωνίας δ διατηρώντας σταθερή την πυκνότητα ρεύματος. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν δύο γωνίες δ εκατέρωθεν της γωνίας μέγιστης ροπής για τις οποίες η τιμή της ροπής είναι ίδια. Δεν συμβαίνει το ίδιο όμως με τα υπόλοιπα μαγνητικά και ηλεκτρικά μεγέθη της μηχανής.

Διαμόρφωση Ροπής στο διάκενο στις περιοχές ενίσχυσης και εξασθένησης πεδίου



Σχήμα 5.28. Περιοχές λειτουργίας ενίσχυσης και εξασθένησης φορτίου για σταθερή και ονομαστική φόρτιση

Εποπτικά μπορεί να παρατηρηθεί το σιγμιότυπο του πεδίου σε αυτές τις δύο διαφορετικές καταστάσεις και στην κατάσταση μέγιστης ροπής.



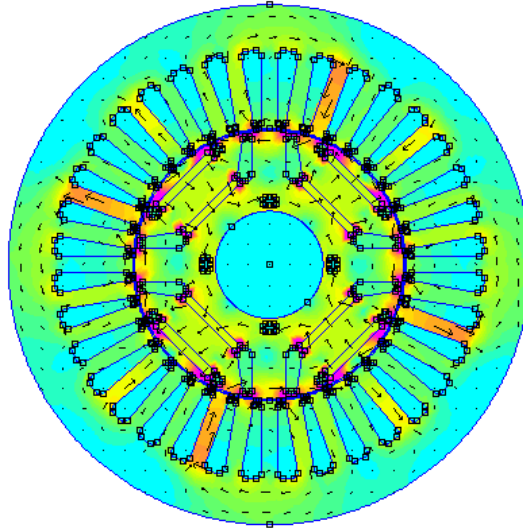
a)

b)

Σχήμα 5.29. a) Ενίσχυση Πεδίου ($\delta = MTPA - 7^\circ$)

b) Εξασθένηση Πεδίου ($\delta = MTPA + 3^\circ$)

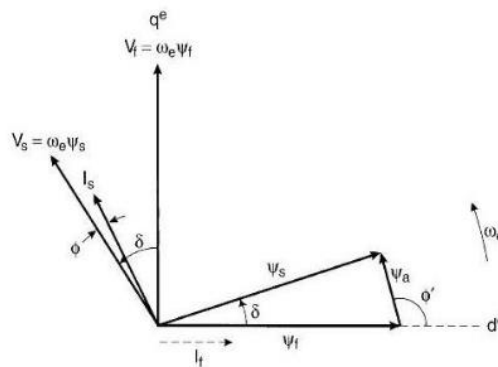
Είναι φανερό ότι το συνολικό πεδίο εξασθενεί σε γωνίες μεγαλύτερες από τη γωνία μέγιστης ροπής και μάλιστα απότομα, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται και με την απότομη πτώση της ροπής στην περιοχή εξασθένησης, ενώ μειώνεται στο ελάχιστο στην μηχανική γωνία $\delta = 90^\circ$ (ή 180° ηλεκτρική γωνία) όπως φαίνεται στο σχήμα 5.30.



Σχήμα 5.30. Μέγιστη εξασθένιση πεδίου ($\delta=90^\circ$)

Γίνεται αντιληπτό από το σχήμα 5.30 ο λόγος που καθιστά τις μηχανές εσωτερικών μόνιμων μαγνητών κατάλληλες για λειτουργία εξασθένησης πεδίου, καθώς μέσω των φραγμάτων αέρα δημιουργούνται διαδρομές που μπορούν σκεδάζουν τη ροή στο μαγνήτη ώστε να περιορίζεται η τάση στο στάτη σε γωνίες εκατέρωθεν της $\delta=90^\circ$.

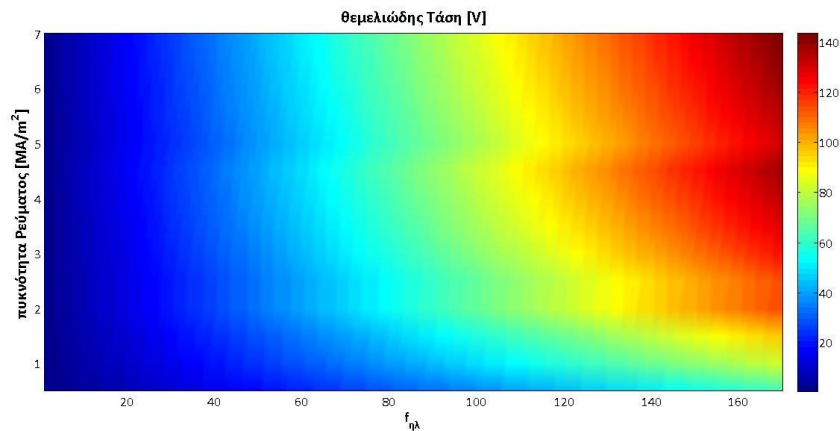
Πέρα όμως και από την επιβεβαίωση της εξασθένησης από τα αποτελέσματα τις προσομοίωσης, γίνεται αντιληπτό από το διανυσματικό διάγραμμα του σχήματος 5.31 πως η γωνία ϕ' επηρεάζει το πλάτος της ροής στο στάτη ψ_s . Αν είναι μικρότερη από 90° , τότε η ροή στο στάτη είναι μεγαλύτερη από τη ροή του μαγνήτη και συνεπώς το πεδίο ενισχύεται, ενώ αν είναι μεγαλύτερη από 90° , η ροή του μαγνήτη περιορίζεται με συνέπεια την απομείωση της ροής του στάτη (εξασθένιση πεδίου).



Σχήμα 5.31. Διανυσματικό διάγραμμα σε λειτουργία εξασθένησης πεδίου [32]

Στις λειτουργικές καταστάσεις με μικρότερη ταχύτητα από την ταχύτητα βάσης, συγκεντρωτικά η καλύτερη επιλογή ελέγχου είναι τα σημεία μέγιστης ροπής όπου η τάση διατηρεί τιμές κάτω από το όριο (ονομαστική τιμή) και το ρεύμα μεταβάλλεται ανάλογα με τη ροπή καθώς όπως έχει παρατηρηθεί από τα παραπάνω σχήματα, τα αρμονικά φαινόμενα είναι σημαντικά περιορισμένα και η απόδοση έχει τις μέγιστες τιμές, ιδιαίτερα οι απώλειες χαλκού γιατί διατηρούμε το χαμηλότερο δυνατό ρεύμα για δεδομένη απαίτηση ροπής και στροφών.

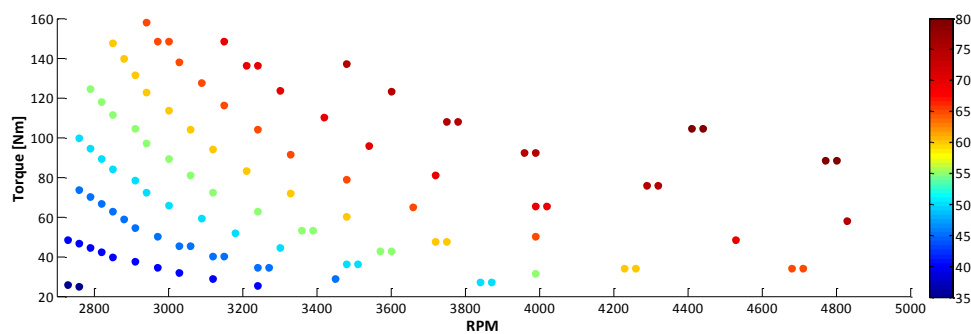
Παρόλα αυτά τα σημεία λειτουργίας μέγιστης ροπής δεν προσφέρονται για ταχύτητες μεγαλύτερες από την ταχύτητα βάσης, καθώς η τιμή της φασικής τάσης τυμπάνου υπερβαίνει το ανώτερο όριο που θέτει η διάταξη ηλεκτρονικών ισχύος, το οποίο στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής έχει επιλεγεί 90V.



Σχήμα 5.32. Κατανομή τάσης στις γωνίες μέγιστης Ροπής

Για το λόγο αυτό, σε μεγαλύτερες στροφές ο έλεγχος πρέπει να οδηγεί τη μηχανή σε περιοχές εξασθένησης πεδίου, έτσι ώστε να ικανοποιείται και η λειτουργία σε υπεραστικό περιβάλλον, όπου η τάση έχει αποδεκτές τιμές για ισοδύναμη τιμή ροπής ακόμα και για μεγαλύτερη τιμή φόρτισης παρά το γεγονός ότι τα αρμονικά φαινόμενα στη ροπή και στην τάση γίνονται εντονότερα.

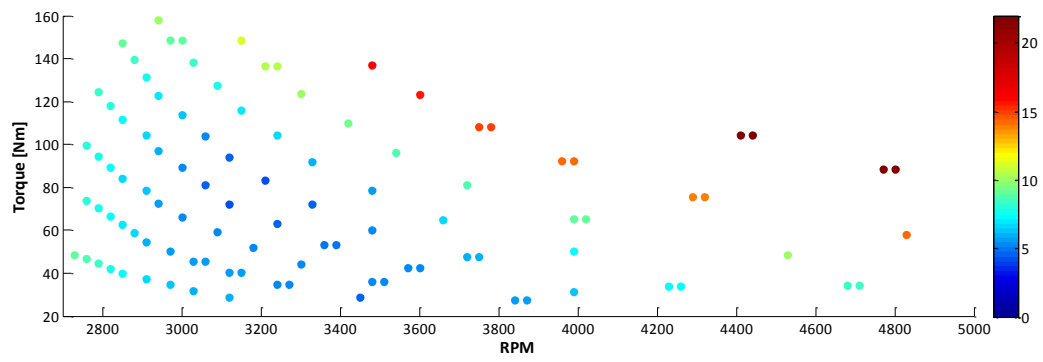
Από τον χάρτη όλων των λειτουργικών καταστάσεων της μηχανής για τάση ίση με το ανώτερο όριο του αντιστροφέα, 90V και για ταχύτητες μεγαλύτερες από την ταχύτητα βάσης όπου η μηχανή εισάγεται στην περιοχή εξασθένησης πεδίου προκύπτει το σχήμα 5.33.



Σχήμα 5.33. Διαμόρφωση χαρακτηριστικών $T-\omega$ σε σχέση με την γωνία δ

Όπως φαίνεται κάθε γωνία δ χαρακτηριστική ροπής στροφών, ενώ όσο πιο έντονη είναι η εξασθένηση του πεδίου, όσο δηλαδή πιο κοντά βρίσκεται η μηχανή στην γωνία $\delta=90^\circ$, τόσο πιο μεγάλη τιμή μπορεί να πάρει η Ροπή σε υψηλές στροφές.

Βέβαια, όσο προσεγγίζεται η εντονότερη εξασθένηση πεδίου, τα αρμονικά φαινόμενα αυξάνονται όπως φαίνεται στα σχήματα παρακάτω για τις ίδιες λειτουργικές καταστάσεις.



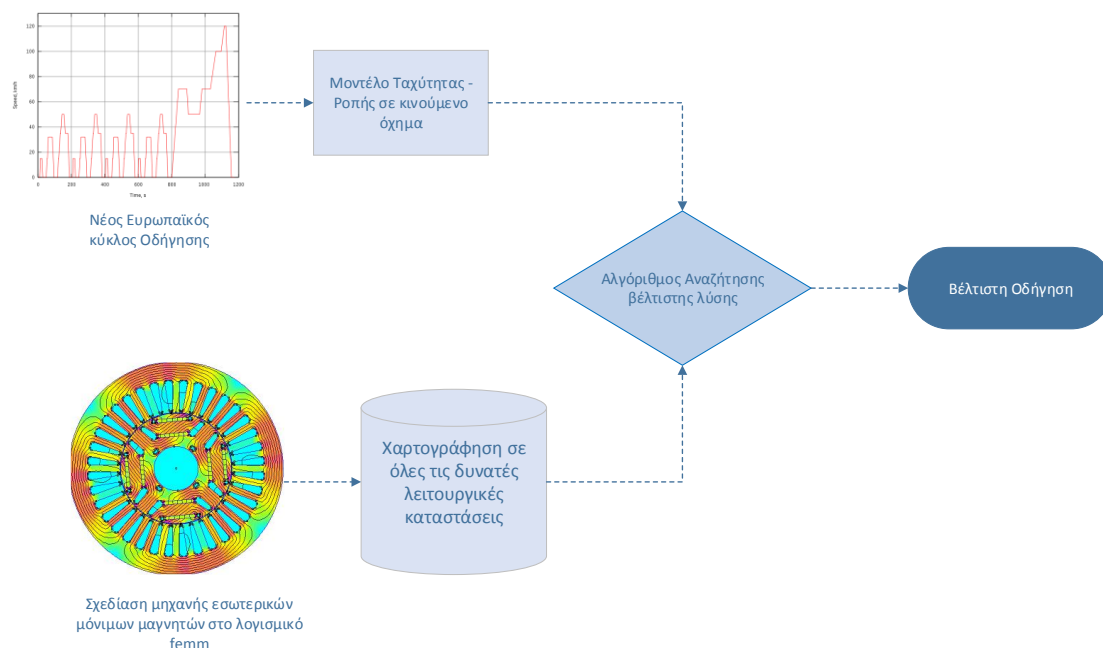
Σχήμα 5.34. THD% σε λειτουργία εξασθένησης πεδίου

6. Αλγόριθμος βέλτιστης οδήγησης στο Νέο Ευρωπαϊκό κύκλο οδήγησης

6.1. Εισαγωγή

Έχοντας μοντελοποιήσει τις διαμήκεις δυνάμεις σε ένα κινούμενο όχημα είναι πλέον γνωστή η απαίτηση ροπής που πρέπει να δοθεί στον άξονα του κινητήρα για κάθε τιμή ταχύτητας και επιτάχυνσης σε συνάρτηση με το χρόνο. Συνεπώς έχουμε καταλήξει σε ζεύγη λειτουργικών καταστάσεων ροπής και στροφών του κινητήρα σε ένα δεδομένο κύκλο οδήγησης. Επίσης, από την άλλη μεριά έχει χαρτογραφηθεί ένα μοντέλο κινητήρα εσωτερικών μονίμων μαγνητών σε κάθε δυνατή λειτουργική κατάσταση από άποψη ρεύματος εισόδου, γωνίας ρεύματος σε σχέση με τον d άξονα στο πλαίσιο αναφοράς και στροφών καταλήγοντας σε ένα τρισδιάστατο πίνακα $J \times \delta \times f_{ei}$ που οδηγεί σε πιθανές λειτουργικές καταστάσεις $[T, \omega]$ για τις οποίες είναι γνωστή η συμπεριφορά της μηχανής ως προς την απόδοση και τα αρμονικά φαινόμενα.

Το αντικείμενο μελέτης του παρόντος κεφαλαίου είναι η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας η οποία θα έχει ως είσοδο την απαιτούμενη λειτουργική κατάσταση ροπής και ταχύτητας $[T, \omega]$ της μηχανής σε κάθε χρονική στιγμή ενός κύκλου οδήγησης και θα επιστρέφει το σημείο λειτουργίας (πυκνότητα ρεύματος, γωνία ρευμάτων- $[J, \delta]$) για το οποίο η μηχανή έχει την μέγιστη απόδοση ενώ παράλληλα διατηρεί τις ελάχιστες δυνατές τιμές κυμάτωσης ροπής και συντελεστή THD% με παράλληλο περιορισμό της τάσης στο ανώτερο όριο που επιβάλλει η διάταξη των ηλεκτρονικών ισχύος.



Σχήμα 6.1. Επισκόπηση προβλήματος βελτιστοποίησης

6.2. Αναγωγή σε πρόβλημα συνδυαστικής βελτιστοποίησης

Ένα στιγμιότυπο ενός προβλήματος συνδυαστικής βελτιστοποίησης είναι ένα ζεύγος $\langle S, f \rangle$, όπου S είναι ένα πεπερασμένο σύνολο λύσεων και $f: S \rightarrow R$ μία συνάρτηση κόστους των λύσεων (που πρέπει να μεγιστοποιηθεί ή να ελαχιστοποιηθεί). Ζητείται μία λύση $s^* \in S$ τέτοια ώστε

$$f(s^*) \leq f(s), \forall s \in S$$

αν πρόκειται για πρόβλημα ελαχιστοποίησης ή

$$f(s^*) \geq f(s), \forall s \in S$$

αν πρόκειται για πρόβλημα μεγιστοποίησης.

Αντικείμενο τις συνδυαστικής βελτιστοποίησης είναι να βρίσκει την καλύτερη λύση ανάμεσα σε ένα σύνολο λύσεων που ικανοποιούν τους περιορισμούς του προβλήματος. Οι γενικές μέθοδοι επίλυσης τέτοιου είδους προβλημάτων μπορούν να περιλαμβάνουν ακριβείς (exact) αλγόριθμους, τοπική αναζήτηση και προσεγγιστικούς (approximation) αλγόριθμους. Οι ακριβείς αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση στιγμιότυπων περιορισμένου μεγέθους, το οποίο επηρεάζει το χρόνο εκτέλεσης [22].

Ο στόχος της παρούσας μελέτης για το πρόβλημα βελτιστοποίησης που περιεγράφηκε προηγουμένως είναι να επιλεγεί η καλύτερη λύση $[J, \delta]$ που για δεδομένη ταχύτητα θα χαρακτηρίζεται από μέγιστη απόδοση ($\eta\%$), ελάχιστη κυμάτωση ροπής ($T_{ripple}\%$) και ελάχιστη αρμονική παραμόρφωση της τάσης ($THD\%$) υπό τον περιορισμό $EMF \leq 90V$.

Συνεπώς θα πρέπει ο στόχος αυτός να εκφραστεί σε μία αντικειμενική συνάρτηση (ή αλλιώς συνάρτηση κόστους). Γίνεται η επιλογή το πρόβλημα αυτό να είναι πρόβλημα ελαχιστοποίησης όπου είναι επιθυμητή η ελαχιστοποίηση:

- του λόγου των συνολικών απωλειών σε σχέση με την τιμή αναφοράς στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας
- του ποσοστού αρμονικής παραμόρφωσης $THD\%$
- του ποσοστού κυμάτωσης ροπής $T_{ripple}\%$

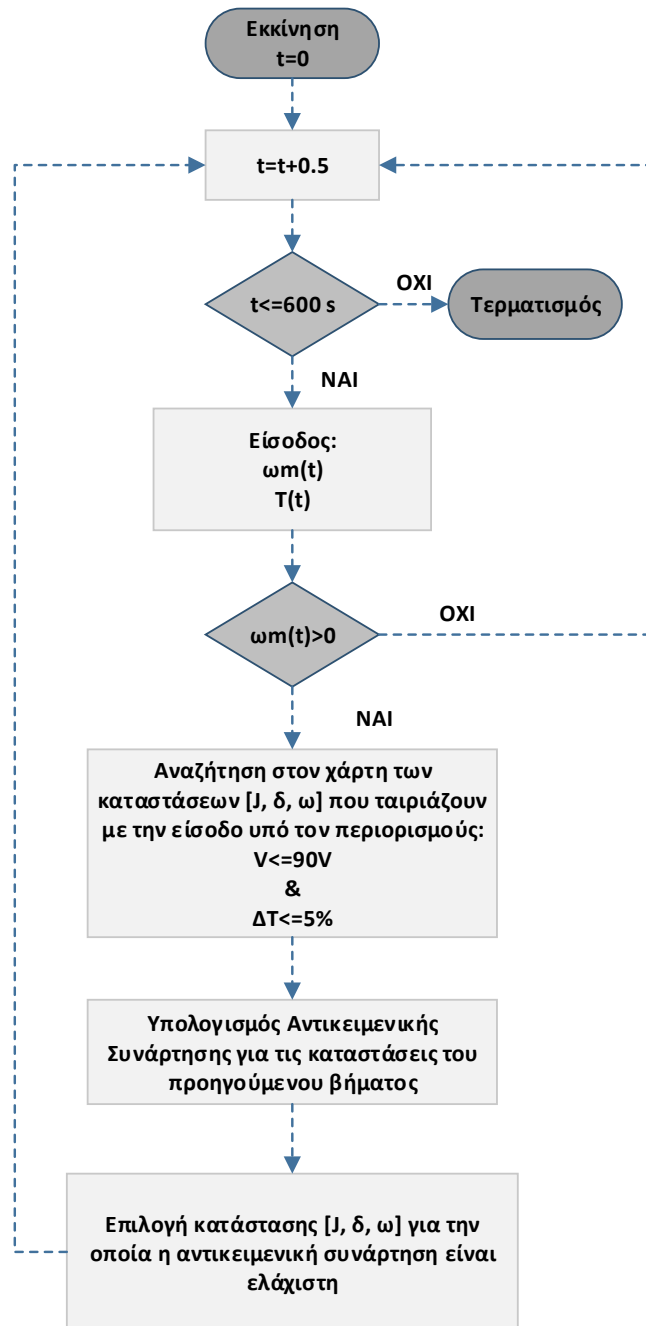
Συνεπώς η αντικειμενική συνάρτηση θα έχει τη μορφή:

$$f(s) = w_1 * (P_{losses}/P_{losses_{Nominal}}) + w_2 * THD(s) + w_3 * T_{ripple}(s) \quad (6.1)$$

Όπου w_1 , w_2 και w_3 είναι τα βάρη που μας δίνουν το δικαίωμα επιλογής για το ποιο από τα μεγέθη πρέπει να παίζει σημαντικότερο ρόλο στην συνάρτηση ελαχιστοποίησης.

Θεωρώντας πιο σημαντικό την απόδοση της μηχανής στο τελικό αποτέλεσμα, θέτουμε τα βάρη της συνάρτησης ως εξής:

$$f(s) = 0.5 * (P_{losses}/P_{losses_{Nominal}}) + 0.25 * THD(s) + 0.25 * T_{ripple}(s) \quad (6.2)$$



Σχήμα 6.2. Σχηματικό διάγραμμα αλγόριθμου βελτιστοποίησης

Έτσι αν ο αλγόριθμος δέχεται σαν είσοδο για παράδειγμα το σημείο λειτουργίας $T=120 \text{ Nm}$ σε ταχύτητα 50 km/h , όπου τα 50 km/h μπορούν να μεταφραστούν σε 210 rad/s ή 2000 ΣΑΛ μηχανικής ταχύτητας στροφής, αναζητάει τα ζευγάρια $[J, \delta]$ τα οποία μπορούν να φέρουν τη μηχανή σε αυτό το σημείο λειτουργίας.

J	I _{rms}	δ	Torque	Tripple	Cu losses	Core Losses	ω	Losses	V	THDv	Objective Function
[MA/m ²]	[A]		[Nm]	%	[W]	[W]	(rad/s)	%	[V]	%	
4,5	86,0	65	116,1	10,7%	281,8	108,6	210	1,6%	57,0	7,2%	0,5198
4,5	86,0	70	123,6	12,4%	281,8	100,7	210	1,4%	54,3	10,0%	0,5214
4,5	86,0	75	123,1	16,9%	281,8	85,0	210	1,4%	49,9	15,6%	0,5278
5,0	95,5	80	119,6	21,0%	347,9	71,9	210	1,6%	43,3	25,8%	0,6279
5,5	105,1	60	122,8	9,5%	421,0	123,0	210	2,1%	61,0	7,0%	0,7033
6,5	124,2	55	118,2	12,2%	588,0	133,0	210	2,8%	63,6	7,9%	0,9277
7,0	133,7	55	124,5	12,6%	681,9	135,5	210	3,0%	64,2	8,6%	1,0477

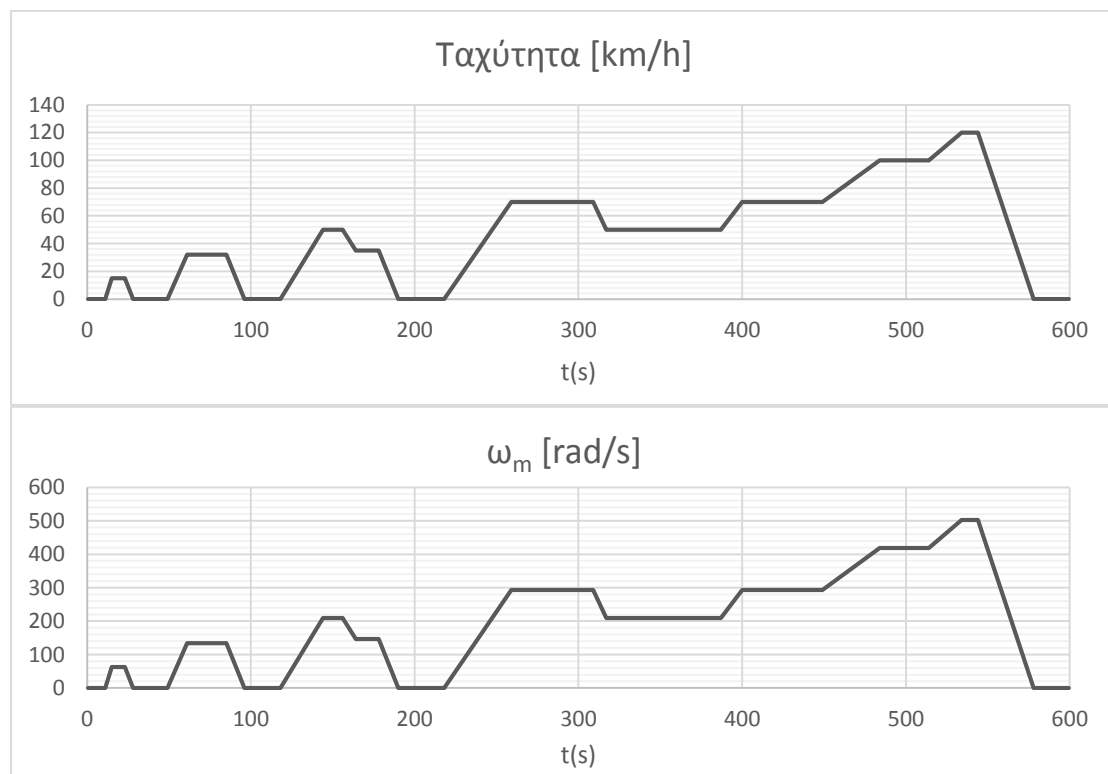
Από τα παραπάνω ζευγάρια ο αλγόριθμος θα επιλέξει το $J=4.5$, $\delta=65^\circ$ και $\omega=213,63$ γιατί ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση.

Κατά τον ίδιο τρόπο ο αλγόριθμος εφαρμόζεται για κάθε σημείο $[T, \omega]$ στην χρονοσειρά ταχύτητας ενός κύκλου οδήγησης και στο τέλος καταλήγει σε μία χρονοσειρά λειτουργικών επιλογών $[J, \delta]$ όπως φαίνεται και στο σχηματικό διάγραμμα της εικόνας 6.2.

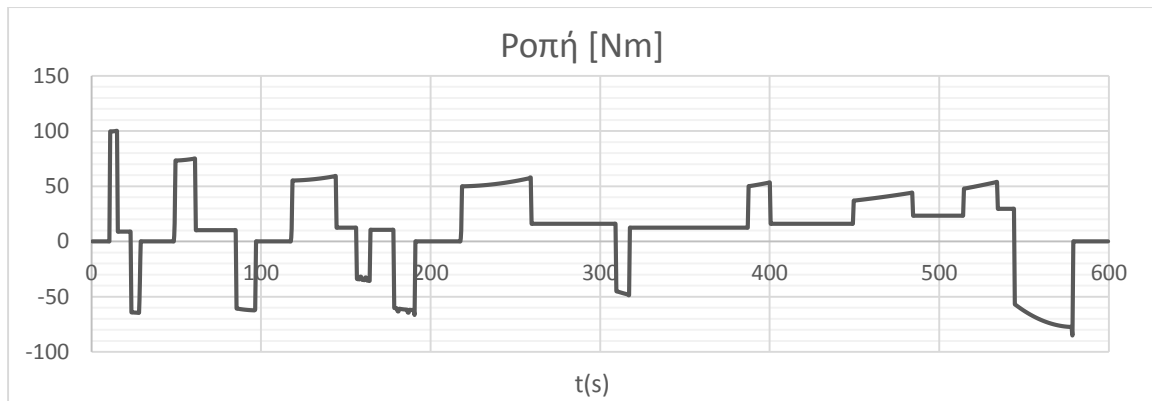
6.3 Αποτελέσματα αλγορίθμου αναζήτησης βέλτιστης λύσης για είσοδο τον NEDC

Χρησιμοποιείται σαν είσοδος ένα κομμάτι του αστικού κύκλου που επαναλαμβάνεται 3 φορές στον κανονικό NEDC και το τμήμα του υπεραστικού κύκλου. Σύμφωνα με το μοντέλο ροπής- ταχύτητας, η απαίτηση Ροπής για το όχημα που εξετάζεται φαίνεται στο σχήμα 6.4.

Συνεπώς, η είσοδος του ελέγχου διαμορφώνεται ως εξής:

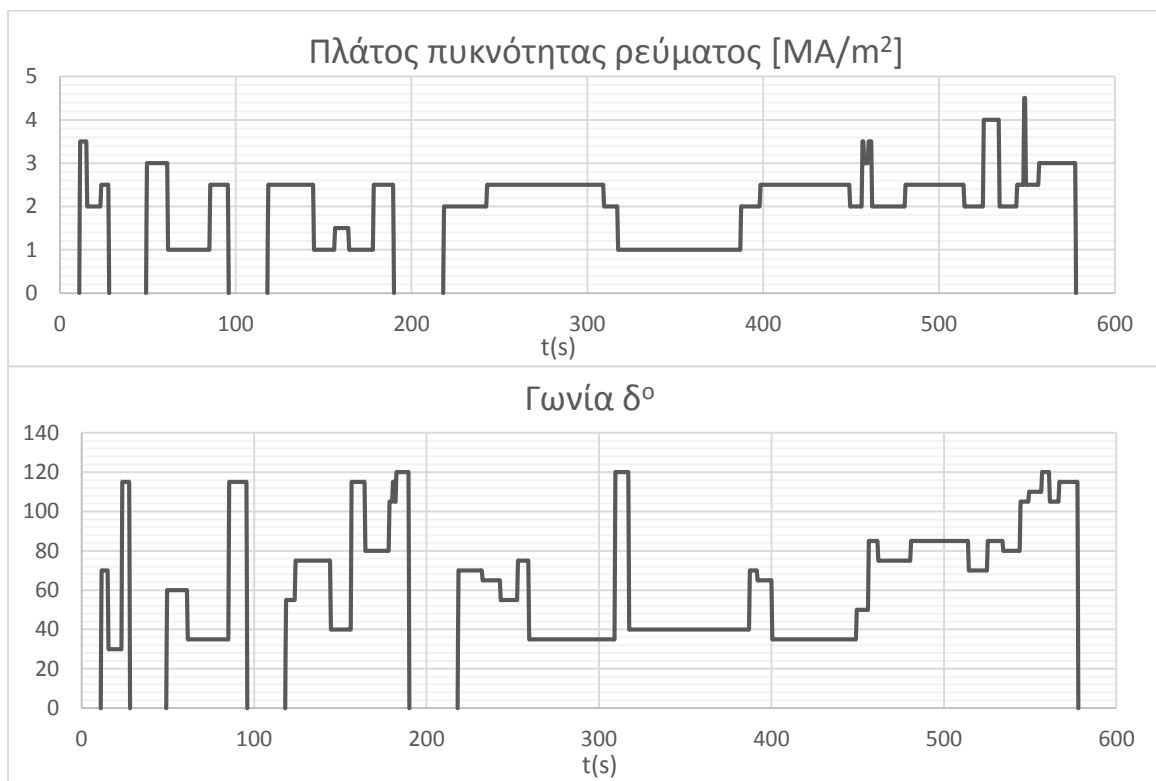


Σχήμα 6.3. Είσοδος ταχύτητας και μηχανικής ταχύτητας στροφής



Σχήμα 6.4. Είσοδος απαίτησης ροπής από μοντέλο Ροπής – Ταχύτητας

Ενώ τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του αλγορίθμου είναι:



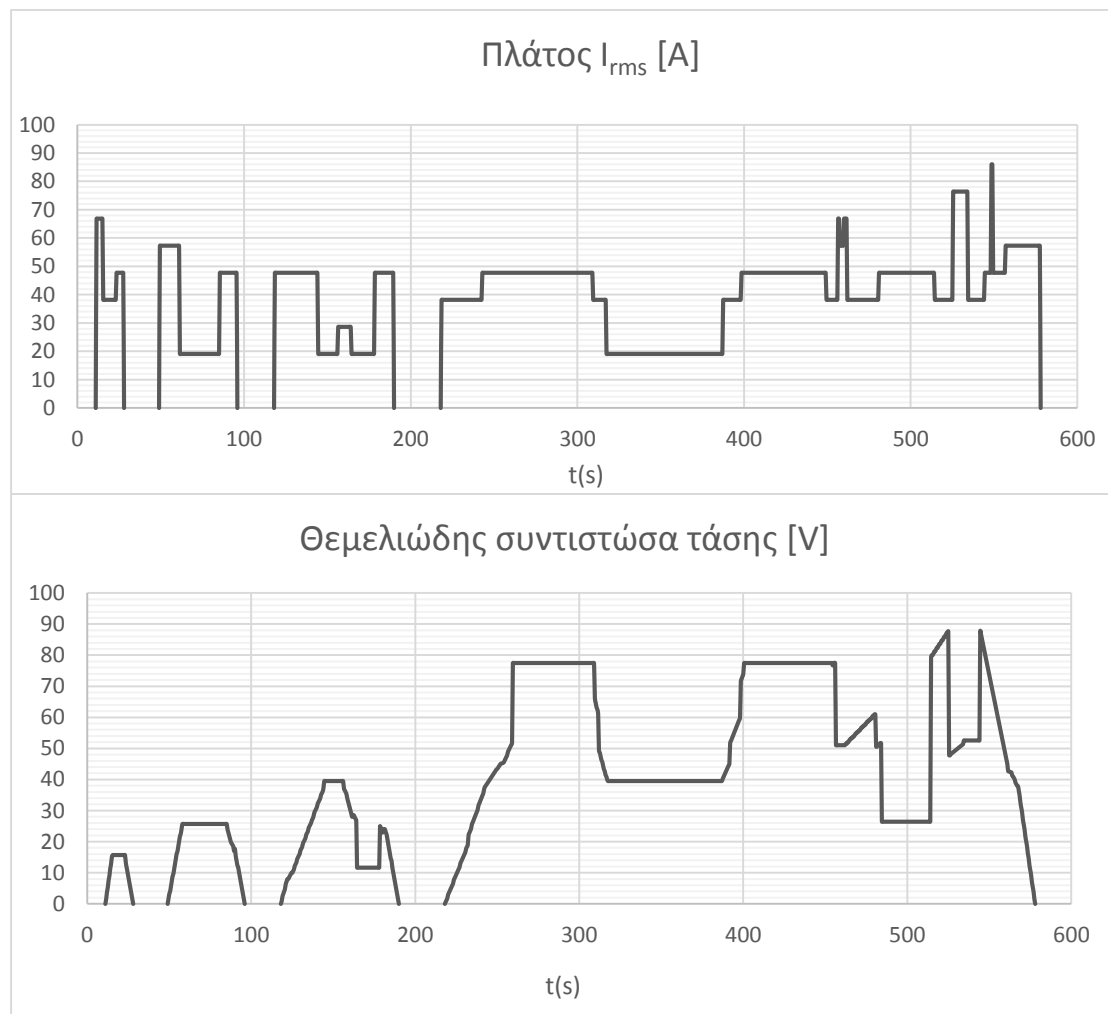
Σχήμα 6.5. Πυκνότητα ρεύματος, και γωνία ρεύματος στάτη ως προς d άξονα αναφοράς (γωνία δ)

Γενικά παρατηρείται ότι όταν η ταχύτητα είναι μικρότερη της ταχύτητας βάσης το ρεύμα ακολουθεί την αύξηση της ροπής και οδηγείται σε γωνίες δ μέγιστης ροπής για την αντίστοιχη τιμή της πυκνότητας ρεύματος. Μία απότομη επιτάχυνση οδηγεί σε απότομη αύξηση της ροπής και συνεπώς του ρεύματος.

Όταν σταθεροποιείται η ταχύτητα η ροπή μειώνεται σημαντικά καθώς καλείται να υπερνικήσει αποκλειστικά τις δυνάμεις τριβής και αεροδυναμικής αντίστασης που αντιτίθενται στην κίνηση. Ακολούθως, η τιμή του ρεύματος μειώνεται και αντίστοιχα η γωνία δ προσαρμόζεται στη νέα γωνία μέγιστης ροπής για την αντίστοιχη τιμή της πυκνότητας ρεύματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω μη γραμμικοτήτων, η γωνία μέγιστης ροπής αυξάνεται με την αύξηση της τιμής του ρεύματος.

Αντίστοιχα κατά την επιβράδυνση η πυκνότητα ρεύματος ακολουθεί την αύξηση του μέτρου της ροπής και η γωνία δ όπως είναι αναμενόμενο είναι αρνητική. Επιπλέον, η γωνία δ είναι η αντίστοιχη γωνία μέγιστης κατά μέτρο ροπής για λειτουργία γεννήτριας.

Είναι αξιοσημείωτο ότι ο αλγόριθμος ελέγχου οδηγεί τον κινητήρα σε λειτουργία εξασθένισης πεδίου όταν η ταχύτητα υπερβαίνει την ταχύτητα βάσης και ωθείται σε αυτήν την λειτουργική επιλογή λόγω του περιορισμού της τάσης. Αυτό συμβαίνει είτε υπό επιτάχυνση είτε υπό επιβράδυνση και η γωνία δ οδηγείται πολύ κοντά και εκατέρωθεν κατά περίπτωση στην γωνία $\delta=90^\circ$.



Σχήμα 6.6. Πυκνότητα ρεύματος, I_{rms} (πλάτος ημιτονικής εισόδου) και θεμελιώδης συνιστώσα επαγόμενης τάσης

Η rms τιμή του ρεύματος είναι ανάλογη με την πυκνότητα ρεύματος που επιβάλλεται στα τυλίγματα συνεπώς μεταβάλλεται κατά τον ίδιο τρόπο που μεταβάλλεται και η πυκνότητα ρεύματος.

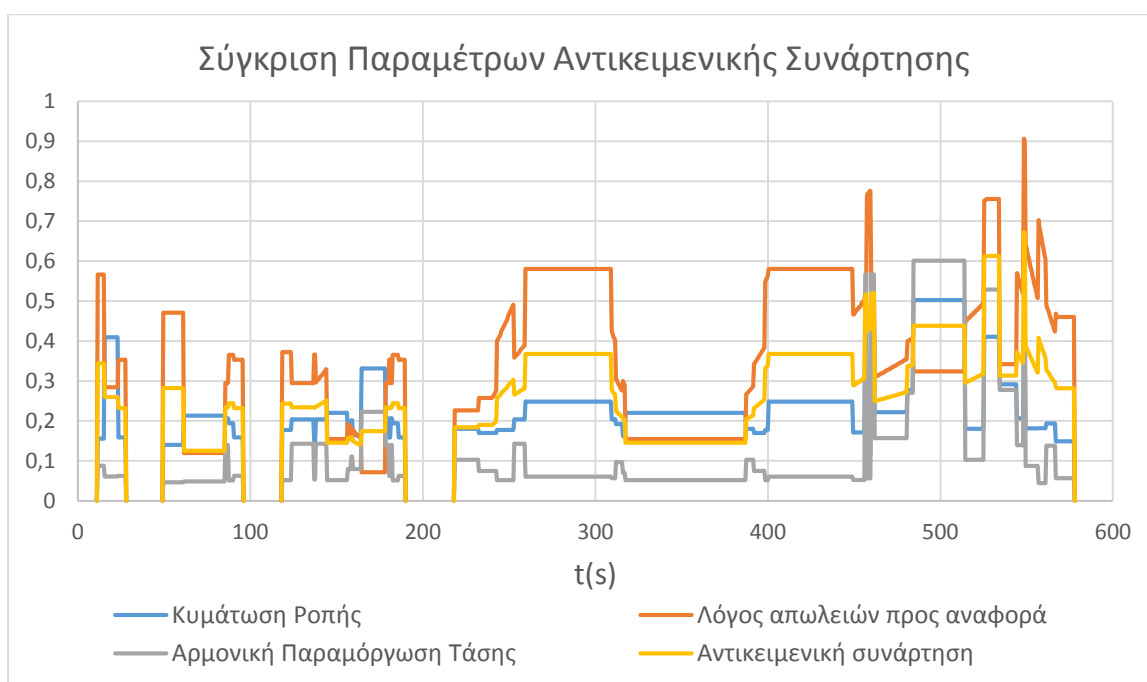
Η επαγόμενη τάση αυξομειώνεται ανάλογα και σχεδόν γραμμικά με την ταχύτητα και σταθεροποιείται όταν είναι σταθερή, ενώ φτάνει τις μέγιστες τιμές της στα σημεία

που έχουμε επιτάχυνση σε ταχύτητες μεγαλύτερες από την ταχύτητα βάσης και λειτουργία εξασθένησης πεδίου.



Σχήμα 6.7. Άθροισμα ισχύος διακένου και συνολικών απωλειών

Όπως είναι αναμενόμενο, κατά την επιβράδυνση η ροπή γίνεται αρνητική και συνεπώς και η ισχύς στο διάκενο, κατά σύμβαση λειτουργίας γεννήτριας. Έτσι, επιστρέφει στο σύστημα κίνησης ηλεκτρική ενέργεια φορτίζοντας τις μπαταρίες (αναγεννητική πέδηση).



Σχήμα 6.8. Διαμόρφωση αντικειμενικής συνάρτησης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης στον κύκλο οδήγησης

Όπως έχει επιλεχθεί από την αντικειμενική συνάρτηση, ο όρος των απωλειών επηρεάζει περισσότερο την επιλογή της λύσης που πραγματοποιεί ο αλγόριθμος αναζήτησης. Κατά τη διάρκεια του ελέγχου η κυμάτωση ροπής διατηρείται και χαμηλές τιμές όπως και ο συντελεστής παραμόρφωσης της τάσης στα περισσότερα διαστήματα ιδιαίτερα όπου η ταχύτητα είναι χαμηλότερη της ταχύτητας βάσης και η μηχανή δεν έχει εισέρθει στην περιοχή εξασθένησης πεδίου. Αντίθετα, στα σημεία

που έχουμε αυξημένη απαίτηση ροπής και υψηλή ταχύτητα ο κινητήρας οδηγείται από τον αλγόριθμο σε λειτουργία εξασθένησης (π.χ. στο χρονικό διάστημα 479s έως 514s) όπου ενώ το ρεύμα είναι κοντά στην ονομαστική τιμή και οι απώλειες χαλκού είναι κοντά στις ονομαστικές, οι απώλειες πυρήνα είναι πολύ χαμηλότερες στις περιοχές εξασθένησης (σχήμα 5.16) και οι συνολικές απώλειες είναι χαμηλότερες των ονομαστικών ενώ οι όροι κυμάτωσης ροπής και αρμονικής παραμόρφωσης παίρνουν αρκετά μεγαλύτερες τιμές και οδηγούν σε αύξηση της αντικειμενικής συνάρτησης.

7. Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε η ανάλυση και η χαρτογράφηση λειτουργίας ενός πεδιακού μοντέλου σύγχρονης μηχανής με εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες ενώ επιχειρήθηκε μοντελοποίηση της απόκρισης της απαιτούμενης ροπής σε μεταβολές ταχύτητας για κινούμενο όχημα. Στη συνέχεια, υλοποιήθηκε ένας αλγόριθμος συνδυαστικής βελτιστοποίησης που αναζητά τη βέλτιστη πεδιακή τροχιά της μηχανής κατά την οδήγησή της στον Νέο Ευρωπαϊκό Κύκλο Οδήγησης με βάση τον λειτουργικό χάρτη του πεδιακού μοντέλου της μηχανής.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παραπάνω ανάλυση είναι:

- Σύμφωνα με το μοντέλο Ροπής-Ταχύτητας, η ροπή αυξάνεται στιγμιαία σε απότομες αλλαγές της ταχύτητας ενώ για μηδενική επιτάχυνση διατηρεί χαμηλή τιμή, όσο δηλαδή απαιτείται για να υπερνικήσει την αεροδυναμική αντίσταση και την αντίσταση κύλισης που αντιτίθενται στην κίνηση.
- Οι απώλειες πυρήνα ελαχιστοποιούνται σε περιοχές έντονης εξασθένησης πεδίου.
- Η γωνία όπου η ροπή στο διάκενο μεγιστοποιείται δεν είναι σταθερή ανά φόρτιση, αλλά όσο αυξάνεται η πυκνότητα ρεύματος η γωνία αυτή μετατοπίζεται όλο και περισσότερο κοντά στην γωνία $\delta=90^\circ$ περιορίζοντας το φάσμα γωνιών για τις οποίες το πεδίο του μαγνήτη εξασθενεί. Έτσι η μετάβαση από την Μέγιστη Ροπή στην έντονη εξασθένηση είναι πολύ απότομη για υψηλή πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα. Αυτό είναι ένα παράδειγμα μη γραμμικότητας που οι κυκλωματικές εξισώσεις αδυνατούν να προβλέψουν με ακρίβεια.
- Στις ακραίες γωνίες $\delta=0^\circ$ και $\delta=90^\circ$ όπου το πεδίο εξασθενεί τα αρμονικά φαινόμενα όπως η κυμάτωση ροπής και ο συντελεστής αρμονικής παραμόρφωσης της επαγόμενης τάσης μεγιστοποιούνται.
- Το πεδιακό μοντέλο μίας μηχανής με εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες προσφέρει πιστότητα ως προς τις μαθηματικές πεδιακές εξισώσεις ενώ υπερτερεί αυτών ως προς την ακρίβεια υπολογισμού μη γραμμικοτήτων και αρμονικών φαινομένων χώρου.
- Η ακρίβεια της χαρτογράφησης ενός πεδιακού μοντέλου είναι πλέον εφικτή με κριτήριο το χρόνο προσομοίωσης για τα σύγχρονα υπολογιστικά συστήματα (104040 σημεία λειτουργίας σε 5 ημέρες και 6 ώρες με παραλληλοποίηση επεξεργασίας σε υπολογιστικό σύστημα προδιαγραφών: επεξεργαστής i7, συχνότητα 3.7GHz, RAM 32GB).
- Η επαγόμενη τάση στα άκρα του στάτη εξαρτάται μη γραμμικά από το πεδιακό στιγμιότυπο και γραμμικά από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Η τάση φαίνεται να ελαχιστοποιείται γύρω από τις περιοχές εξασθένησης πεδίου ($\delta=90^\circ$) γεγονός που επιτρέπει την οδήγηση του κινητήρα σε υψηλές στροφές με τήρηση του περιορισμού της τάσης που θέτουν οι διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος.
- Το φάσμα των γωνιών στο οποίο λαμβάνει χώρα η εξασθένηση πεδίου χαρακτηρίζεται από υψηλή απόδοση καθώς οι απώλειες πυρήνα ελαχιστοποιούνται.

- Σε ταχύτητες μικρότερες της ταχύτητας βάσης ο αλγόριθμος βέλτιστης αναζήτησης οδηγεί τον κινητήρα σε γωνίες μέγιστης ροπής ανά φόρτιση, όπου το μέτρο του ρεύματος είναι σταθερό και ανάλογο της απαίτησης ροπής ενώ η τάση αυξάνεται ακολουθώντας την αύξηση της ταχύτητας, γεγονός που είναι σύμφωνο με τις παγιωμένες πρακτικές ελέγχου ηλεκτρικών μηχανών.
- Σε ταχύτητες μεγαλύτερες της ταχύτητας βάσης ο έλεγχος οδηγεί τον κινητήρα σε λειτουργία εξασθένησης πεδίου για να ικανοποιήσει τον περιορισμό τάσης ενώ παρατηρείται, ότι όσο πιο έντονη η εξασθένηση του πεδίου, όσο πιο κοντά δηλαδή η γωνία δ προσεγγίζει τις 90° τόσο μεγαλύτερη είναι η επαγόμενη ροπή στο διάκενο της μηχανής σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής.

Τα κύρια σημεία επιστημονικής συνεισφοράς της παρούσας εργασίας είναι:

- Ανάπτυξη μοντέλου Ταχύτητας – Απαίτησης Ροπής σε κινούμενο όχημα και εφαρμογή του σε κύκλο οδήγησης και συγκεκριμένα στον Νέο Ευρωπαϊκό Κύκλο Οδήγησης που αποτελεί καλή προσέγγιση οδηγικής συμπεριφοράς για μικρά οχήματα πόλης
- Ανάπτυξη μεθοδολογίας χαρτογράφησης σύγχρονων μηχανών με εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες
- Πρόταση αλγόριθμου βέλτιστης οδήγησης σε κύκλο πόλης με δεδομένη χαρτογράφηση πολλών λειτουργικών σημείων

Στη συνέχεια παρατίθενται ορισμένες προτάσεις, για περαιτέρω διερεύνηση:

- Δημιουργία δυναμικού μοντέλου ανάλυσης με ακριβέστερο υπολογισμό των αυτεπαγωγών των d , q αξόνων ώστε να λαμβάνονται υπόψιν μη γραμμικά φαινόμενα κορεσμού (saturation) και σύζευξης (cross-coupling effect).
- Εφαρμογή αλγορίθμου αναζήτησης βέλτιστης αναζήτησης σε δυναμικό μοντέλο.
- Εφαρμογή αλγορίθμου βέλτιστης οδήγησης σε πολλαπλά σημεία λειτουργίας στη φάση της σχεδίασης κινητήρα, πραγματοποιώντας συνδυαστική βελτιστοποίηση σε μία λειτουργική τροχιά των συχνότερων καταστάσεων λειτουργίας σε κύκλο πόλης.

Βιβλιογραφία:

- [1] Γιώργος Εμμανουηλίδης, “Ηλεκτρικά Αυτοκίνητα”, Ιούλιος 2011.
- [2] M. Ehsani, Y.Gao, A. Emadi, “*Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*”, CRC Press, 2010.
- [3] J. Larminie, J. Lowry, “*Electric Vehicle Technology Explained*”, WILEY, 2003.
- [4] Thomas D. Gillespie, “*Fundamentals of Vehicle Dynamics*”, Warrendale, Pa., USA: 1992.
- [5] Ιστοσελίδα: <http://www.iea.org/etp/tracking2015>
- [6] Ιωάννης-Αντώνιος Ντουσάκης, “*Διερεύνηση της συμμετοχής των Ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας σε μη διασυνδεδεμένα συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*”, Ιούλιος 2013.
- [7] T J Barlow, S Latham, I S McCrae, P G Boulter, “*A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions*”, June 2009.
- [8] Sandeep Dhameja, “*Electric Vehicle Battery Systems*”, Boston, 2001, Newness.
- [9] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, “*Power Electronics*”, John Wiley & Sons Inc, 1995.
- [10] Aimeng Wang, “*Influence of skewed and segmented magnet rotor on IPM machine performance and ripple torque for electric traction*”. Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International.
- [11] Wen L. Soong, Member, IEEE, and Nesimi Ertugrul, Member, IEEE, “*Field-Weakening Performance of Interior Permanent-Magnet Motors*”.
- [12] Adina Muntean, M.M. Radulescu and A. Miraoui, “*Torque Analysis and Control of a Double - Layer Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Propulsion Applications*”.
- [13] Neodymium magnet: History and manufacturing techniques. Wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Neodymium_magnet
- [14] Shinn-Ming Sue, Member, IEEE, and Ching-Tsai Pan, Member, IEEE, “*Voltage-Constraint-Tracking-Based Field-Weakening Control of IPM Synchronous Motor Drives*”.
- [15] Muhammed Fazlur Rahman, Senior Member, IEEE, L. Zhong, and Kiang Wee Lim, Senior Member, IEEE, “*A Direct Torque-Controlled Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Incorporating Field Weakening*”.
- [16] Liang Fang, “*Study on High-Efficiency Performance in Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor with Double-Layer PM Design*”, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 44, NO. 11, NOVEMBER 2008.
- [17] Juha Pyrhonen, “*Design of rotating electrical machines*”, 2008, Wiley

- [18] Γεώργιος Αλπογιάννης, “Σχεδίαση και οδήγηση κινητήρα εσωτερικών μονίμων μαγνητών διπλής στρώσης για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης”, Οκτώβριος 2013
- [19] Αναστάσιος Γ. Βήχος, “Σχεδίαση και βελτιστοποίηση κινητήρα μονίμων μαγνητών για εφαρμογή ηλεκτροκίνησης”, 2009
- [20] Y.-K Chin, J. Soulard, “*Modeling of iron losses in permanent magnet synchronous motors with field-weakening capability for electric vehicles*”, International Journal of Automotive Technology, Vol. 4, No. 2, pp. 87-94, 2003
- [21] Nicola Bianchi, “*Electrical machine analysis using finite elements*”
- [22] Β. Ζησιμόπουλος, “Συνδυαστική Βελτιστοποίηση”, Ιανουάριος 2007
- [23] <https://www.smart.com/gr/el/index/smart-fortwo-electric-drive.html>
- [24] Αθανάσιος Μανωλάς, “Προσομοίωση ηλεκτρικού οχήματος με το λογισμικό Matlab/Simulink”, 2012
- [25] Χρήστος Κρασόπουλος, “Σχεδίαση και κατασκευή κινητήρα μόνιμων μαγνητών για πρότυπο ηλεκτρικό όχημα”, 2014
- [26] Seong Taek Lee, “*Development and Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor with Field Excitation Structure*”, 2009
- [27] Peter O. Rasmussen, Torben N. Matzen, “*Torque Control in Field Weakening Mode*”, 2009
- [28] James Goss, Mircea Popescu, Dave Staton, “*A Comparison of an Interior Permanent Magnet and Copper Rotor Induction Motor in a Hybrid Electric Vehicle Application*”, 2004
- [29] Katsumi Yamazaki, Kazuya Kitayuguchi, “*Investigation of Magnet Arrangements in Double Layer Interior Permanent-Magnet Motors*”
- [30] Liang Fang, Jae-woo Jung, Jung-Pyo Hong, Jung-Ho Lee, “*Study on High-Efficiency Performance in Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor With Double-Layer PM Design*”, 2008
- [31] Δημήτριος Γυπαράκης, “Μελέτη και κατασκευή ηλεκτρονικού μετατροπέα με στόχο τον έλεγχο κινητήρα μονίμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης”, 2012
- [32] Bimal K. Bose, “*Modern Power Electronics and A.C. Drives*”, Prentice Hall PTR, 2002
- [33] Αναστάσιος Δούκας, “Σύγκριση Απωλειών Πυρήνα Άμορφου Σιδήρου Και Μαγνητικής Λαμαρίνας Για Εφαρμογές Μηχανών Μονίμων Μαγνητών”, 2012

Παράρτημα

A. Μοντέλο Ροπής-Ταχύτητας σε κινούμενο όχημα υλοποιημένο σε περιβάλλον Matlab/Simulink

