



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

**Σχεδίαση και μελέτη κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής  
αντίστασης για εφαρμογή ηλεκτροκίνησης**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Βασίλειος Παπανικολάου**

**Επιβλέπων :** Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.





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

## Σχεδίαση και μελέτη κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης για εφαρμογή ηλεκτροκίνησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βασίλειος Παπανικολάου

**Επιβλέπων :** Αντώνιος Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 19<sup>η</sup> Ιουλίου 2011.

.....

Αντώνιος Κλαδάς

.....

Στέφανος Μανιάς

.....

Σταύρος Παπαθανασίου

Αθήνα, Ιούλιος 2011

.....  
Βασίλειος Παπανικολάου

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

Copyright © Βασίλειος Παπανικολάου

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.

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν κατά την εκπόνηση της.

Ευχαριστώ θερμά, τον Καθηγητή μου κ. Αντώνιο Κλαδά, για την καθοδήγησή του και την άψογη συνεργασία για την περάτωση της εργασίας, διαφωτίζοντας τις όποιες απορίες μου επί του θέματος της σχεδίασης και λειτουργίας των ηλεκτρικών κινητήρων. Ιδιαίτέρως ευχαριστώ επίσης τον Διδάκτορα κ. Ιάκωβο Μανωλά και τον υποψήφιο Διδάκτορα κ. Κωνσταντίνο Λάσκαρη που πρόθυμα με στήριξαν κατά τη διαδικασία της σχεδίασης.



# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο τη σχεδίαση ηλεκτρικού κινητήρα για εφαρμογή σε ηλεκτροκίνητο όχημα. Τα κύρια χαρακτηριστικά του ζητούμενου κινητήριου συστήματος είναι η υψηλή ταχύτητα περιστροφής (8000 rpm), η μεγάλη απόδοση σε όλο το εύρος λειτουργίας και η υψηλή πυκνότητα ισχύος.

Το πρώτο στάδιο της μελέτης αυτής ήταν η βιβλιογραφική διερεύνηση των ηλεκτρικών κινητήριων συστημάτων σε πρωτότυπα οχήματα αλλά και σε οχήματα παραγωγής. Μετά από μία παρουσίαση της λειτουργίας των ηλεκτροκίνητων οχημάτων έπεται η ανάλυση του κινητήρα ως κύριου αντικείμενου μελέτης αυτής της εργασίας

Ακολουθεί μελέτη της λειτουργίας και των ιδιοτήτων των κινητήρων μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Αρχικά γίνεται προκαταρκτική σχεδίαση με αναλυτικές μεθόδους για τη βασική διαστασιολόγηση του συστήματος. Από τη διαδικασία αυτή επιλέγονται και προκύπτουν βασικές παράμετροι σχεδίασης όπως η τοπολογία, οι διαστάσεις διακένου και άλλα βασικά χαρακτηριστικά. Στη συνέχεια περιγράφονται τα εργαλεία και οι μέθοδοι που θα χρησιμοποιηθούν για την πεδιακή ανάλυση της μηχανής. Πριν το επόμενο στάδιο, που είναι παραμετροποιημένη σχεδίαση χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό τη βελτιστοποίηση της αποδιδόμενης ροπής αλλά και της τελικής απόδοσης της μηχανής, εξετάζεται η πιστότητα του μοντέλου της μηχανής που βασίζεται στο πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων και γίνεται διερεύνηση του βέλτιστου τρόπου σχεδίασης με σκοπό την ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για τη βελτιστοποίηση.

Έπειτα επεξηγείται κάθε βήμα της διαδικασίας και παρουσιάζονται και εκτιμώνται τα αποτελέσματα έτσι ώστε να προκύψουν οι τελικές προδιαγραφές του συστήματος. Τέλος ακολουθεί προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος σε Η\Υ με χρήση του λογισμικού Simulink.

# ABSTRACT

The present thesis undertakes the design procedure of an electric motor for an electric vehicle. In terms of its technical characteristics, the motor presents high rotational speed (8000 rpm), high efficiency for a large operational range and high power density.

In a first step, a bibliographical research of electric motor traction drives in prototype and mass production vehicles was performed. Following a short presentation of the application of electric vehicles, the analysis of the electric motor, as the main component of the present thesis, is undertaken.

A thorough examination of the operating principles and distinct features of the switched reluctance motors is then performed. The design procedure begins with the initial design of the motor by means of corresponding theoretical equations in order to specify basic design features, such as the machine configuration, the air gap dimensions and more. During this study, the computation tools for detailed field analysis are described. Before proceeding to the parametric design analysis in order to maximize torque and motor efficiency, finite element method programs are the means by which validity of the proposed model is ensured and the optimal design procedure is developed, in terms of minimizing computational time during optimization.

Every step of the aforementioned procedure is detailed and the results are presented and evaluated before proceeding to the outline of the final system specifications. Finally, the operation of the motor is simulated by means of the Simulink software.



# Περιεχομενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	13
1.1 Σκοπός της εργασίας .....	13
1.2 Δομή της εργασίας.....	13
ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ.....	15
2.1 Ηλεκτρικά αυτοκίνητα .....	15
2.2 Σύστημα Κίνησης Ηλεκτρικού Αυτοκίνητου .....	16
2.3 Συγκριτική παρουσίαση κινητήρων.....	19
2.4 Μηχανές Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης .....	20
2.5 Βασικά Χαρακτηριστικά SRM.....	22
2.6 Αρχές Λειτουργίας SRM.....	23
ΜΗΧΑΝΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ .....	27
3.1 Κατασκευαστικά υλικά ηλεκτρικών μηχανών .....	27
3.2 Σχεδίαση .....	28
3.2.1 Εξίσωση εξόδου .....	29
3.2.2 Διάμετρος διακένου και ενεργό μήκος.....	33
3.3 Μελέτη απωλειών.....	34
3.3.1 Απώλειες χαλκού.....	34
3.3.2 Απώλειες πυρήνα .....	35
3.4 Πεδιακή Ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία .....	36
3.4.1 Μαγνητοστατικά προβλήματα.....	36
3.4.2 Οριακές Συνθήκες .....	38
3.4.3 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων.....	38
ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ .....	41
4.1 Προδιαγραφές.....	41
4.2 Βασική Διαστασιολόγηση.....	41

4.2.1 Επιλογή Τοπολογίας.....	41
4.2.2 Διαστασιολόγηση Διακένου.....	42
4.3 Παραμετροποιημένη σχεδίαση Femm.....	44
4.2.2 Σχεδίαση Δρομέα.....	45
4.2.3 Σχεδίαση Στατη.....	45
4.2.4 Σχεδίαση Διακένου .....	47
4.2.4.A 1 <sup>ος</sup> τρόπος σχεδιασμού .....	48
4.2.4.B 2 <sup>ος</sup> Τρόπος Σχεδιασμού.....	49
4.2.5 Υπολογισμός ροπής.....	51
4.2.5.A Επικαμπυλιο Ολοκλήρωμα Τανυστή Maxwell στο Διάκενο .....	51
4.2.5.B Χωρικό Ολοκλήρωμα Τανυστή Maxwell στο Διάκενο.....	51
4.2.6 Σύγκριση Αποτελεσμάτων .....	52
4.4 Ανάλυση Ευαισθησίας Ροπής.....	53
ΠΕΔΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ.....	59
5.1 Τελικές Προδιαγραφές.....	59
5.2 Μελέτη Επίδοσης .....	60
5.3 Μελέτη Μαγνητικού Κυκλώματος.....	62
5.4 Απώλειες Χαλκού .....	67
5.5 Απώλειες Πυρήνα.....	68
5.6 Μελέτη Βαθμού Απόδοσης.....	70
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕ SRM ΣΕ Η/Υ.....	73
6.1 Έλεγχος και Οδήγηση SRM .....	73
6.2 Έλεγχος Με Ζώνη Υστέρησης.....	73
6.3 Προσομοίωση Simulink.....	75
6.3.1 Λειτουργία Με Φορτίο Σταθερής Ροπής .....	76
6.3.1 Λειτουργία με Φορτίο Παραβολικής Ροπής.....	80
6.3.2 Προσομοίωση Μονοφασικού Σφάλματος .....	84
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	86
7.1 Συμπεράσματα.....	86

7.2 Σημεία Προαγωγής της Επιστήμης.....	87
7.3 Προτάσεις για Περαιτέρω Διερεύνηση .....	88
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	89



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

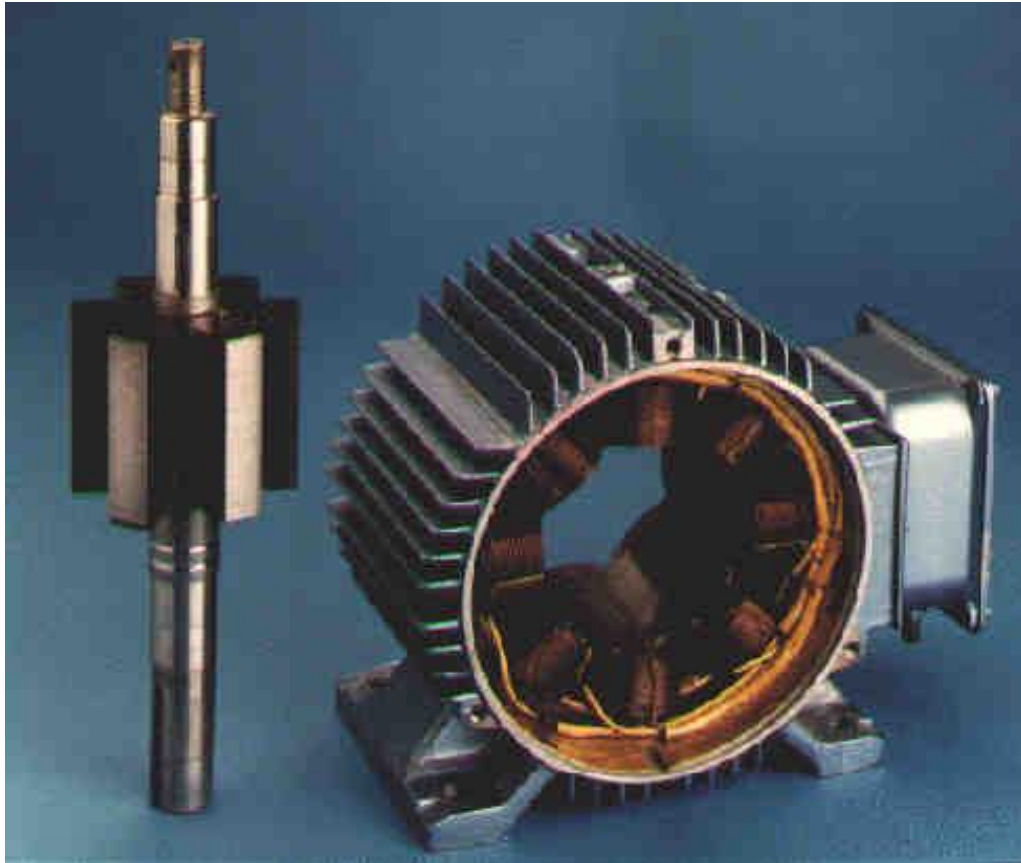
### 1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σχεδίαση και η μελέτη ενός κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (Switched Reluctance Motor -SRM) υψηλής απόδοσης για κινητήριο σύστημα ηλεκτρικού οχήματος. Βασικός στόχος της μελέτης είναι η διερεύνηση των πλεονεκτημάτων αλλά και των αδύναμων σημείων των συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης με SRMs αλλά και η ανάπτυξη προτάσεων που θα τα βελτιώσουν. Αρχικά επιχειρείται η λεπτομερής ανάλυση των πεδιακών φαινομένων που διέπουν τη λειτουργία τους με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων από την οποία προκύπτουν σημαντικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται ως βάση για τον μετέπειτα σχεδιασμό. Η σχεδίαση της μηχανής είναι πλήρως παραμετροποιημένη και υλοποιείται με τη βοήθεια των υπολογιστικών λογισμικών Matlab και femm.

### 1.2 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η δομή της εργασίας αποτυπώνει την διαδικασία σχεδίασης που υιοθετήθηκε. Αρχικά στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η έρευνα σε θέματα ηλεκτροκίνησης με ιδιαίτερη έμφαση σε κινητήρες. Επίσης μελετήθηκαν οι βασικές αρχές λειτουργίας των μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης έτσι ώστε να είναι δυνατός ο μετέπειτα σχεδιασμός. Στη συνέχεια στο κεφάλαιο 3 αναλύεται διεξοδικά η αναγκαία πληροφορία για την εκτέλεση της σχεδίασης ενός ηλεκτρικού κινητήρα, η οποία περιλαμβάνει αναλυτική μελέτη των σχέσεων που διέπουν τη σχεδίαση και τη λειτουργία ηλεκτρικών μηχανών αυτού του τύπου. Το κεφάλαιο 4 αφορά την εφαρμογή των παραπάνω στη σχεδίαση του απαιτούμενου κινητήρα και την βελτιστοποίησή του τελικά ως προς την επίδοση διατηρώντας το βαθμό απόδοσης σε

υψηλά επίπεδα. Στο ίδιο κεφάλαιο, πραγματοποιείται η κατάρτιση των προδιαγραφών και υλοποιείται η προκαταρκτική σχεδίαση, αποτέλεσμα της οποίας είναι τα βασικά χαρακτηριστικά της σχεδιαζόμενης μηχανής. Η οριστική σχεδίαση πραγματοποιείται με βάση την ανάλυση των αποτελεσμάτων και τη συνεχή διόρθωση της αρχικής σχεδίασης με τη βοήθεια πεδιακής ανάλυσης και υπολογιστικών τεχνικών που αναλαμβάνουν τον υπολογισμό της απόδοσης λειτουργίας. Η παρουσίαση των χαρακτηριστικών του προτεινόμενου κινητήρα δίνεται στο τέλος του κεφαλαίου μαζί με την περιγραφή των κριτηρίων και των αποφάσεων που οδήγησαν στην τελική διαμόρφωση της σχεδίασης. Στο κεφάλαιο 5 γίνεται εκτενής μελέτη του μαγνητικού κυκλώματος και των ιδιοτήτων του κινητήρα που σχεδιάστηκε ενώ στο κεφάλαιο 6 ακολουθεί προσομοίωση της λειτουργίας του κινητήρα σε σύστημα ηλεκτρικής κίνησης.



**Εικόνα 1: Μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης 8-6**

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

### 2.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ

Μέχρι στιγμής η μεγάλη πλειοψηφία των ιδιωτικών μέσων μετακίνησης βασίζεται σε μηχανές εσωτερικής καύσης. Το διαρκώς αυξανόμενο κόστος όμως των υδρογονανθράκων σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες περιβαλλοντικές ανησυχίες έχει οδηγήσει στη στροφή προς τα ηλεκτρικά οχήματα. Μέχρι στιγμής η ηλεκτροκίνηση περιορίζεται σε ορισμένα μέσα μεταφοράς (ηλεκτροκίνητα τρένα, τρόλεϊ) που τροφοδοτούνται απευθείας από το δίκτυο ηλεκτροδότησης. Εκτός λοιπόν από τον μεγάλο βαθμό απόδοσης που διαθέτει ένα ηλεκτρικό όχημα μεταφέρει επίσης τη διαδικασία παραγωγής ενέργειας για τη μετακίνηση του από το σύστημα κίνησης στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συνεπάγεται δυνατότητα «καθαρής» κίνησης αφού όσο πιο «καθαρά» παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια (ΑΠΕ, φυσικό αέριο) τόσο πιο φιλική προς το περιβάλλον γίνεται και η μετακίνηση. Επίσης συνεπάγεται απεξάρτηση κάθε χώρας από το πετρέλαιο (βενζίνη,diesel) με τα αντίστοιχα φυσικά οικονομικά οφέλη.

Αν και τα περιβαλλοντικά και οικονομικά πλεονεκτήματα της ηλεκτροκίνησης είναι πολύ καιρό γνωστά η εξέλιξη στον τομέα των αυτοκινήτων έχει μείνει πίσω. Βασικότερος λόγος για αυτή την καθυστέρηση είναι η δυσκολία της αποθήκευσης ενέργειας αφού η τεχνολογία των συσσωρευτών και των κυψελών υδρογόνου υπολείπεται και μέχρι προσφάτως δεν ήταν δυνατό να καλύψει τις ανάγκες ενός οχήματος με ικανοποιητική αυτονομία σε λογικό κόστος. Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει μεγάλη πρόοδος στην αποθήκευση ενέργειας με ανεκτό κόστος και έχει αρχίσει η στροφή των μεγάλων κατασκευαστών αυτοκινήτων προς την κατασκευή υβριδικών οχημάτων (ως μεταβατικό στάδιο) αλλά και ηλεκτρικών οχημάτων που χρησιμοποιούν συσσωρευτές.

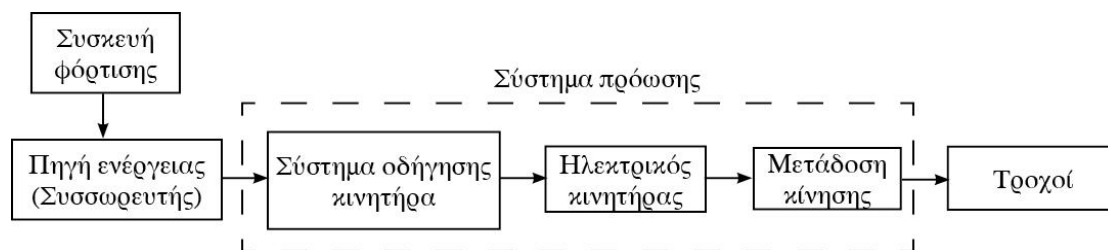
## 2.2 ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΙΝΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- Υβριδικά: οχήματα που διαθέτουν κινητήρα εσωτερικής καύσης σε συνδυασμό με ηλεκτροκινητήρα και συσσωρευτές. Οι συσσωρευτές του οχήματος φορτίζονται από το δίκτυο κατά τη στάθμευση ή αποθηκεύουν ενέργεια μόνο κατά τη λειτουργία του αυτοκινήτου (αναγεννητική πέδηση, φόρτιση από κινητήρα εσωτερικής καύσης) και μπορούν να παρέχουν ενέργεια στον ηλεκτροκινητήρα σε κίνηση σε χαμηλές ταχύτητες ή κατά την έντονη επιτάχυνση. Το ηλεκτρικό σύστημα λοιπόν λειτουργεί ως υποβοήθηση του κυρίως κινητήρα και ωφελεί κυρίως κατά την κίνηση σε χαμηλές ταχύτητες και σε συνθήκες κίνησης αφού διαθέτει υψηλό βαθμό απόδοσης και δεν έχει απώλειες κατά την στάση του οχήματος (ρελαντί).
- Πλήρως ηλεκτρικό όχημα (EV): Το πλήρως ηλεκτρικό όχημα διαθέτει μία πηγή ηλεκτρικής ενέργειας όπως συσσωρευτές ή κυψέλη καυσίμου και για την κίνηση του χρησιμοποιεί μόνο ηλεκτροκινητήρες. Οι συσσωρευτές φορτίζονται από το δίκτυο κατά τη στάση ενώ υπάρχει και η δυνατότητα μερικής φόρτισης τους κατά την πέδηση του οχήματος αφού με κατάλληλο έλεγχο ο κινητήρας λειτουργεί ως γεννήτρια και φορτίζει τους συσσωρευτές.

Ως ηλεκτρικό όχημα στη συνέχεια θα θεωρείται το πλήρως ηλεκτρικό όχημα.

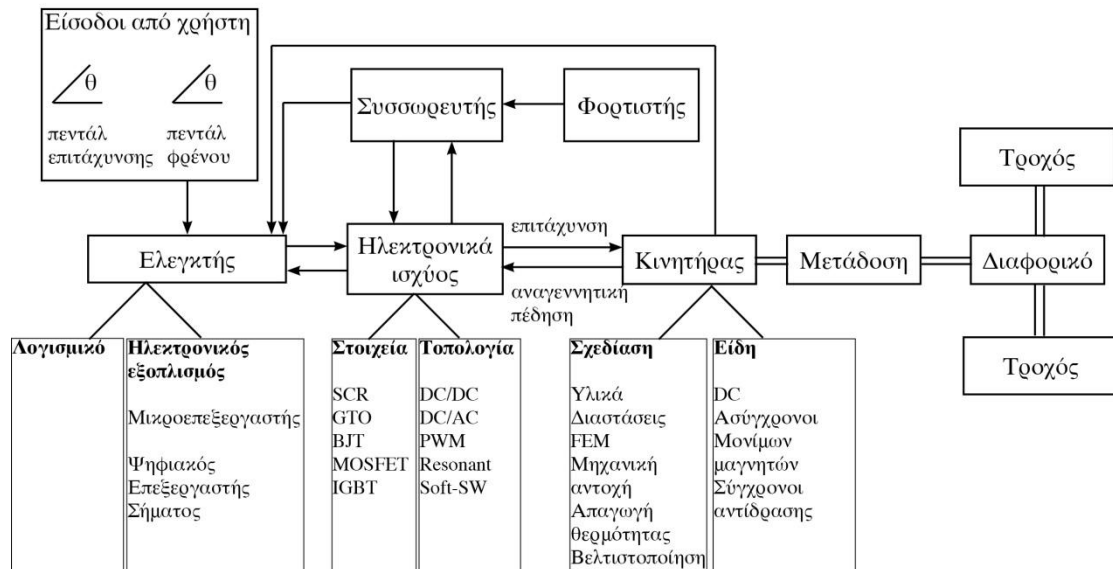
Στην Εικόνα 2 απεικονίζεται σχηματικά το σύστημα ηλεκτρικής κίνησης ενός ηλεκτρικού οχήματος.



Εικόνα 2: Ηλεκτρικό σύστημα κίνησης



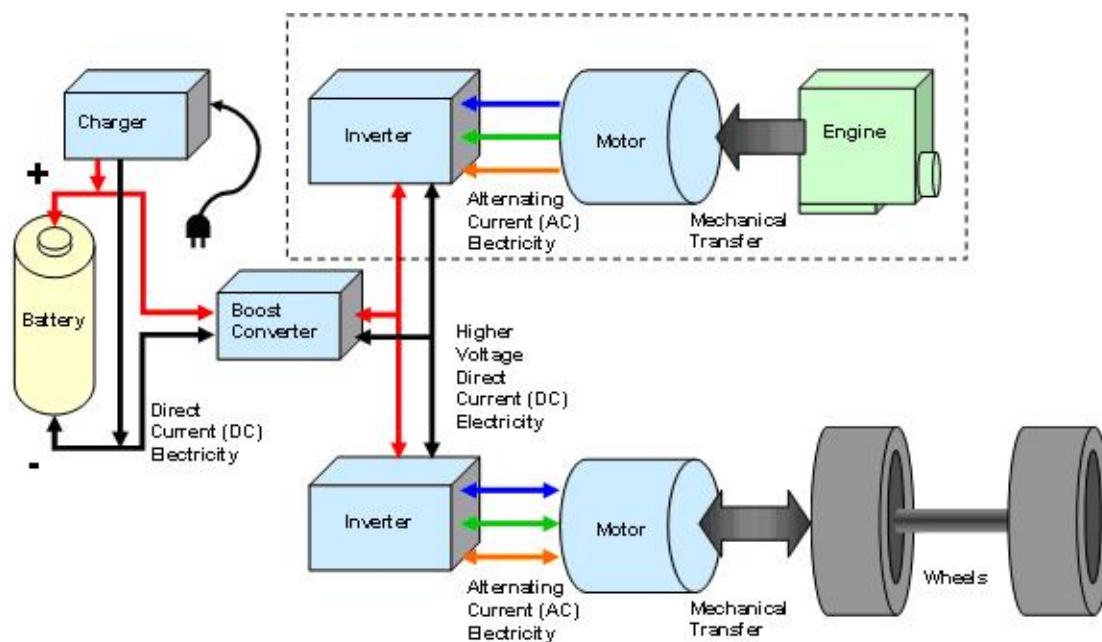
Τα υποσυστήματα αυτού του συστήματος είναι η πηγή ενέργειας, το σύστημα οδήγησης, ένας ή περισσότεροι ηλεκτροκινητήρες και η μετάδοση για καθένα από αυτούς. Στην Εικόνα 3 φαίνεται αναλυτικά η λειτουργία αυτού του συστήματος.



**Εικόνα 3: Ηλεκτρικό σύστημα κίνησης**

Η παραδοσιακή πηγή ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων ήταν οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές, με βασικό τύπο αυτό των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος που προτιμήθηκε λόγω του χαμηλού κόστους και της ανεπτυγμένης τεχνολογίας. Η ανάγκη για βελτιωμένα χαρακτηριστικά οδήγησε στην ανάπτυξη εναλλακτικών ειδών συσσωρευτών, με υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας και δυνατότητα παροχής μεγαλύτερης ισχύος, όπως επίσης με μεγαλύτερο αριθμό κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης. Αναφέρονται ως παράδειγμα, οι συσσωρευτές νικελίου μετάλλου - υδριδίου, ιόντων

λιθίου , λιθίου - πολυμερούς και οι εξελεγμένοι συσσωρευτές μολύβδου - οξέως.



Εικόνα 4: Υβριδικό σύστημα κίνησης

Οι συσσωρευτές χρειάζονται φόρτιση για την κίνηση του οχήματος. Η διάρκεια του κύκλου φόρτισης σε συνδυασμό με την χωρητικότητα ενέργειας του συσσωρευτή είναι καθοριστική παράμετρος. Για να είναι ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο ανταγωνιστικό σε σχέση με τα αντίστοιχα συμβατικά αυτοκίνητα πρέπει να διαθέτει αυτονομία της τάξεως των 400-500km με μία φόρτιση έτσι ώστε να είναι δυνατή η χρήση του πέρα από τα όρια της πόλης και όχι μόνο για καθημερινές διαδρομές. Η αυτονομία αυτή όμως πρέπει να συνδυάζεται ταυτόχρονα με μικρό χρόνο φόρτισης έχοντας υπόψη ότι στα συμβατικά αυτοκίνητα ο χρόνος γεμίσματος της δεξαμενής καυσίμου διαρκεί λιγότερο από 5 λεπτά. Αυτή τη στιγμή τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα της αγοράς διαθέτουν αυτονομία που φτάνει τα 200km σε ιδανικές συνθήκες κίνησης ενώ η φόρτιση τους μπορεί να διαρκεί από 8 ώρες μέχρι και 1 ώρα με fast charge. Είναι φανερό λοιπόν ότι οι στόχοι αυτοί ακόμα δεν έχουν ακόμα επιτευχθεί αλλά με την διαρκή πρόοδο της τεχνολογίας στον τομέα των συσσωρευτών εκτιμάται ότι θα είναι δυνατή η αύξηση της χωρητικότητας των συσσωρευτών και η σημαντική μείωση του κόστους τους.

Ο κινητήρας του ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι σημαντικό υποσύστημα του συστήματος κίνησης και απαιτείται να πληροί προδιαγραφές , μεγέθους, βάρους, κόστους, ακουστικού θορύβου, θερμοκρασιακής και μηχανικής αντοχής. Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται συνήθως σε ηλεκτρικά οχήματα είναι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC), ασύγχρονοι κινητήρες και κινητήρες μονίμων μαγνητών. Σε κάθε περίπτωση η σχεδίαση είναι μια σύνθετη διαδικασία λόγω της αλληλεξάρτησης

παραμέτρων από τις οποίες εξαρτώνται η επίδοση, η απόδοση και το κόστος του κινητήρα και κατά συνέπεια του οχήματος.

Ο ηλεκτρικός κινητήρας οδηγείται από μια μονάδα ηλεκτρονικών ισχύος ελεγχόμενων από μικροεπεξεργαστή ή ψηφιακό επεξεργαστή σήματος. Ο ρόλος αυτής της μονάδας είναι η μετατροπή της συνεχούς τάσης της πηγής ενέργειας σε μεταβαλλόμενη τάση επιθυμητής συχνότητας αναλόγως του σημείου λειτουργίας του οχήματος. Η τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος είναι μια σημαντική παράμετρος στην εξέλιξη συστημάτων κίνησης υψηλής επίδοσης. Τα ηλεκτρονικά ισχύος και το κύκλωμα ελέγχου τείνουν να γίνονται ταχύτερα, αποδοτικότερα και μικρότερα σε μέγεθος. Η ψηφιακή επεξεργασία σήματος επιτρέπει την εφαρμογή σύνθετων αλγορίθμων ελέγχου με μεγάλη ακρίβεια και ταχύτητα.

## 2.3 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Τα ηλεκτρικά οχήματα απαιτούν από το σύστημα κίνησης και τον κινητήρα υψηλή ροπή σε μικρές ταχύτητες, ευρεία περιοχή ταχυτήτων λειτουργίας υπό σταθερή ισχύ, μεγάλη πυκνότητα ισχύος και φυσικά πολύ υψηλή απόδοση αφού η διαθέσιμη ενέργεια (με τη χρήση συσσωρευτών) είναι ιδιαίτερα περιορισμένη.

Ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος επικράτησε στις πρώτες εφαρμογές ηλεκτροκίνησης λόγω της μεγάλης ροπής σε χαμηλές στροφές αλλά και του απλού και εύκολου ελέγχου του. Εφαρμογές που χρησιμοποιούνται ακόμα κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι ηλεκτροκίνητα αστικά τρένα. Βέβαια η αξιοπιστία αυτών των κινητήρων περιορίζεται από την ανάγκη ύπαρξης ψηκτρών στο συλλέκτη για την τροφοδοσία του τυμπάνου της μηχανής. Οι ψήκτρες απαιτούν τακτική συντήρηση ενώ και η ύπαρξη τυλιγμάτων και στα δύο μέρη της μηχανής μειώνει τον τελικό βαθμό απόδοσης.

Ο κινητήρας επαγωγής αποτελεί εναλλακτική επιλογή για ηλεκτροκίνητα οχήματα καθώς έχει χαμηλό κόστος κατασκευής (τύπου κλωβού), εύκολο έλεγχο με 3-φασικό αντιστροφέα και υψηλή αξιοπιστία.

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 αντιστροφέα με δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας για έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής.

Μία ακόμα εναλλακτική επιλογή είναι η χρήση σύγχρονου κινητήρα. Η χρήση σύγχρονης μηχανής βέβαια με τυλιγμένο δρομέα μπορεί να παρέχει μεγάλο βαθμό απόδοσης αλλά ενδείκνυται κυρίως για εφαρμογές παραγωγής ενέργειας και όχι κίνησης αφού το πλεονέκτημα της ρύθμισης της διέγερσης και του συντελεστή ισχύος δεν μπορούν να αντισταθμίσουν το κόστος κατασκευής σε εφαρμογή κίνησης. Έχει αρχίσει λοιπόν να χρησιμοποιείται η σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών η οποία διαθέτει μεγάλη πυκνότητα ισχύος (μικρό μέγεθος μαγνητών) και πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης. Μειονεκτήματα της είναι η αδυναμία λειτουργίας σε πολύ υψηλές θερμοκρασίας λόγω της απομαγνήτισης των μονίμων μαγνητών και η μεγάλη ευαισθησία σε ηλεκτρικά σφάλματα.

Τέλος είναι δυνατή η χρήση κινητήρα μεταβλητής μαγνητικής αντίδρασης (SRM). Η λειτουργία των SRM βασίζεται στην μεταβλητή αντίσταση του μαγνητικού τους κυκλώματος λόγω της εκτυπότητας των πόλων στο στάτη και το δρομέα. Τυλίγματα υπάρχουν μόνο στο στάτη της μηχανής ενώ ο δρομέας κατασκευάζεται μόνο από φύλλα μαγνητικής λαμαρίνας, γεγονός που τον καθιστά ανθεκτικό σε υψηλούς ρυθμούς περιστροφής αλλά και οικονομικό στην κατασκευή. Οι κινητήρες αυτοί διαθέτουν υψηλή ροπή εκκίνησης αλλά και μεγάλη περιοχή μέγιστης ισχύος σε συνδυασμό με πολύ υψηλή αξιοπιστία ακόμα και μετά από κάποιο ηλεκτρικό σφάλμα.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε τύπου ηλεκτρικού κινητήρα.

AC επαγωγής	Συνεχούς ρεύματος	Μονίμων Μαγνητών	SRM
+Χαμηλό κόστος +Υψηλή απόδοση +Μεγάλη ποικιλία έτοιμων λύσεων	+Μεγάλη ροπή σε χαμηλές στροφές +Εύκολος και απλός έλεγχος	+Πολύ υψηλή πυκνότητα ισχύος +Υψηλή απόδοση	+Υψηλή ροπή σε χαμηλές στροφές +Μεγάλη περιοχή μέγιστης ισχύος +Πολύ υψηλή αξιοπιστία
-Χαμηλή ροπή εκκίνησης	-Υψηλό κόστος -Υψηλό Βάρος	-Ευαισθησία σε σφάλματα	-Κυμάτωση ροπής -Ακουστικός θόρυβος

## 2.4 ΜΗΧΑΝΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Οι μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης (Switched Reluctance Machines – SRM) είναι μία από τις πιο ενδιαφέρουσες νέες εφαρμογές στο πεδίο της έρευνας των ηλεκτρικών μηχανών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, στα πλαίσια αυτής της εργασίας, έχει φυσικά η εφαρμογή τους σε συστήματα ηλεκτροκίνησης.

Οι SRMs αποτελούν έναν από τους πρώτους τύπους ηλεκτρικών μηχανών που επινοήθηκαν με τη λειτουργία τους να βασίζεται σε στοιχειώδεις αρχές της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής. Βέβαια, παρά την απλότητα στην κατασκευή και την απλή αρχή λειτουργίας, η οδήγηση μίας SRM δεν είναι καθόλου εύκολη λόγω της μη-γραμμικότητας που χαρακτηρίζει το μαγνητικό της κύκλωμα. Οι εξελίξεις στα ηλεκτρονικά ισχύος και στον έλεγχο έχουν καταστήσει τις μηχανές αυτές ελκυστικές σε ορισμένες εφαρμογές.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα που καθιστούν τη χρήση SRM συμφέρουσα είναι: η απλότητα κατασκευής, η μικρή ροπή αδράνειας του δρομέα, υψηλή ροπή σε μεγάλο εύρος στροφών [10], μεγάλη αξιοπιστία και τελικά χαμηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης. Βέβαια υπάρχουν και σημαντικά μειονεκτήματα που έχουν περιορίσει τη μέχρι στιγμής εφαρμογή τους μόνο σε ειδικές εφαρμογές. Τα κύρια μειονεκτήματα είναι η μη-γραμμικότητα του μαγνητικού κυκλώματος, η μεγάλη διακύμανση της ροπής και ο θόρυβος λειτουργίας. Βέβαια οι τεχνολογικές και ερευνητικές εξελίξεις στον έλεγχο αλλά και το σχεδιασμό έχουν απαλείψει σε μεγάλο βαθμό κάποια από αυτά με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η αξιοποίησή τους σε σύγχρονα ηλεκτρικά οχήματα.

## 2.5 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ SRM

Η δομή μίας μηχανής μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης είναι πολύ απλή. Αποτελείται από δρομέα με έκτυπους πόλους και στάτη με έκτυπους πόλους. Τα τυλίγματα είναι συγκεντρωμένα και τοποθετημένα σε κάθε πόλο του στάτη. Η απλότητα της κατασκευής είναι φανερή αφού ο δρομέας δεν διαθέτει τυλίγματα, ψήκτρες ή μόνιμους μαγνήτες επομένως έχει μεγάλη μηχανική αντοχή και ευκολία στη συναρμολόγηση.

Ο αριθμός πόλων στάτη  $N_s$  και δρομέα  $N_r$  είναι συνήθως άρτιος με  $N_s \neq N_r$ . Συνήθεις συνδυασμοί  $N_s - N_r$  είναι  $12 - 8$ ,  $8 - 6$ ,  $6 - 4$ . Ο διαφορετικός αριθμός πόλων δρομέα και στάτη εξασφαλίζει τη δυνατότητα ανάπτυξης ροπής σε κάθε δυνατή θέση του δρομέα έτσι ώστε να είναι δυνατή η εκκίνηση του. Μεγαλύτερος αριθμός πόλων εξασφαλίζει συνήθως και μικρότερη διακύμανση στη ροπή η οποία είναι σημαντική σε εφαρμογές χαμηλών ταχυτήτων. Μία μηχανή με 6 πόλους στο στάτη είναι τριφασική μηχανή ενώ μια με 8 πόλους είναι τετραφασική με κάθε ζεύγος πόλων να αντιστοιχεί και σε μία φάση. Σε περίπτωση που έχει πχ 12 πόλους, σε κάθε φάση αντιστοιχούν τέσσερα τυλίγματα και η μηχανή είναι τριφασική.

Τα τυλίγματα κάθε φάσης τοποθετούνται σε αντιδιαμετρικούς πόλους με φορά τέτοια έτσι ώστε η ροή που εγκαθιστούν όταν είναι ενεργή η φάση είναι ίδιας φοράς. Η ροή αυτή αναζητά τον ευκολότερο δρόμο για να κλείσει τη διαδρομή της. Επειδή όμως ο δρομέας διαθέτει έκτυπους πόλους η μαγνητική αντίσταση (άρα και η επαγωγή των τυλιγμάτων) που συναντά είναι διαφορετικά ανάλογα με τη θέση του δρομέα. Έτσι λοιπόν δημιουργείται ροπή που τείνει να ευθυγραμμίσει τους πόλους του δρομέα με τους πόλους της ενεργής φάσης του στάτη. Όταν οι πόλοι ευθυγραμμιστούν η ροπή που παράγεται είναι μηδενική και ο ελεγκτής πρέπει να ενεργοποιήσει την επόμενη φάση έτσι ώστε να συνεχιστεί η παραγωγή ροπής.

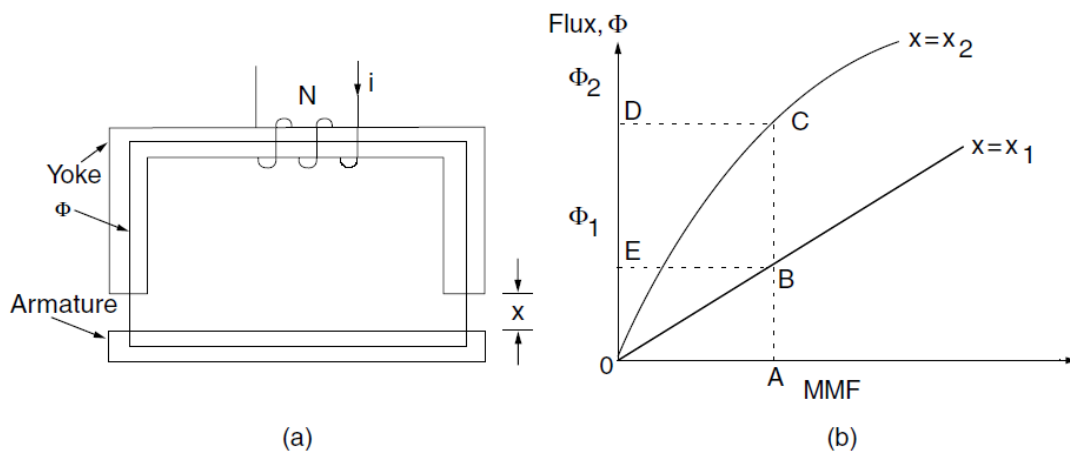
## 2.6 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ SRM

Η παραγωγή ροπής της SRM μπορεί να εξηγηθεί χρησιμοποιώντας τη βασική αρχή ηλεκτρομηχανικής μετατροπής ενέργειας σε ένα πηνίο όπως φαίνεται στην Εικόνα 5α. Το πηνίο διαθέτει  $N$  ελίγματα και όταν διεγερθεί με ρεύμα  $I$  εγκαθιστά στον πυρήνα του ροή  $\Phi$ . Η αύξηση του ρεύματος θα κάνει τον σπλισμό, που απέχει  $x$  από τον πυρήνα του πηνίου, να κινηθεί προς τον πυρήνα. Στην Εικόνα 5b φαίνεται το διάγραμμα μαγνητεγερτικής δύναμης (ΜΕΔ) και μαγνητικής ροής για δύο τιμές  $x_1 > x_2$ . Για  $x = x_1$  η χαρακτηριστική μαγνήτισης είναι γραμμική γιατί επικρατεί η αντίσταση του διακένου οπότε δεν έχει κορεστεί ακόμα ο πυρήνας. Η ενέργεια που προσφέρεται στο σύστημα μπορεί να γραφεί:

$$W_e = \int e i dt = \int i dt \frac{dN\Phi}{dt} = \int N i d\Phi = F d\Phi \quad (3.1)$$

Όπου  $e$  η αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη του τυλίγματος και  $F$  η ΜΕΔ. Η προσφερόμενη ενέργεια  $W_e$  μετατρέπεται σε ενέργεια που αποθηκεύεται στο μαγνητικό κύκλωμα  $W_f$  και σε μηχανική ενέργεια του σπλισμού  $W_m$

$$W_e = W_f + W_m \quad (3.2)$$



Εικόνα 5: Μαγνητικό κύκλωμα με απλή διέγερση και μετακινούμενο σπλισμό

Όταν δεν έχουμε παραγωγή μηχανικού έργου, όπως στην αρχική θέση  $x_1$ , η αποθηκευμένη ενέργεια ισούται με αυτή που προσφέρεται και αντιστοιχεί στο εμβαδόν (OBEO). Η συμπληρωματική αυτής της ποσότητας ενέργειας ή αλλιώς συνενέργεια υπολογίζεται από το εμβαδόν (OBAO) ή αλλιώς  $\int \Phi dF$ . Παρομοίως και στη θέση  $x_2$  η ενέργεια του πεδίου αντιστοιχεί στο εμβαδόν (OCDO) και η συνενέργεια στο (OCAO). Για μικρές μεταβολές η εξίσωση () γίνεται

$$dW_e = dW_f + dW_m \quad (3.3)$$

Για σταθερή διέγερση  $F$

$$dW_e = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} F d\Phi = F_1(\Phi_2 - \Phi_1) = (BCDEB) \quad (3.4)$$

$$dW_f = dW_{f_{x=x_1}} - dW_{f_{x=x_2}} = (OCDO) - (OBEO) \quad (3.5)$$

Από τα παραπάνω λοιπόν προκύπτει:

$$dW_m = dW_e - dW_f = (OBCO) \quad (3.6)$$

Σε περίπτωση περιστροφικής μηχανής το στοιχειώδες μηχανικό έργο μπορεί να γραφεί

$$dW_m = T_e d\theta \quad (3.7)$$

Όπου  $T_e$  η ηλεκτρομαγνητική ροπή και  $d\theta$  η στοιχειώδης αλλαγή θέσης. Προκύπτει τελικά

$$T_e = \frac{dW_m}{d\theta} \quad (3.8)$$



Σε περίπτωση σταθερής διέγερσης (σταθερή ΜΕΔ) το στοιχειώδες έργο είναι ίσο με το ρυθμό μεταβολής της συνενέργειας και γράφεται ως εξής

$$dW_m = dW_f' \quad (3.9)$$

όπου

$$W_f' = \int \Phi dF = \int \Phi d(Ni) = \int \lambda(\theta, i) di = \int L(\theta, i) di \quad (3.10)$$

Όπου η αυτεπαγωγή του τυλίγματος  $L$  και η πεπλεγμένη ροή  $\lambda$  είναι συναρτήσεις της γωνίας  $\theta$  και του ρεύματος  $i$ . Για σταθερό ρεύμα ισχύει

$$T_e = \frac{dW_m}{d\theta} = \frac{dW_f'}{d\theta} = \frac{dW_f'(i, \theta)}{d\theta} \quad (3.11)$$

Αν η αυτεπαγωγή είναι γραμμική συνάρτηση της γωνίας του δρομέα για δεδομένο ρεύμα προκύπτει

$$T_e = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \cdot \frac{i^2}{2} \quad (3.12)$$

όπου

$$\frac{dL(\theta, i)}{d\theta} = \frac{L(\theta_2, i) - L(\theta_1, i)}{\theta_2 - \theta_1} \quad (3.13)$$

Ο λόγος αυτός θεωρείται η σταθερά ροπής της μηχανής. Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί σε αυτό το σημείο ότι ο λόγος αυτός δεν είναι σταθερός κατά τη

λειτουργία με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατό να κατασκευαστεί ισοδύναμο κύκλωμα της μηχανής σε μόνιμη κατάσταση όπως είναι δυνατό για άλλες μηχανές (πχ. DC, επαγωγής).

Από την εξίσωση (2.12) προκύπτουν κάποια πολύ σημαντικά συμπεράσματα για τη λειτουργία των SRM

- Η ροπή είναι ανάλογη του τετραγώνου του ρεύματος επομένως για να παραχθεί θετική ροπή δεν έχει σημασία η φορά του ρεύματος στο τύλιγμα.
- Η ροπή είναι ανάλογη του τετραγώνου του ρεύματος επομένως η μηχανή διαθέτει πολύ καλή ροπή εκκίνησης.
- Η φορά της περιστροφής μπορεί να αντιστραφεί αλλάζοντας τη διαδοχή της ενεργοποίησης των φάσεων.
- Για να λειτουργήσει η μηχανή απαιτεί κατάλληλο αντιστροφέα και δεν είναι δυνατό να λειτουργήσει με τριφασική παροχή από το δίκτυο αφού είναι απαραίτητη η γνώση της θέσης του δρομέα για την ενεργοποίηση κάθε φάσης.
- Η αμοιβαία επαγωγή των φάσεων είναι πολύ μικρή επομένως κάθε φάση είναι ηλεκτρικά ανεξάρτητη από τις υπόλοιπες. Αυτή η ιδιομορφία της SRM την κάνει ιδιαίτερα αξιόπιστη αφού βραχυκύκλωμα σε μία από τις φάσεις η διακοπή λειτουργίας μιας φάσης δεν συνεπάγεται διακοπή λειτουργίας της μηχανής. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που οι SRMs είναι ιδανικές για εφαρμογές μεγάλης αξιοπιστίας όπως σέρβο σε αεροπλάνα, αντλίες σε πυρηνικούς σταθμούς και στο μέλλον σε ηλεκτρικά οχήματα.
- Λόγω της ανάγκης ρεύματος μιας φοράς οι ημιαγωγικοί διακόπτες συνδέονται σε σειρά με το τύλιγμα και την DC πηγή. Σε περίπτωση λοιπόν βραχυκυκλώματος στο τύλιγμα ή στο διακόπτη υπάρχει καθυστέρηση στο χρόνο ανόδου του ρεύματος που επιτρέπει την ενεργοποίηση της προστασίας. Εν αντιθέσει με αυτή την τοπολογία οι άλλες AC μηχανές απαιτούν δύο διακόπτες συνδεδεμένους σε σειρά με το σημείο στο μέσο αυτών να συνδέεται με το τύλιγμα. Σε περίπτωση βραχυκυκλώματος του ενός διακόπτη βραχυκυκλώνεται κατευθείαν η πηγή τάσης.

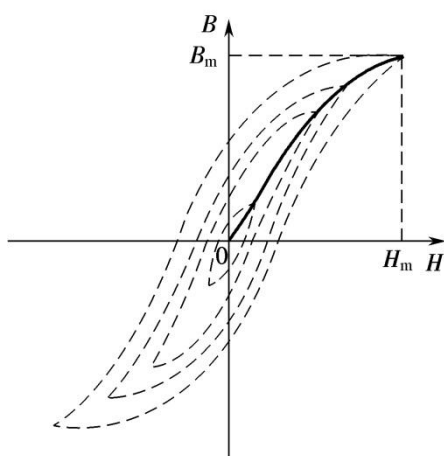
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## ΜΗΧΑΝΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

### 3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Ο πυρήνας και ο στάτης της πλειοψηφίας των ηλεκτρικών μηχανών κατασκευάζονται από σιδηρομαγνητικά υλικά. Αυτά μπορεί να είναι συμπαγής σίδηρος, πυριτιούχος μαγνητική λαμαρίνα, άμορφος σίδηρος κ.α. Η επιλογή των υλικών του πυρήνα γίνεται με τα παρακάτω κριτήρια:

- Υψηλή τιμή επαγωγής κορεσμού του υλικού έτσι ώστε να μπορεί να επιτευχθεί μεγάλη πυκνότητα ισχύος.
- Μικρός βρόχος υστέρησης με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών υστέρησης και τη μεγιστοποίηση της απόδοσης της μηχανής.
- Μικρές απώλειες από δίννορεύματα
- Μεγάλη μηχανική αντοχή



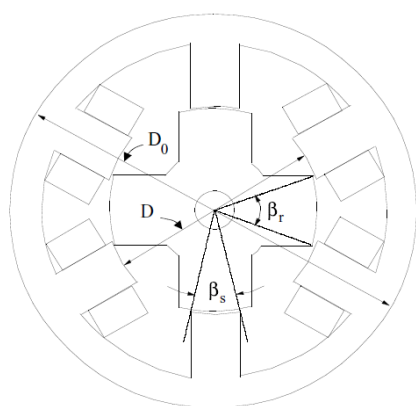
Εικόνα 6: Βρόχος υστέρησης σιδηρομαγνητικών υλικών

Ο συμπαγής σίδηρος αποκλείεται από κάθε μέρος της μηχανής αφού το μαγνητικό πεδίο είναι έντονα μεταβαλλόμενο με μεγάλη συχνότητα στο στάτη αλλά και το δρομέα επομένως αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα πολύ μεγάλες απώλειες από δίννορεύματα.

Η πυριτιούχος μαγνητική λαμαρίνα μπορεί να ανταποκριθεί στη μηχανική αντοχή που απαιτείται ενώ ταυτόχρονα μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν υπάρχει εναλλασσόμενο πεδίο που δημιουργεί δίννορεύματα. Οι επιφάνειες της είναι μονωμένες με κατάλληλη επίστρωση ενώ το μικρό πάχος της (0.5-0.03mm) περιορίζει την ανάπτυξη υπορρευμάτων. Οι προσμίξεις πυριτίου αυξάνουν την ηλεκτρική της αντίσταση μειώνοντας ακόμα περισσότερο τις απώλειες. Ενδεικτικά τυπικές τιμές απωλειών για λαμαρίνες 0.5mm και 0.3mm είναι 4 W/kg και 3 W/kg αντίστοιχα για μαγνητική επαγωγή 1.5T με συχνότητα 50Hz. Η επιλογή του πάχους της λαμαρίνας γίνεται με βάση τη συχνότητα μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής στο εσωτερικό της μηχανής αφού όσο πιο ποιοτική και λεπτή είναι τόσο αυξάνεται το κόστος της κατασκευής.

## 3.2 ΣΧΕΔΙΑΣΗ

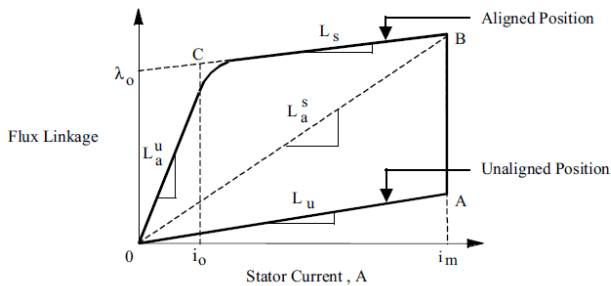
Το πρώτο στάδιο στο σχεδιασμό της μηχανής είναι η επιλογή της τοπολογίας και των διαστάσεων διακένου με βάση την επιθυμητή ειδική ηλεκτρική και μαγνητική φόρτιση. Έπειτα ακολουθεί η επιλογή των διαστάσεων των δοντιών και του yoke που βασίζεται σε διαδικασία βελτιστοποίησης και τέλος ο τρόπος περιέλιξης της μηχανής με γνώμονα τη διαθέσιμη τάση στο DC-bus της τροφοδοσίας. Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη και η θερμική συμπεριφορά πριν την κατασκευή της για να εφαρμοστεί και η κατάλληλη μέθοδος ψύξης αν είναι απαραίτητη. Στην Εικόνα 7 φαίνονται οι βασικές διαστάσεις που χαρακτηρίζουν μια SRM 6-4.



Εικόνα 7: Βασικές διαστάσεις SRM

### 3.2.1 ΕΞΙΣΩΣΗ ΕΞΟΔΟΥ

Η εξίσωση εξόδου συσχετίζει τις διαστάσεις διακένου  $L, D$  την ταχύτητα  $n_r$ , την ειδική ηλεκτρική φόρτιση  $A_s$  και την ειδική μαγνητική φόρτιση  $B$  με την ισχύ εξόδου  $P_d$  και τη ροπή εξόδου  $T$ .



**Εικόνα 8:** Καμπύλες πεπλεγμένης μαγνητικής ροής από τη θέση ευθυγράμμισης έως τη θέση αντίθεσης

Στην Εικόνα 8 φαίνονται οι καμπύλες πεπλεγμένης μαγνητικής ροής από την θέση ευθυγράμμισης ενός πόλου του δρομέα με ένα πόλο του στάτη, δηλαδή όταν τα κέντρα των πόλων είναι στην ίδια ευθεία, μέχρι και τη θέση αντίθεσης, δηλαδή όταν το κέντρο του πόλου του δρομέα απέχει από το αντίστοιχο του στάτη  $45^\circ$ . Το εμβαδόν που περικλείεται από την καμπύλη OABCO αντιστοιχεί στην μηχανική ενέργεια εξόδου για ένα πλήγμα ( $30^\circ$ ). Αν αμελήσουμε την πτώση τάσης στο τύλιγμα η τάση στο άκρο κάθε φάσης θα είναι:

$$V \cong \frac{d\lambda}{dt} = \frac{\lambda_a - \lambda_u}{\lambda_u} = \frac{(L_a^s - L_u)}{t} i \quad (3.1)$$

Όπου

$\lambda_a$ : ανά φάση πεπλεγμένη ροή στη θέση ευθυγράμμισης

$\lambda_u$ : ανά φάση πεπλεγμένη ροή στη θέση αντίθεσης

$L_a^s$ : ανά φάση αυτεπαγωγή με κορεσμό στη θέση ευθυγράμμισης

$L_u$ : ανά φάση αυτεπαγωγή στη θέση αντίθεσης

$t$ : χρόνος μετακίνησης από τη θέση αντίθεσης στη θέση ευθυγράμμισης

Ο χρόνος  $t$  μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του τόξου πόλου στάτη ( $b_s$ ) και της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα ( $\omega_m$ ) ως

$$t = \frac{b_s}{\omega_m} \quad (3.2)$$

Ορίζουμε

$$\sigma_s = \frac{L_a^s}{L_a^u} \quad (3.3)$$

και

$$\sigma_u = \frac{L_a^u}{L_u} \quad (3.4)$$

όπου

$L_a^u$ : μη κορεσμένη αυτεπαγωγή στη θέση ευθυγράμμισης

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει

$$V = \frac{\omega_m}{b_s} L_a^s i \left( 1 - \frac{1}{\sigma_s \sigma_u} \right) \quad (3.5)$$

$$L_a^s i = \varphi T_{ph} = B \cdot A_{sp} \cdot T_{ph} = B \cdot D \cdot L \cdot b_s \cdot \frac{T_{ph}}{2} \quad (3.6)$$

Όπου

$\varphi$ : μαγνητική ροή θέσης ευθυγράμμισης

$D$ : διάμετρος διακένου

$L$ : ενεργό μήκος

$B$ : μαγνητική επαγωγή στη θέση ευθυγράμμισης

Για τον προσδιορισμό των αμπερελιγμάτων κάθε φάσης χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$A_s = \frac{2T_{ph}im}{\pi D} \quad (3.7)$$

Όπου  $m$  ο αριθμός φάσεων που άγουν ταυτόχρονα. Στην περίπτωση της 6-4 μόνο μία φάση άγει κάθε στιγμή σε ιδανικές συνθήκες λειτουργίας.

Ορίζοντας το μέγεθος

$$k_a = \frac{\theta_i q P_r}{360} \quad (3.8)$$

$\theta_i$ : γωνία αγωγής κάθε φάσης για κάθε πλήγμα

$q$ : αριθμός φάσεων στάτη

$P_r$ : αριθμός πόλων δρομέα

$k_e$ : βαθμός απόδοσης

Η ισχύς εξόδου θα είναι λοιπόν:

$$P_d = k_e k_d V i m \quad (3.9)$$

$$P_d = k_e k_d \left( \frac{\pi^2}{120} \right) \left( 1 - \frac{1}{\sigma_s \sigma_u} \right) B A_s D^2 L n_r \quad (3.10)$$

Θέτοντας

$$k_1 = \frac{\pi^2}{120} \quad (3.11)$$

$$k_2 = \left( 1 - \frac{1}{\sigma_s \sigma_u} \right) \quad (3.12)$$

Προκύπτει

$$P_d = k_e k_d k_1 k_2 B A_s D^2 L n_r \quad (3.13)$$

Και

$$T = k_e k_d k_3 k_2 B A_s D^2 L \quad (3.14)$$

$$k_3 = \pi/4 \quad (3.15)$$



Από την εξίσωση εξόδου παρατηρούμε ότι η ροπή είναι ανάλογη των φορτίσεων  $A_s, B$  και της ποσότητας  $D^2L$  ενώ το η μόνη μεταβλητή που εξαρτάται από το σημείο λειτουργίας της μηχανής, τη γεωμετρία και υλικά κατασκευής είναι η  $k_2$ .

Ο λόγος  $k$  των διαστάσεων  $L, D$  ορίζεται ως εξής

$$k = \frac{L}{D} \quad (3.16)$$

και παίρνει τιμές

$$0.25 \leq k \leq 0.7 \quad (3.17)$$

για εφαρμογές χωρίς σέρβο ενώ

$$1 \leq k \leq 3 \quad (3.18)$$

για εφαρμογές με δυνατότητα σέρβο.

### 3.2.2 ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΔΙΑΚΕΝΟΥ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΟ ΜΗΚΟΣ

Για να προσδιορίσουμε τη διάμετρο διακένου και το ενεργό μήκος της μηχανής από την εξίσωση εξόδου πρέπει να επιλέξουμε εμπειρικά κάποιες παραμέτρους.

Όσον αφορά την ειδική μαγνητική φόρτιση επιλέγεται η τιμή κορεσμού της μαγνητικής λαμαρίνας που θα χρησιμοποιείται

Η ειδική ηλεκτρική φόρτιση σε μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης κυμαίνεται στο παρακάτω εύρος τιμών

$$25000 < A_s < 90000 \quad (3.19)$$

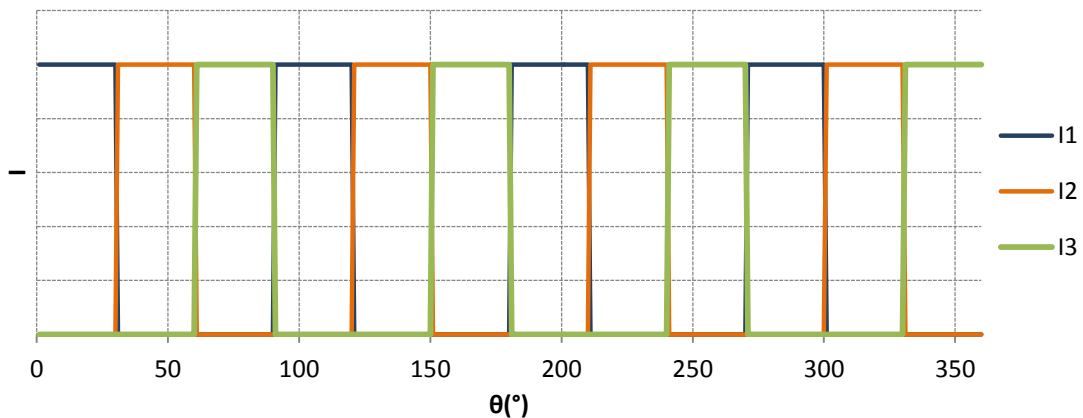
## 3.3 ΜΕΛΕΤΗ ΑΠΩΛΕΙΩΝ

### 3.3.1 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΧΑΛΚΟΥ

Για τον υπολογισμό των απωλειών χαλκού αρκεί ο υπολογισμός της ανά φάση αντίστασης  $R_s$  και της rms τιμής του ρεύματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα ρεύματα είναι μη επικαλυπτόμενα οπότε:

$$P_{cu} = q\tilde{I}^2 R_s = 3 \cdot \tilde{I}^2 R_s \quad (3.20)$$

Όπου  $\tilde{I}$  η rms τιμή του ρεύματος κάθε φάσης.



Εικόνα 9: Ρεύματα φάσεων για λειτουργία μη επικαλυπτόμενων τετραγωνικών παλμών

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 9 κάθε φάση άγει για  $\Delta\theta = 30^\circ$  επομένως η rms τιμή του ρεύματος θα είναι:

$$\tilde{I} = \sqrt{\frac{1}{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{6}} I d\theta} = \frac{I}{\sqrt{3}} \quad (3.21)$$

για 3φασικές μηχανές η αλλιώς

$$\tilde{I} = \frac{I}{\sqrt{q}} \quad (3.22)$$

για μηχανές  $q$  φάσεων

όπου  $I$  το πλάτος του φασικού ρεύματος

Από τα παραπάνω λοιπόν προκύπτει

$$P_{cu} = I^2 R_s \quad (3.23)$$

Αμελώντας το επιδερμικό φαινόμενο στις υψηλές συχνότητες η ωμική αντίσταση  $R_s$  μπορεί να εκτιμηθεί ως εξής:

$$R_s = \frac{\rho l}{S} = \rho \cdot \frac{T_{ph} \bar{l}}{S} \quad (3.24)$$

οπού  $S$  η διατομή του υλικού  $\rho$  η ειδική αντίσταση του χαλκού,  $T_{ph}$  ο αριθμός σπειρών μίας φάσης και  $\bar{l}$  το μέσο μήκος σπείρας. Συνδυάζοντας τις 3.23, 3.24

$$P_{cu} = I^2 \rho \cdot \frac{T_{ph} \bar{l}}{S} = \rho \bar{l} \cdot \left(\frac{I}{S}\right) (T_{ph} I) \quad (3.25)$$

Τελικά προκύπτει ότι οι απώλειες χαλκού εξαρτώνται από τον αριθμό αμπερελιγμάτων κάθε φάσης που είναι σταθερός για συγκεκριμένη σχεδίαση και από την πυκνότητα ρεύματος.

### 3.3.2 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΠΥΡΗΝΑ

Ο αναλυτικός υπολογισμός των απωλειών πυρήνα σε μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης είναι ιδιαίτερα δύσκολος λόγω της έντονης μη γραμμικότητας του μαγνητικού κυκλώματος της καθώς σε κάθε τμήμα του μαγνητικού κυκλώματος της μηχανής έχουμε διαφορετική μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής με το χρόνο. Ο

υπολογισμός αυτός είναι πολύ κρίσιμος καθώς για μηχανές υψηλής ταχύτητας περιστροφής τα πεδιακή μεγέθη εναλλάσσονται με μεγάλη συχνότητα. Σε περίπτωση λοιπόν που δεν γίνει σωστή επιλογή υλικών για τον πυρήνα της μηχανής οι απώλειες θα είναι απαγορευτικές για τη λειτουργία της μηχανής.

Στην εργασία αυτή γίνεται υπολογισμός των απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων μέσω ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία. Η διαδικασία υπολογισμού και τα αποτελέσματα περιγράφονται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

## 3.4 ΠΕΔΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Από την προκαταρκτική σχεδίαση ενός κινητήρα προκύπτουν οι βασικές διαστάσεις και η βασική τοπολογία του. Στη συνέχεια για τον έλεγχο της σχεδίασης απαιτείται πεδιακή ανάλυση του μαγνητικού κυκλώματος στη λειτουργία του. Χρησιμοποιώντας εργαλεία πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να υπολογιστεί η κατανομή της μαγνητικής ροής στον πυρήνα και να εξαχθούν χρήσιμα αποτελέσματα όπως η ροπή και η απόδοση του συστήματος. Αλλάζοντας λοιπόν τις παραμέτρους σχεδίασης ανάλογα με τα αποτελέσματα της πεδιακής ανάλυσης βελτιστοποιούνται κρίσιμες παράμετροι σχεδιασμού.

### 3.4.1 ΜΑΓΝΗΤΟΣΤΑΤΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Η πεδιακή ανάλυση ηλεκτρικής μηχανής γίνεται με επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος που προκύπτει μιας και θεωρούμε ότι τα πεδιακή μεγέθη εναλλάσσονται τόσο αργά που μπορούν να θεωρηθούν αμετάβλητα στο χρόνο από στιγμή σε στιγμή λειτουργίας.

Για να είναι το πρόβλημα μαγνητοστατικό πρέπει η ένταση του μαγνητικού πεδίου ( $H$ ) και η μαγνητική επαγωγή ( $B$ ) να ικανοποιούν τις σχέσεις:

$$\nabla \times H = J \quad (3.26)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.27)$$

Επίσης για όλα τα υλικά ισχύει η σχέση

$$B = \mu H \quad (3.28)$$

Σε περίπτωση που το υλικό είναι μη γραμμικό, όπως η μαγνητική λαμαρίνα, η μαγνητική επιτρεπτικότητα  $\mu$  είναι συνάρτηση της μαγνητικής επαγωγής  $B$

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \quad (3.29)$$

Για να υπολογιστεί το μαγνητικό πεδίο σε κάθε σημείο του χώρου γίνεται χρήση της έννοιας του διανυσματικού δυναμικού. Η μαγνητική επαγωγή μπορεί να γραφεί συναρτήσει του διανυσματικού δυναμικού  $A$  ως εξής:

$$B = \nabla \times A \quad (3.30)$$

Ο ορισμός αυτός του  $B$  πρέπει να ικανοποιεί πάντα την εξίσωση (3.23) οπότε:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = J \quad (3.31)$$

Υποθέτοντας γραμμικό και ισότροπο μέσο (και  $\nabla \cdot A = 0$ ) προκύπτει:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J \quad (3.32)$$

Η χρήση του διανυσματικού δυναμικού για την επίλυση πεδιακών προβλημάτων έχει το πλεονέκτημα του συνδυασμού όλων των συνθηκών σε μια σχέση από την οποία αν είναι γνωστό το  $A$  μπορεί αμέσως να προκύψουν τα  $B, H$ .

### 3.4.2 ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

- **Dirichlet:** Αυτός ο τύπος οριακής συνθήκης επιβάλλει σταθερή τιμή διανυσματικού δυναμικού  $A$  στο όριο δύο επιφανειών. Ορίζοντας λοιπόν  $A = 0$  στα όρια ενός μαγνητοστατικού προβλήματος (πχ στην εξωτερική επιφάνεια του στάτη μίας μηχανής) αποτρέπεται η μαγνητική ροή να διαπεράσει αυτή την επιφάνεια.
- **Neumann:** Αυτή η οριακή συνθήκη ορίζει την κάθετη παράγωγο του δυναμικού κατά μήκος του ορίου και συνήθως χρησιμοποιείται σε επιφάνεια με υλικό πολύ μεγάλης διαπερατότητας.
- **Robin:** Η οριακή συνθήκη Robin είναι ένας συνδυασμός μεταξύ Dirichlet και Neumann καθορίζοντας μία σχέση μεταξύ της τιμής του  $A$  και της παραγώγου του. Ένα παράδειγμα είναι:

$$\frac{\partial A}{\partial n} + cA = 0 \quad (3.33)$$

Αυτή η οριακή συνθήκη χρησιμοποιείται σε χωρικά περιορισμένα προβλήματα να μιμηθούν τη συμπεριφορά μιας χωρικά άπειρης περιοχής.

- **Περιοδική:** Η περιοδική οριακή συνθήκη συνδέει μεταξύ τους τις τιμές διανυσματικού δυναμικού δύο ορίων, οι οποίες γίνονται ίσες σε αντίστοιχα σημεία.
- **Αντιπεριοδική:** Η Αντιπεριοδική οριακή συνθήκη συνδέει μεταξύ τους τις τιμές διανυσματικού δυναμικού δύο ορίων, οι οποίες γίνονται ίσες σε μέτρο αλλά με αντίθετο πρόσημο σε αντίστοιχα σημεία.

### 3.4.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μία αριθμητική τεχνική επίλυσης μερικών διαφορικών και ολοκληρωτικών εξισώσεων. Η βασική έννοια της μεθόδου είναι η προσομοίωση μίας πραγματικής κατασκευής (πχ μιας ηλεκτρικής μηχανής) με συστατικά στοιχεία τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων. Στα δισδιάστατα προβλήματα τα στοιχεία αυτά είναι τρίγωνα διαφορετικού μέγεθος ανάλογα με την περιοχή του προβλήματος που αυτά βρίσκονται. Έτσι ένα συνεχές

πρόβλημα, όπως η κατανομή του μαγνητικού πεδίου σε μια περιοχή χωρίζεται σε μεγάλο αριθμό περιοχών και υποπροβλημάτων που έχουν απλή γεωμετρία και η λύση του καθενός προκύπτει εύκολα. Για να είναι ακριβής η επίλυση με πεπερασμένα στοιχεία πρέπει η διαίρεση του προβλήματος σε υποπεριοχές να είναι κατάλληλη έτσι ώστε να έχουμε μεγαλύτερη πυκνότητα στοιχείων στις περιοχές που υπάρχει μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας. Όσο μεγαλύτερος όμως είναι ο αριθμός κόμβων για τη προσομοίωση ενός προβλήματος τόσο μεγαλύτερος και ο χρόνος επίλυσης. Επομένως πρέπει να γίνεται κατάλληλη επιλογή του αριθμού στοιχείων για να υπάρχει ισορροπία μεταξύ ακρίβειας και υπολογιστικού χρόνου. Έχοντας υπολογίσει το διανυσματικό δυναμικό σε κάθε περιοχή με ακρίβεια για κάθε στιγμιότυπο λειτουργίας της μηχανής γίνεται να υπολογίσουμε μεγέθη όπως ροπή, αυτεπαγωγή, αντί-ηλεκτρεγερτική δύναμη στα τυλίγματα, απώλειες κ.α.





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

### 4.1 ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ

Ο κινητήρας που σχεδιάζεται είναι μέρος του κινητήριου συστήματος ενός ηλεκτροκίνητου οχήματος. Οι βασικές προδιαγραφές του είναι οι εξής:

- $T = 4Nm$
- $n_r = 8000rpm$
- $P_d = 3.35kW$

Πρόκειται για ένα κινητήρα σχετικά μικρής ισχύος και υψηλών στροφών. Παράλληλα με τις βασικές προδιαγραφές θα πρέπει να συνδυάζει μεγάλη πυκνότητα ισχύος αλλά και υψηλό βαθμό απόδοσης ( $\sim 0.9$ ) σε μεγάλο εύρος φορτίων και στροφών. Επίσης η τροφοδοσία του κινητήρα θα πρέπει να κυμαίνεται σε επίπεδα τάσης ανεκτά (για λόγους ασφαλείας) για χρήση σε ένα όχημα. Η τάση DC λοιπόν πρέπει να περιορίζεται στα  $\sim 200V$ .

### 4.2 ΒΑΣΙΚΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ

#### 4.2.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑΣ

Η τοπολογία που θα ακολουθηθεί στη σχεδίαση της μηχανής είναι η 6-4, δηλαδή με έξι πόλους στο στάτη και τέσσερις στο δρομέα. Είναι αρκετά δημοφιλής τοπολογία και διαθέτει τα παρακάτω πλεονεκτήματα έναντι τοπολογιών με λιγότερους πόλους:

- Τριφασικό τύλιγμα που μπορεί να οδηγηθεί με την πλειοψηφία των inverters με κατάλληλο προγραμματισμό.

- Δυνατότητα εκκίνησης από οποιαδήποτε θέση του δρομέα.
- Μη επικαλυπτόμενα ρεύματα φάσης που συμβάλλουν στον απλό έλεγχο
- Ευκολία κατασκευής

Βέβαια μία τοπολογία με μεγαλύτερο αριθμό πόλων και φάσεων (πχ 8-6,12-8) θα είχε ως αποτέλεσμα μικρότερη κυμάτωση στη ροπή εξόδου η οποία όμως δεν είναι τόσο σημαντική στη συγκεκριμένη εφαρμογή αφού δημιουργεί προβλήματα κυρίως σε εφαρμογές χαμηλών ταχυτήτων.

$$P_s = 6 \quad (4.1)$$

$$P_r = 4 \quad (4.2)$$

Και συνεπώς

$$q = 3 \quad (4.3)$$

$$\theta_i = 30^\circ \quad (4.4)$$

$$m = 1 \quad (4.5)$$

#### 4.2.2 ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΑΚΕΝΟΥ

Για τον υπολογισμό διαστάσεων διακένου πρέπει αρχικά να επιλεγούν βασικά μεγέθη της σχεδίασης. Ως μέγιστη επαγωγή θέσης ευθυγράμμισης επιλέγεται η τιμή

$$B = 1.5 T \quad (4.6)$$

ενώ λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση (3.19) επιλέγουμε ηλεκτρική φόρτιση

$$A_s = 25000At/m \quad (4.7)$$

αφού η πυκνότητα ρεύματος στα τυλίγματα πρέπει να είναι σχετικά χαμηλή έτσι ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία της μηχανής χωρίς εξαναγκασμένη ψύξη

Θεωρούμε την απόδοση του κινητήρα

$$k_e = 0.9 \quad (4.8)$$

και τον συντελεστή  $k_d$

$$k_d = 0.65 \quad (4.9)$$

που αποτελεί μια συνηθισμένη τιμή.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω σε συνδυασμό με τη σχέση (3.15) προκύπτει

$$D^2L = 230868 \text{ mm}^2 \quad (4.10)$$

Η επιλογή των διαστάσεων  $D, L$  γίνεται έπειτα σε συνδυασμό με την επίλυση του προβλήματος στο femm αφού μεγάλο  $D$  προσφέρει μεγάλες αύλακες και πολύ χώρο για τα τυλίγματα, επομένως χαμηλότερη πυκνότητα ρεύματος, ενώ μεγάλο  $L$  ενδείκνυται για εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων όπως η συγκεκριμένη αφού μειώνεται η αδράνεια του δρομέα και η επιφανειακή τάση οι οποίες είναι ανάλογες του τετραγώνου της ακτίνας.

Επιλέγουμε

$$k = \frac{L}{D} = 0.8 \quad (4.11)$$

μιας και η εφαρμογή δεν απαιτεί δυνατότητα σέρβο

Τελικά προκύπτει

$$D = 66 \text{ mm} \quad (4.12)$$

$$L = 57 \text{ mm} \quad (4.13)$$

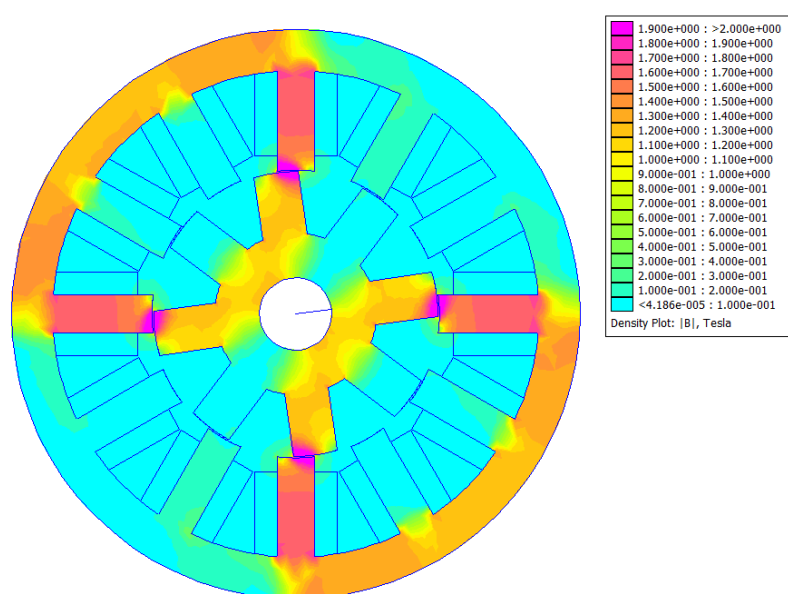
έχοντας υπερεκτιμήσει ελαφρώς το  $L$  για να υπάρχουν περιθώρια στη σχεδίαση αφού σε λειτουργία υψηλών στροφών οι παλμοί ρεύματος θα επικαλύπτονται με αποτέλεσμα

τη μείωση στη ροπή σε σχέση με τη λειτουργία χαμηλών στροφών. Περαιτέρω ανάλυση ακολουθεί στο κεφάλαιο 6 που γίνεται προσομοίωση της λειτουργίας της μηχανής σε ευρύ φάσμα στροφών.

Λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος της μηχανής αλλά και την κατασκευαστική ακρίβεια που είναι διαθέσιμη επιλέγουμε την τιμή  $d = 0.3 \text{ mm}$  για το πάχος διακένου της μηχανής.

### 4.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ FEMM

Η σχεδίαση της μηχανής και η επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος γίνεται στο λογισμικό femm σε συνδυασμό με το Matlab. Ο κώδικας γράφεται σε Matlab όπου εισάγονται και οι παράμετροι σχεδίασης. Έπειτα μέσω της διεπαφής lua scripting των δύο προγραμμάτων γίνεται ο σχεδιασμός και λύνεται το πρόβλημα στο femm. Τελικά τα αποτελέσματα επανεισάγονται στο Matlab σε μορφή πινάκων όπου και γίνεται η ανάλυση τους. Αν και ο σχεδιασμός γίνεται με βάση τα αποτελέσματα που εξάγονται (μαγνητική επαγωγή σε διάφορα σημεία, ρεύμα, ροπή κ.α.) γίνεται χρήση και του μετεπεξεργαστή του femm ο οποίος παρέχει σε εικονική μορφή τη λύση του προβλήματος (Εικόνα 10) και είναι πολύ χρήσιμος για την ανίχνευση λαθών που εντοπίζονται δυσκολότερα στα αριθμητικά αποτελέσματα



Εικόνα 10: Επίλυση μαγνητοστατικού προβλήματος σε SRM 12-8

#### 4.2.2 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΔΡΟΜΕΑ

Ο δρομέας στη μηχανή 6-4 έχει 4 έκτυπους πόλους και δε διαθέτει καθόλου τυλίγματα. Οι βασικές παράμετροι που πρέπει να υπολογιστούν για το σχεδιασμό του είναι οι εξής:

$b_r$ : τόξο πόλου δρομέα

$b_{ry}$ : πάχος σώματος δρομέα

$R_{ax}$ : ακτίνα άξονα δρομέα

Για το πάχος του σώματος δρομέα συνηθίζεται να επιλέγονται τιμές

$$0.5 \cdot \omega_{sp} \leq b_{ry} \leq 0.75 \cdot \omega_{sp} \quad (4.14)$$

Όπου  $\omega_{sp} = 2 \cdot \frac{D}{2} \cdot \sin\left(\frac{b_s}{2}\right)$  δηλαδή το πάχος του πόλου στάτη.

Επιλέγουμε λοιπόν

$$R_{ax} = 10 \text{ mm} \quad (4.15)$$

$$b_{ry} = 0.6 \cdot \omega_{sp} \quad (4.16)$$

#### 4.2.3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΤΑΤΗ

Ο στάτης της μηχανής διαθέτει 6 έκτυπους πόλους με καθένα από αυτούς να έχει το ένα από τα δύο τυλίγματα κάθε φάσης. Οι βασικές παράμετροι που πρέπει να υπολογιστούν για το σχεδιασμό του είναι οι εξής:

$b_s$ : τόξο πόλου στάτη

$b_{sy}$ : πάχος σώματος στάτη

$R_{so}$ : εξωτερική ακτίνα στάτη

$R_{si}$ : εσωτερική ακτίνα σώματος στάτη

$S_c$ : συνολική διατομή τυλίγματος

$S_{cu}$ : συνολική διατομή χαλκού

$ff$ : συντελεστής πληρότητας τυλίγματος

Η σχεδίαση της μηχανής γίνεται με σταθερή ειδική ηλεκτρική φόρτιση  $A_s$ . Σταθερή ηλεκτρική φόρτιση σημαίνει σταθερά αμπερελίγματα ανά φάση για δεδομένες διαστάσεις  $L, D$ . Με την αλλαγή όμως του τόξου πόλου στάτη  $b_s$  αλλάζει ο διαθέσιμος χώρος για το χαλκό αν η εσωτερική ακτίνα του σώματος του στάτη  $R_{si}$  παραμείνει σταθερή. Σκοπός της σχεδίασης όμως είναι να διατηρείται σταθερή η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος επομένως η ακτίνα  $R_{si}$  υπολογίζεται έτσι ώστε ο λόγος  $\frac{T_{phI}}{S_c} \propto J_{max}$  να διατηρείται σταθερός ανεξάρτητα του  $b_s$ . Η πυκνότητα ρεύματος που έχει επιλεχθεί είναι

$$J_{max} = 5A/mm^2 \quad (4.17)$$

ενώ η τιμή της πληρότητας που έχει υπολογιστεί για τα τυλίγματα είναι

$$ff = \frac{S_{cu}}{S_c} = 0.5 \quad (4.18)$$

Αφού λοιπόν υπολογιστεί η ακτίνα  $R_{si}$  γίνεται υπολογισμός του πάχους του σώματος του στάτη.

$$b_{sy} = 0.5 \cdot \left( D \sin\left(\frac{b_s}{2}\right) \right) \quad (4.19)$$

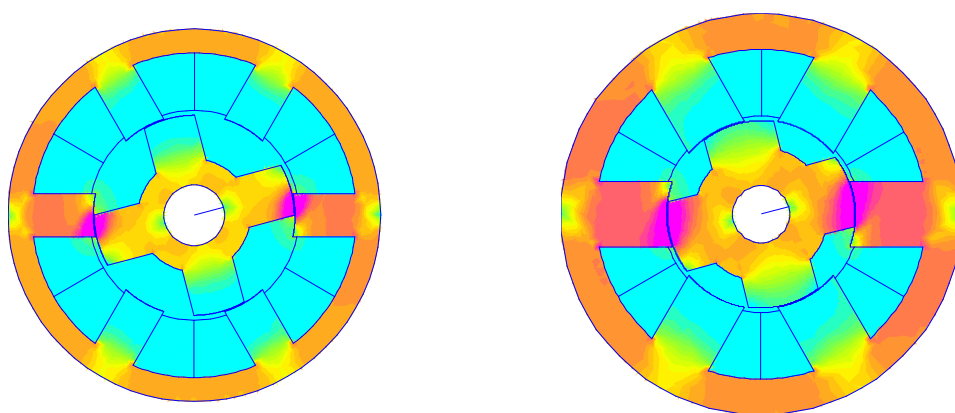
και έπειτα ακολουθεί ο υπολογισμός της εξωτερικής ακτίνας  $R_{so}$

$$R_{so} = R_{si} + b_{sy} \quad (4.20)$$

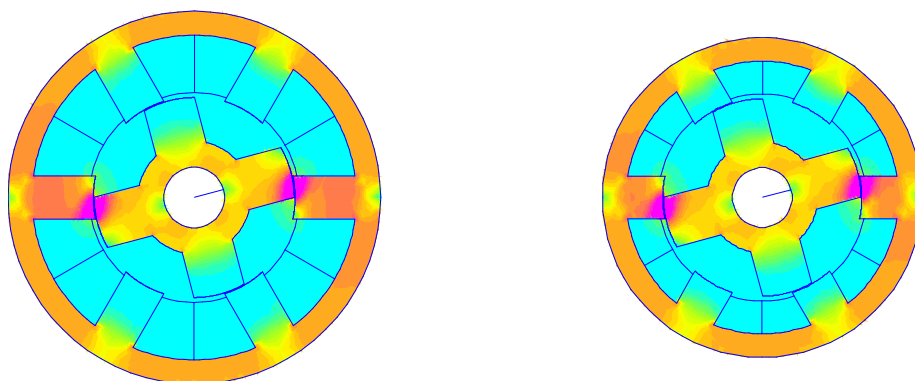
Παρατηρείται ότι η εξωτερική ακτίνα  $R_{so}$  δηλαδή το μέγεθος της μηχανής εξαρτάται από το τόξο του πόλου του στάτη και την πυκνότητα του ρεύματος που θα επιλεγεί. Η πυκνότητα ρεύματος που έχει επιλεγεί είναι αρκετά μικρή αφού η ψύξη της μηχανής θα γίνεται με αέρα, είναι όμως δυνατό να σχεδιάσει ίδιας ισχύος μηχανή με μικρότερες διαστάσεις αυξάνοντας την πυκνότητα ρεύματος στα  $10A/mm^2$  με χρήση υδρόψυξης.

Η επιλογή του τόξου πόλου γίνεται με διαδικασία βελτιστοποίησης που περιγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο.

Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η επιρροή του τόξου πόλου αλλά και της μέγιστης πυκνότητας ρεύματος στο μέγεθος της μηχανής αντίστοιχα.



**Εικόνα 11:** Διαφορά μεγέθους συναρτήσει του τόξου πόλου. Αριστερά  $bs=25$  ενώ δεξιά  $bs=40$



**Εικόνα 12:** Διαφορά μεγέθους συναρτήσει του τόξου πόλου. Αριστερά  $bs=25$  ενώ δεξιά  $bs=40$

#### 4.2.4 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΔΙΑΚΕΝΟΥ

Το διάκενο είναι το πιο σημαντικό μέρος της επίλυσης του μαγνητοστατικού προβλήματος μιας μηχανής. Ο λόγος είναι η υψηλή πυκνότητα ενέργειας που εμφανίζεται στο χώρο αυτό αφού οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής φτάνουν μέχρι και τα  $2\text{ T}$  ενώ η μαγνητική διαπερατότητα είναι  $\sim 10000$  φορές μικρότερη από αυτή της μαγνητικής λαμαρίνας. Το πλέγμα λοιπόν πρέπει να είναι κατάλληλα προσαρμοσμένο έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μεγάλη ακρίβεια μέτρησης της ροπής σε συνδυασμό με χαμηλό χρόνο υπολογισμού.

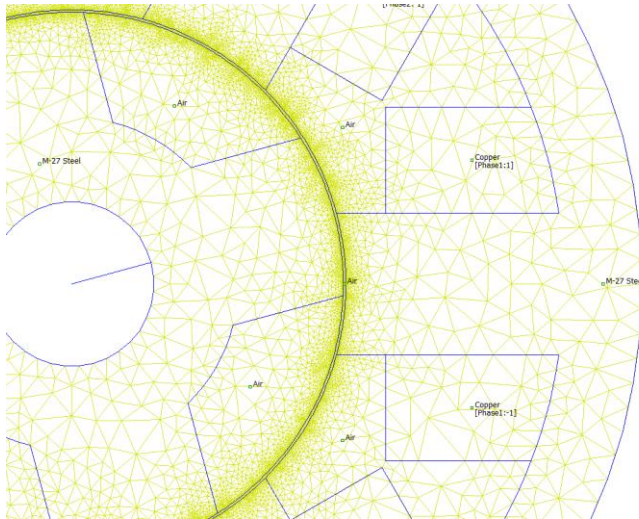
Στην εργασία αυτή έχουν εξεταστεί δύο διαφορετικοί τρόποι σχεδίασης της ίδιας μηχανής στο femm με διαφορετική δομή του πλέγματος. Σε κάθε περίπτωση η ελάχιστη γωνία στοιχείου πλέγματος έχει επιλεγεί:

$$\varphi_{min} = 30^\circ \quad (4.21)$$

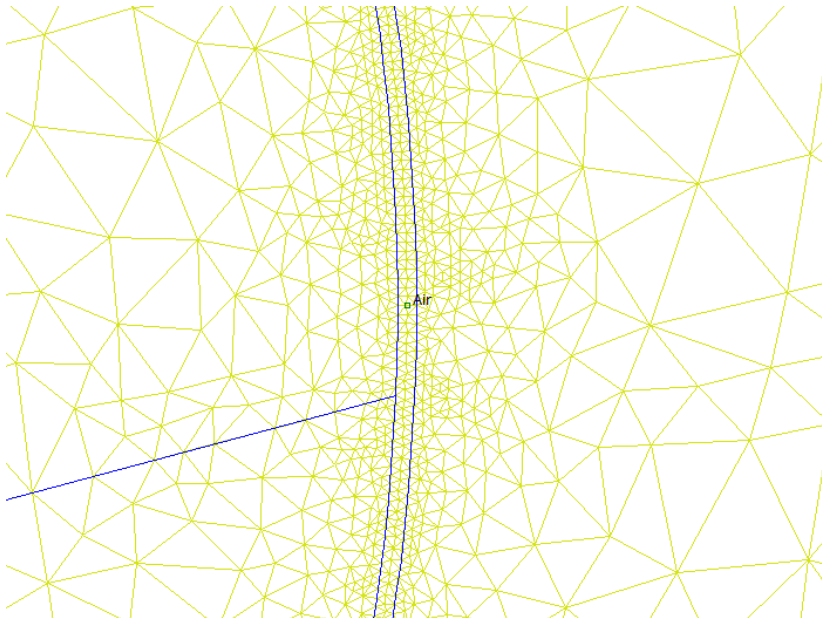
#### 4.2.4.A 1<sup>ος</sup> ΤΡΟΠΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Ο πρώτος τρόπος σχεδιασμού είναι ο απλούστερος και ευκολότερος. Σχεδιάζεται πρώτα ο δρομέας και ο στάτης της μηχανής και έπειτα ενώνεται κάθε άκρο πόλου δρομέα και στάτη με το γειτονικό του όπως φαίνεται στην Εικόνα 13. Έτσι η περιοχή του διακένου μεταξύ πόλων στάτη και δρομέα (δακτύλιος πάχους  $0.3\text{mm}$ ) είναι ξεχωριστή από το υπόλοιπο διάκενο αέρα της μηχανής. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να οριστεί ξεχωριστά το μέγεθος στοιχείου πλέγματος στις δύο περιοχές και να έχουμε μεγαλύτερη πυκνότητα μόνο στο δακτύλιο που έχει δημιουργηθεί μεταξύ των πόλων.





**Εικόνα 13: Πλέγμα με 17202 κόμβους σε μηχανή SRM 6-4 ακολουθώντας τον 1<sup>ο</sup> τρόπο σχεδιασμού**

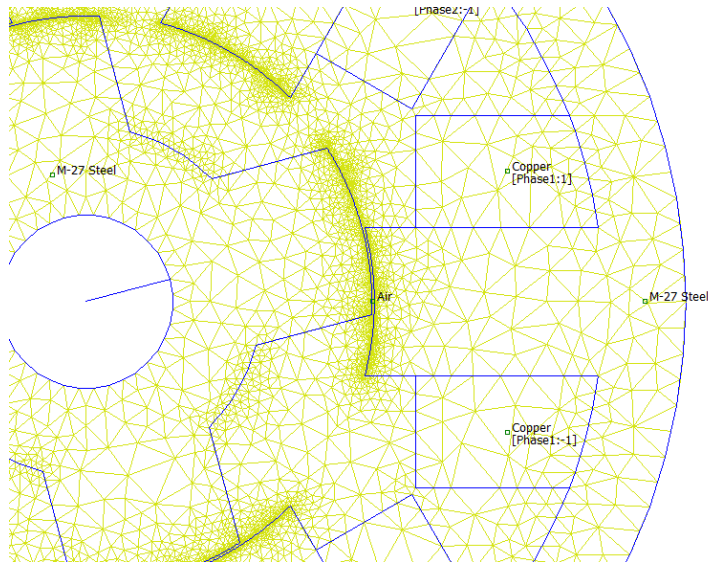


**Εικόνα 14: Κοντινή απεικόνιση πλέγματος με 2 στρώσεις στοιχείων στο διάκενο της ίδιας μηχανής**

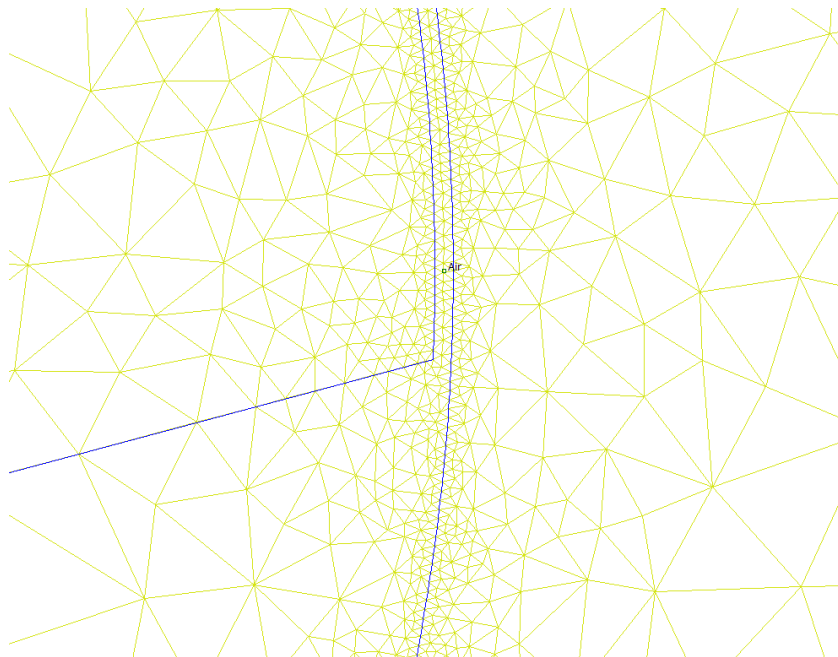
#### **4.2.4.B 2<sup>ος</sup> ΤΡΟΠΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ**

Ο 2<sup>ος</sup> τρόπος σχεδιασμού της μηχανής επικεντρώνεται στην μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση της κατανομής των στοιχείων του πλέγματος έτσι ώστε να υπάρχει υψηλή πυκνότητα μόνο στα σημεία υψηλής πυκνότητας ενέργειας που είναι τα τόξα των πόλων στάτη και δρομέα που εφάπτονται στο διάκενο. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να οριστεί το μέγεθος των στοιχείων μόνο τοπικά στις επιφάνειες που

χρειάζεται ενώ στο υπόλοιπο διάκενο γίνεται αυτόματη δημιουργία πλέγματος όπως παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες.



**Εικόνα 15: Πλέγμα με 9883 κόμβους σε μηχανή SRM 6-4 ακολουθώντας τον 2ο τρόπο σχεδιασμού**



**Εικόνα 16: Κοντινή απεικόνιση πλέγματος με 2 στρώσεις στοιχείων στο διάκενο της ίδιας μηχανής**

#### 4.2.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΡΟΠΗΣ

Ένας από τους σκοπούς της επίλυσης του μαγνητοστατικού προβλήματος είναι και ο υπολογισμός της ροπής της μηχανής. Εξετάζονται δύο παραλλαγές του υπολογισμού με τανυστή του Maxwell σε κάθε ένα από τους 2 τρόπους σχεδιασμού με σκοπό τον έλεγχο της ακρίβειας του υπολογισμού συναρτήσει του αριθμού των κόμβων έτσι ώστε να επιλεχτεί ο ακριβέστερος και ταχύτερος τρόπος.

##### 4.2.5.A ΕΠΙΚΑΜΠΥΛΙΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΑ ΤΑΝΥΣΤΗ MAXWELL ΣΤΟ ΔΙΑΚΕΝΟ

Ο πρώτος τρόπος υπολογισμού ροπής απαιτεί τον ορισμό μίας κλειστής καμπύλης στο μέσο του διακένου της μηχανής. Έπειτα σε αυτή την καμπύλη υπολογίζεται το ακόλουθο ολοκλήρωμα:

$$T = \oint \frac{D}{2} dF \quad (4.22)$$

$$dF = \frac{1}{2}(H(B \cdot n) + B(H \cdot n) - (H \cdot B)n) \quad (4.23)$$

όπου  $n$  μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στο επίπεδο σχεδίασης.

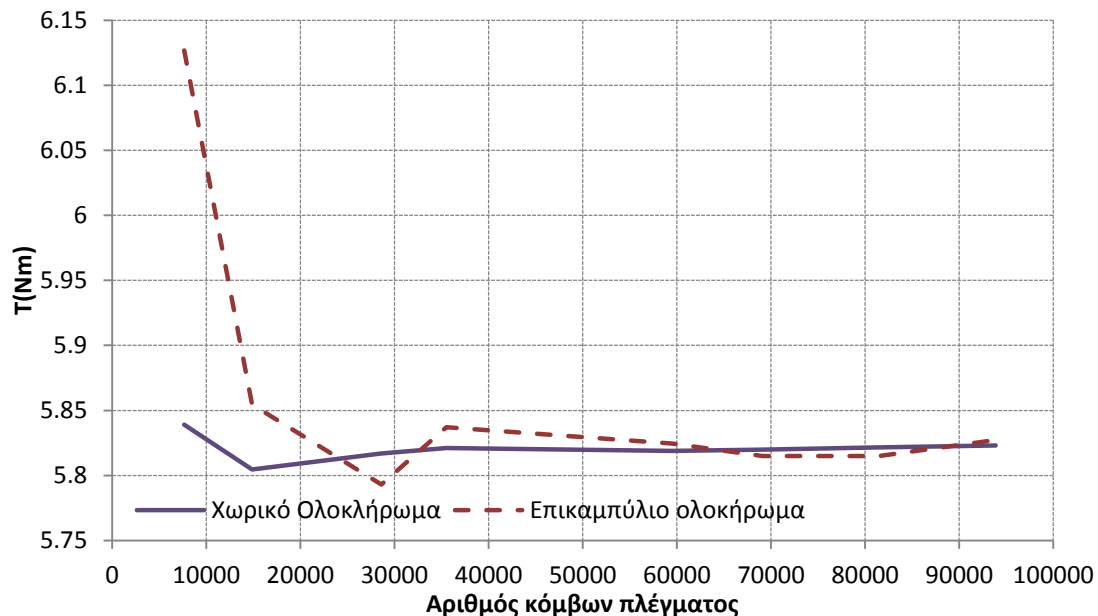
Για να επιτευχθεί επαρκής ακρίβεια με αυτό τον τρόπο υπολογισμού της ροπής πρέπει το διάκενο να έχει περίπου τέσσερις στρώσεις στοιχείων.

##### 4.2.5.B ΧΩΡΙΚΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΑ ΤΑΝΥΣΤΗ MAXWELL ΣΤΟ ΔΙΑΚΕΝΟ

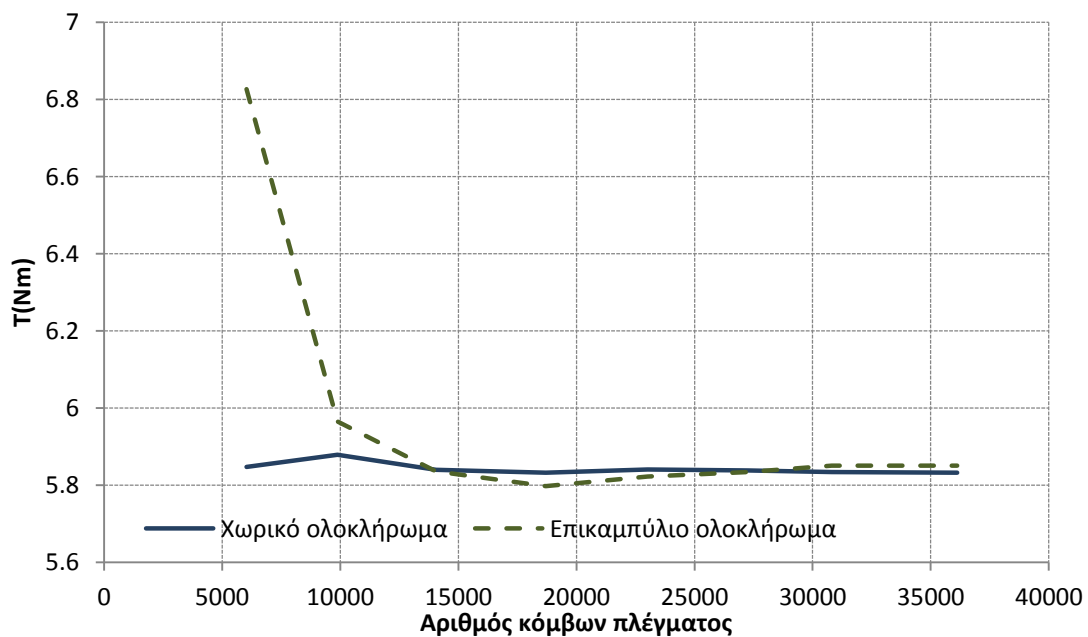
Το χωρικό ολοκλήρωμα του τανυστή Maxwell [5] στο διάκενο υπολογίζει μέσω μίας συνάρτησης βάρους το ολοκλήρωμα σε όλα τα στοιχεία του πλέγματος του διακένου. Τα αποτελέσματα είναι πιο γενικότερα πιο ακριβή με πιο αραιό πλέγμα αφού η ολοκλήρωση γίνεται σε όλο το χώρο του διακένου.

#### 4.2.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Πριν γίνει η τελική σχεδίαση της μηχανής και αρχίσει η διαδικασία βελτιστοποίησης γίνεται έλεγχος των δύο μεθόδων σχεδίασης και των δύο μεθόδων υπολογισμού της ροπής. Οι μετρήσεις λαμβάνονται στην ίδια μηχανή με ονομαστικό ρεύμα και γωνία δρομέα  $\theta = 15^\circ$ . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.

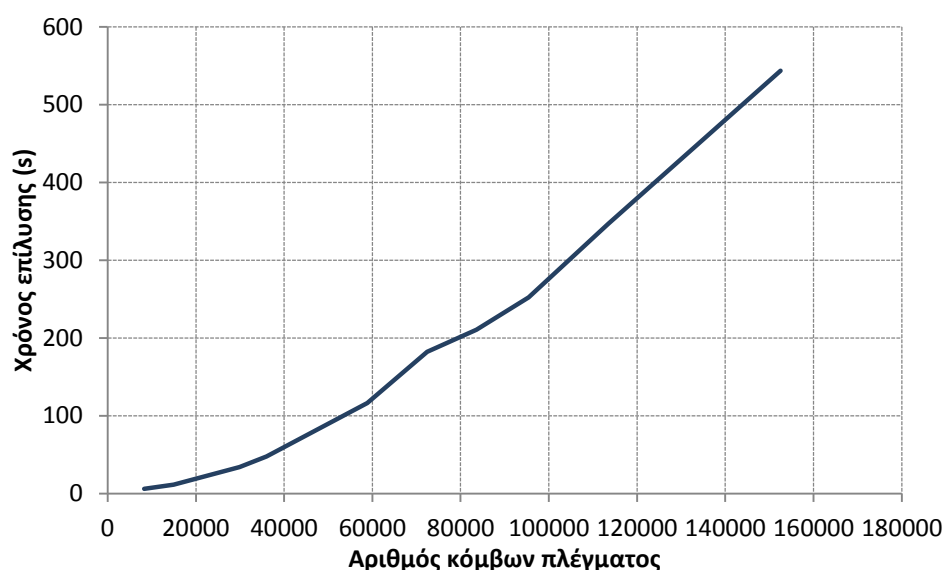


Εικόνα 17: Ροπή-αριθμός κόμβων για σχεδίαση με τον 1ο τρόπο



Εικόνα 18: Ροπή-αριθμός κόμβων για σχεδίαση με τον 2ο τρόπο

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι και οι δύο τρόποι σχεδίασης παράγουν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά την ακρίβεια στη μέτρηση της ροπής άμα επιλεγθεί κατάλληλος αριθμός κόμβων. Ο υπολογισμός με χωρικό ολοκλήρωμα όμως, και στους δύο τρόπους σχεδίασης, συγκλίνει με χρήση λιγότερων των 10000 κόμβων σε αντίθεση με το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα που χρειάζεται περίπου 15000 κόμβους για να επιτευχθεί ικανοποιητική ακρίβεια. Η διαφορά αυτή είναι πολύ σημαντική σε διαδικασίες βελτιστοποίησης και ανάλυσης ευαισθησίας αφού σε μία SRM ο υπολογισμός κάθε παραμέτρου (ροπή, αυτεπαγωγή) απαιτεί 45 επαναλήψεις ενώ όταν γίνεται ανάλυση ευαισθησίας δύο μεταβλητών όπως τα  $b_s, b_r$  για 20 τιμές της μίας και 5 της άλλης προκύπτουν 4500 επαναλήψεις. Έχοντας υπόψη ότι ο χρόνος επίλυσης ενός προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία είναι περίπου ανάλογος του τετραγώνου του αριθμού των στοιχείων είναι εύκολα αντιληπτό ότι η επιλογή πλέγματος με τον απολύτως απαραίτητο αριθμό κόμβων είναι εξαιρετικά σημαντική όσον αφορά τον υπολογιστικό χρόνο.



**Εικόνα 19:** Χρόνος επίλυσης μαγνητοστατικού προβλήματος συναρτήσει του αριθμού κόμβων του πλέγματος

## 4.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΡΟΠΗΣ

Αφού έχει γίνει ο προκαταρκτικός σχεδιασμός της μηχανής και έχει κατασκευαστεί ο αλγόριθμος σχεδίασης της στον Η/Υ ακολουθεί διερεύνηση της επίδοσης της σε σχέση

με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της. Επειδή η σχεδίαση γίνεται με σταθερή ειδική ηλεκτρική φόρτιση και σταθερή πυκνότητα ρεύματος οι απώλειες χαλκού διατηρούνται σταθερές όσο οι παραπάνω παράμετροι δεν αλλάζουν. Οι διαστάσεις που είναι αντικείμενο της βελτιστοποίησης και από τις οποίες προκύπτουν και όλες οι υπόλοιπες διαστάσεις του κινητήρα είναι το τόξο πόλου στάτη και το τόξο πόλου δρομέα. Η παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή εξαρτάται από αυτές τις δύο παραμέτρους αφού επηρεάζουν σημαντικά το μαγνητικό κύκλωμα της μηχανής καθορίζοντας τη πυκνότητα της μαγνητικής ροής. Σκοπός λοιπόν είναι η ανάλυση ευαισθησίας της ροπής ως προς αυτές τις παραμέτρους.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι σάρωση πεδίου ορισμού δύο μεταβλητών:  $b_s, b_r$ . Για κάθε ζεύγος  $(b_s, b_r)$  έγινε σχεδιασμός της μηχανής και μέτρηση της ροπής για τις θέσεις του δρομέα από  $0^\circ$  (θέση ευθυγράμμισης) έως και  $45^\circ$  (θέση αντίθεσης). Παράλληλα γίνεται και μέτρηση της μέσης μαγνητικής επαγωγής  $B_t$  στο μέσο του δοντιού του στάτη σε κάθε θέση του δρομέα. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως κάθε πλήγμα ρεύματος άρα και ροπής έχει εύρος  $30^\circ$  σε μηχανή 6-4 οπότε ενώ παράγεται ροπή για  $45^\circ$  πρέπει να επιλεχθεί διάστημα μέσα σε αυτό εύρους  $30^\circ$ . Ορίζονται λοιπόν οι γωνίες  $\theta_{on}, \theta_{off}$  οι οποίες είναι οι γωνιακές αποστάσεις από τη θέση ευθυγράμμισης του δρομέα σε κάθε φάση για τις οποίες ενεργοποιείται και απενεργοποιείται η αντίστοιχη φάση. Για τις γωνίες αυτές ισχύει

$$\theta_{off} - \theta_{on} = 30^\circ$$

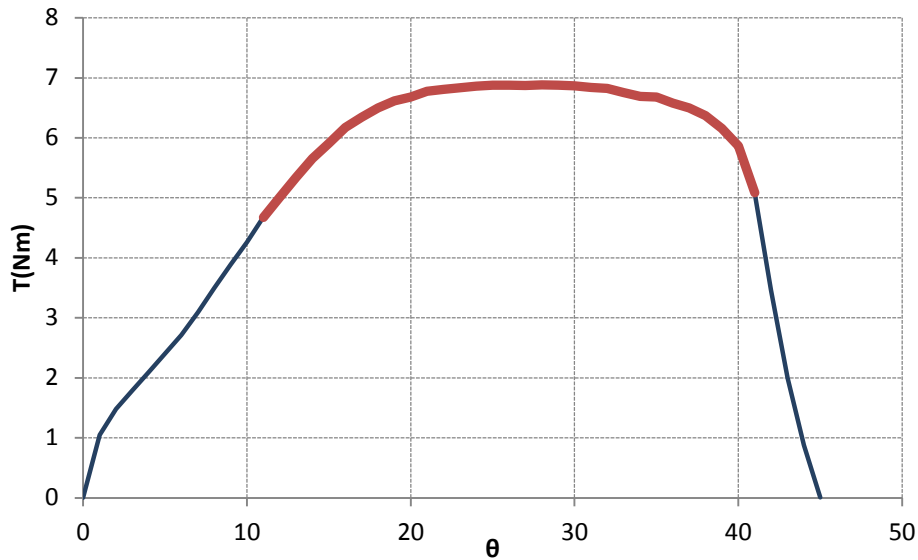
Η επιλογή του διαστήματος αυτού γίνεται με κριτήριο τη μεγιστοποίηση της μέσης ροπής του πλήγματος αλλά και την διατήρηση της μέσης επαγωγής κάτω από ένα όριο  $B_{max}$  το οποίο είναι κοντά στο γόνατο κορεσμού του υλικού κατασκευής. Η επιλογή του ορίου  $B_{max}$  πρέπει να είναι κατάλληλη έτσι ώστε να μην περιορίζει τη μέση ροπή. Μετά την ανάλυση των αποτελεσμάτων παρατηρήθηκε ότι η τιμή  $B_{max}$  δεν επηρεάζει τη μέση ροπή για τιμές

$$B_{max} > 1.7T$$

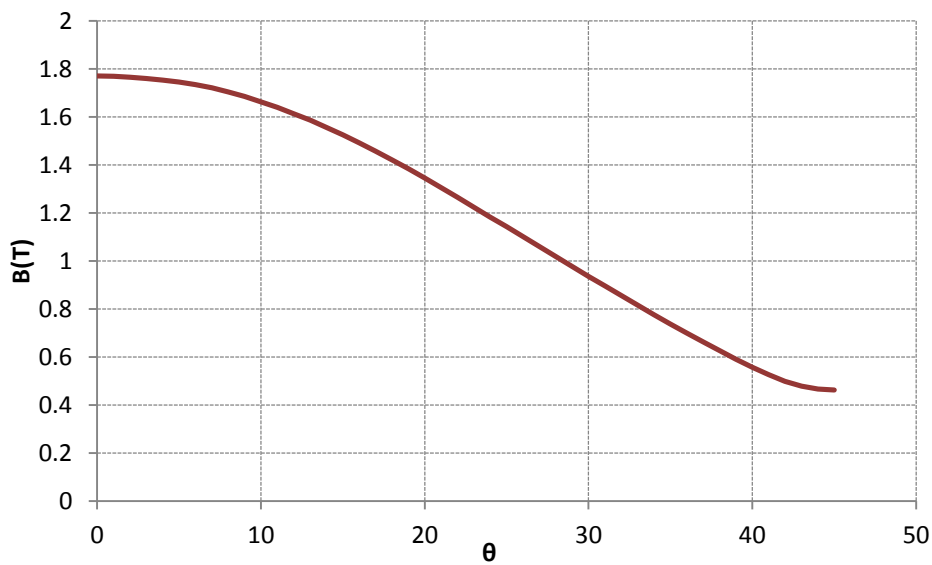
Η τιμή αυτή ως μέγιστη τιμή μαγνητικής επαγωγής πόλου (αφού παρουσιάζεται μόνο όταν η επικάλυψη πόλου στατη - πόλου δρομέα είναι μεγάλη) είναι αποδεκτή επομένως και επιλέγεται χωρίς να γίνεται έκπτωση στη ροπή αλλά χωρίς να έχουμε και κορεσμό του μαγνητικού κυκλώματος.

Θεωρητικά κάθε φάση θα μπορούσε να άγει για  $45^\circ$  και να έχουμε μεγαλύτερη ροπή αλλά αυτός ο έλεγχος σε μηχανή 6-4 έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη αύξηση απωλειών

χαλκού (~50%) με πολύ μικρή απολαβή στην επίδοση. Επιπλέον δε θα υπάρχει αρκετός χρόνος για το μηδενισμό του ρεύματος κάθε φάσης με αποτέλεσμα την παραγωγή αρνητικής ροπής από μία φάση σε μικρά διαστήματα. Η επιλογή του κατάλληλου διαστήματος παρουσιάζεται γραφικά στην Εικόνα 20 ενώ στην Εικόνα 21 φαίνεται η μεταβολή της μαγνητικής επαγωγής στον πόλο του στάτη συναρτήσει της γωνιακής θέσης του δρομέα.



**Εικόνα 20:** Απεικόνιση ροπής συναρτήσει της θέσης του δρομέα από τη θέση ευθυγράμμισης μέχρι τη θέση αντίθεσης. Με έντονο φαίνεται η περιοχή ενεργοποίησης της φάσης.

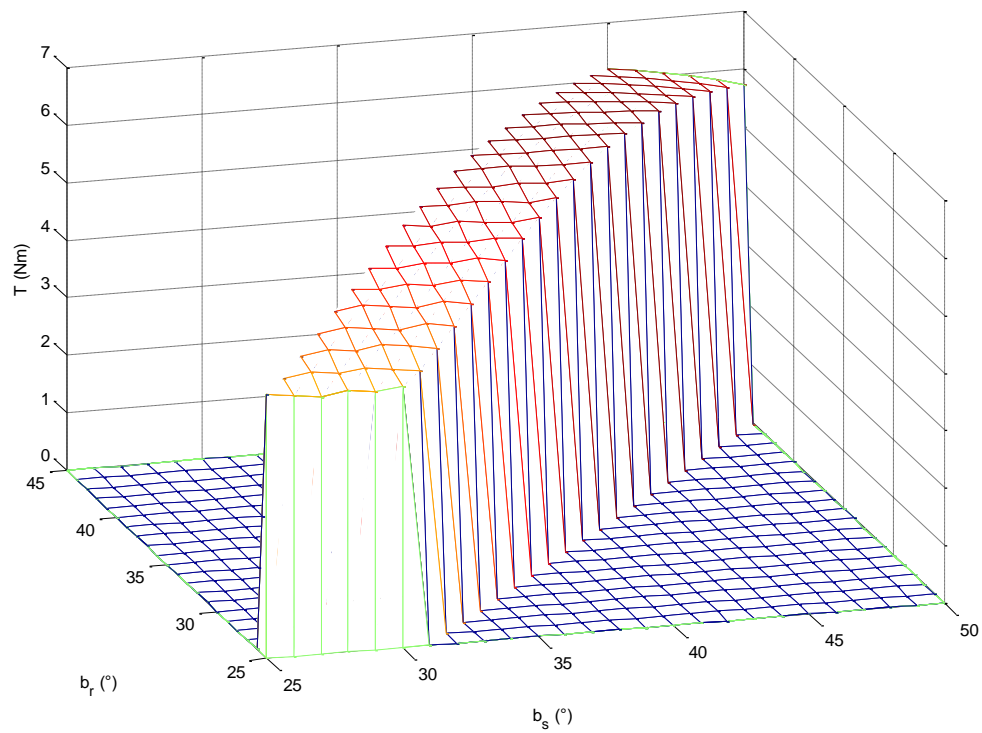


**Εικόνα 21:** Μαγνητική επαγωγή συναρτήσει της θέσης του δρομέα

Το πεδίο ορισμού των μεταβλητών  $b_s, b_r$  περιγράφεται παρακάτω

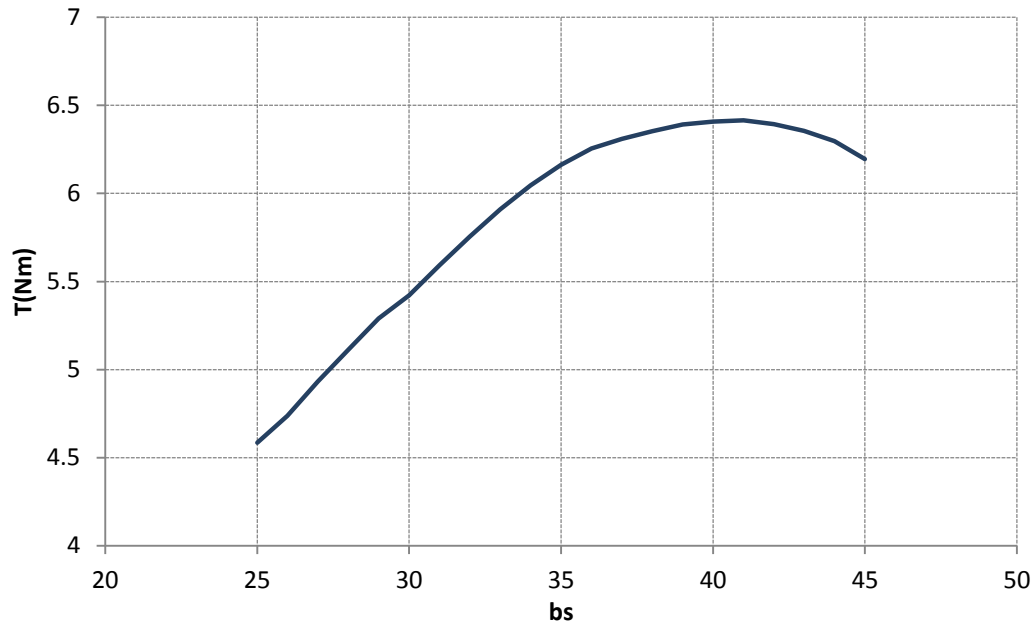
$$25^\circ \leq b_s \leq 45^\circ$$

$$b_r - b_s \leq 5^\circ$$

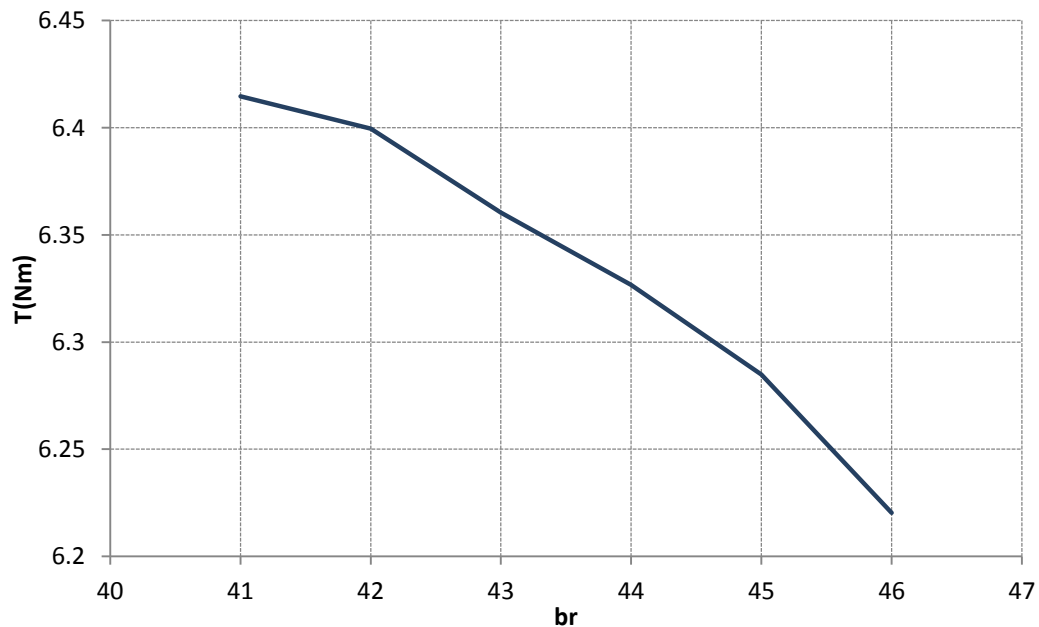


Εικόνα 22 Τρισδιάστατη απεικόνιση αποτελεσμάτων ανάλυσης ευαισθησίας





**Εικόνα 23: Ροπή συναρτήσει του τόξου πόλου στάτη για  $b_r=b_s$**



**Εικόνα 24: Ροπή συναρτήσει του τόξου πόλου δρομέα για  $b_s=41$**

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας ροπής ως προς τα μεγέθη  $b_s, b_r$  (Εικόνα 23) είναι αντιληπτό ότι η ροπή μπορεί να βελτιωθεί πάνω από 40% μεταβάλλοντας το εύρος τόξου πόλου στάτη ενώ η βέλτιστη επίδοση προκύπτει με εύρος τόξου πόλου δρομέα ίσο με αυτό του στάτη (Εικόνα 24) καθώς για μεγαλύτερες

τιμές παρατηρείται πτώση της ροπής αλλά ταυτόχρονη μείωση της μαγνητικής επαγωγής στον πόλο του δρομέα.

Από τα παραπάνω προκύπτει:

$$b_s = 41$$

$$b_r = 41$$

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## ΠΕΔΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

### 5.1 ΤΕΛΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ

Αφού έχει γίνει και η επιλογή των τόξων πόλου στάτη και δρομέα παρουσιάζονται οι τελικές διαστάσεις του κινητήρα.

$$L = 57mm$$

$$R_{ax} = 20mm$$

$$R_{ri} = 23.9mm$$

$$R_{ro} = \frac{D}{2} = 33mm$$

$$d = 0.3mm$$

$$R_{si} = 58.6mm$$

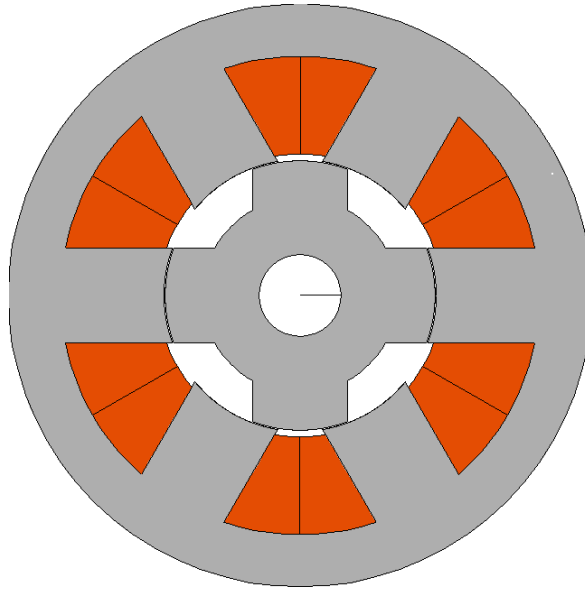
$$R_{so} = 71.4mm$$

$$b_s = 41^\circ$$

$$br = 41^\circ$$

$$T_{ph} = 2 \times 20 \text{ ελίγματα}$$

$$I_n = 65A$$



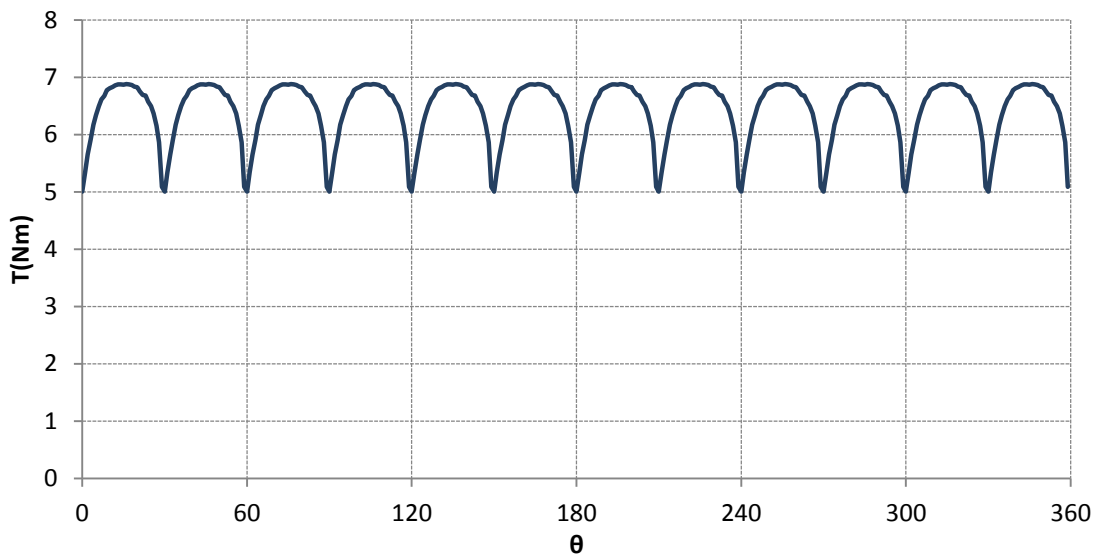
Εικόνα 25: Τελικό σχέδιο μηχανής

## 5.2 ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΟΣΗΣ

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ροπής για μία περιστροφή του δρομέα (Εικόνα 26). Γίνεται αντιληπτό ότι οι μηχανές switched reluctance εμφανίζουν αξιοσημείωτη κυμάτωση της ροπής (torque ripple) κατά την περιστροφή τους.

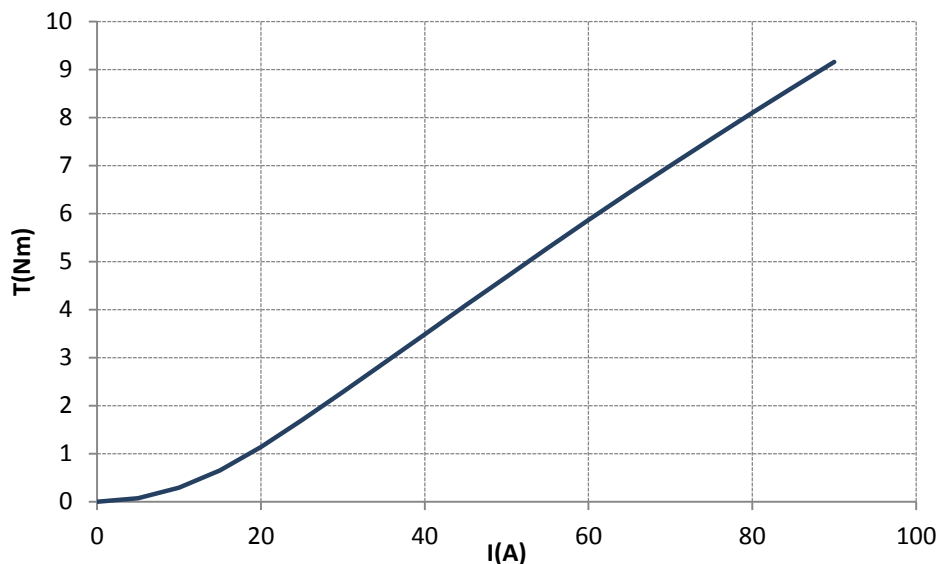
$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{\bar{T}} \cdot 100\% = 29.14\% \quad (5.1)$$

Αν και η κυμάτωση που προκύπτει δεν είναι αμελητέα αυτή εξομαλύνεται κατά τη λειτουργία από την αδράνεια του δρομέα και του συστήματος κίνησης ειδικά κατά τη λειτουργία σε υψηλές στροφές.



**Εικόνα 26: Ροπή για ονομαστικό ρεύμα για μία περιστροφή του δρομέα**

Από την χαρακτηριστική  $I - T$  της μηχανής (Εικόνα 27) φαίνεται η απόκριση της ροπής συναρτήσει του ρεύματος φαίνεται ότι είναι δυνατό να υπερφορτίσουμε τον κινητήρα ακόμα και σε τιμές ρεύματος 40% μεγαλύτερες από την ονομαστική έχοντας γραμμική αύξηση της ροπής. Βέβαια ο χρόνος που είναι δυνατή αυτή η υπερφόρτιση είναι αντικείμενο εκτενούς θερμικής μελέτης.

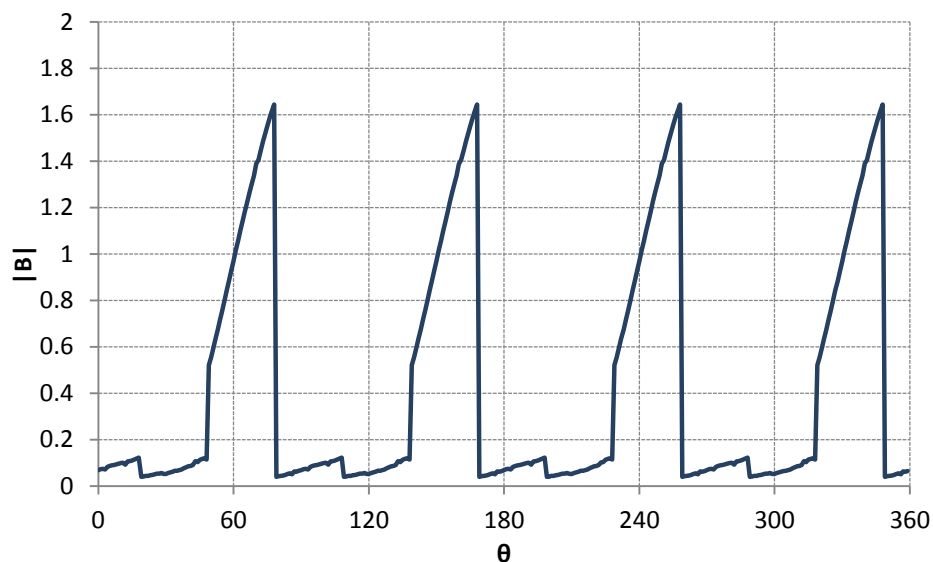


**Εικόνα 27: Χαρακτηριστική Ροπής-Ρεύματος**

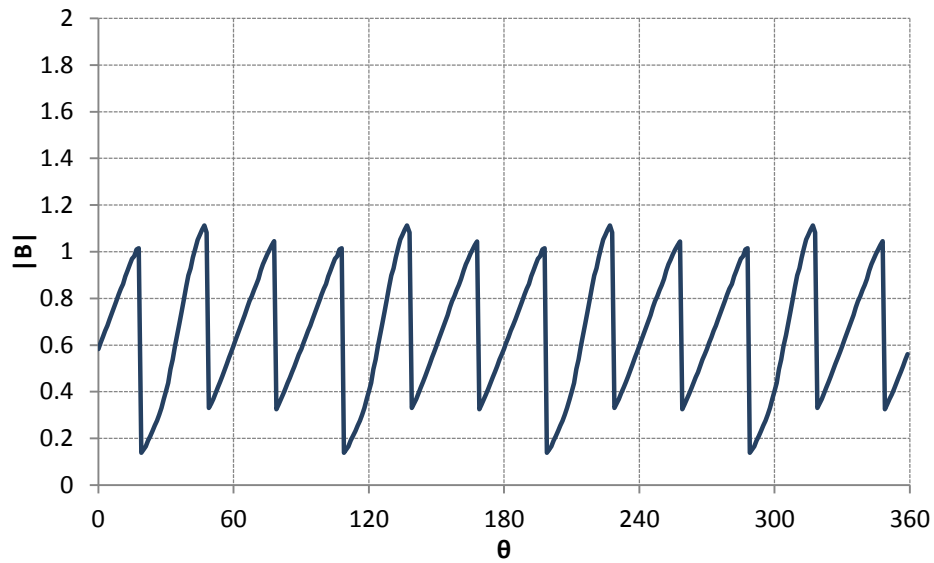
## 5.3 ΜΕΛΕΤΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ

Το μαγνητικό κύκλωμα των μηχανών μαγνητικής αντίστασης παρουσιάζει μεγάλη μη-γραμμικότητα όσον αφορά την μεταβολή των πεδιακών μεγεθών κατά την περιστροφή του δρομέα. Η μαγνητική επαγωγή δεν μεταβάλλεται ημιτονοειδώς σε κανένα μέρος της μηχανής ενώ η κυματομορφή που ακολουθεί έχει διαφορετική συχνότητα που εξαρτάται από το σημείο. Η μηχανή μπορεί να χωρισθεί σε 4 διαφορετικά κομμάτια για την μελέτη της κατανομής του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της. Σε κάθε κομμάτι η κυματομορφή αλλά και οι τιμές της μαγνητικής επαγωγής είναι παρόμοιες. Τα κομμάτια αυτά είναι: πόλος στάτη, σώμα στάτη, πόλος δρομέα, πόλος στάτη.

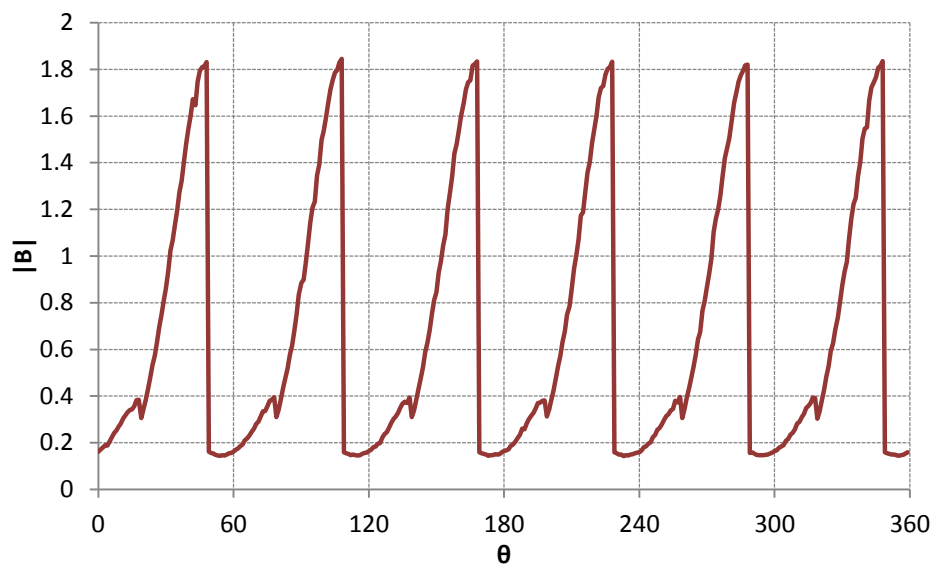
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι μεταβολές του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής σε κάθε μέρος της μηχανής. Είναι φανερό ότι η μέγιστη τιμή είναι μεγαλύτερη στον πόλο του στάτη και του δρομέα από το σώμα του στάτη και του δρομέα αντίστοιχα ενώ η θεμελιώδης συχνότητα είναι η μισή σε κάθε περίπτωση. Αποτέλεσμα αυτής της μη-γραμμικότητας είναι η δυσκολία που υπάρχει στην μοντελοποίηση των απωλειών πυρήνα των μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης.



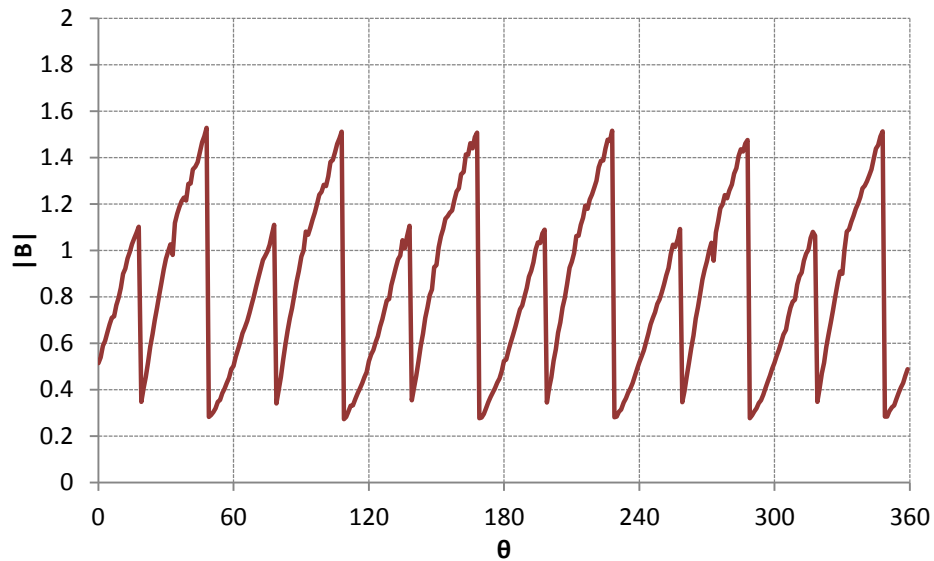
Εικόνα 28: Μεταβολή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής σε σημείο στο μέσο ενός πόλου του στάτη κατά τη λειτουργία της μηχανής



Εικόνα 29: Μεταβολή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής σε σημείο στο σώμα του στάτη

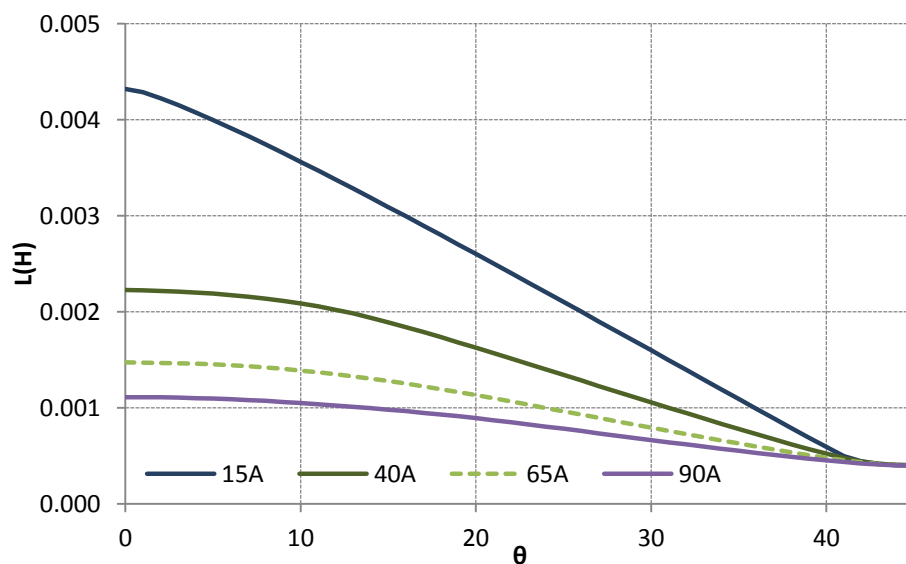


Εικόνα 30: Μεταβολή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής σε σημείο στο μέσο ενός πόλου του δρομέα



Εικόνα 31: Μεταβολή του μέτρου της μαγνητικής επαγωγής σε σημείο στο σώμα του δρομέα

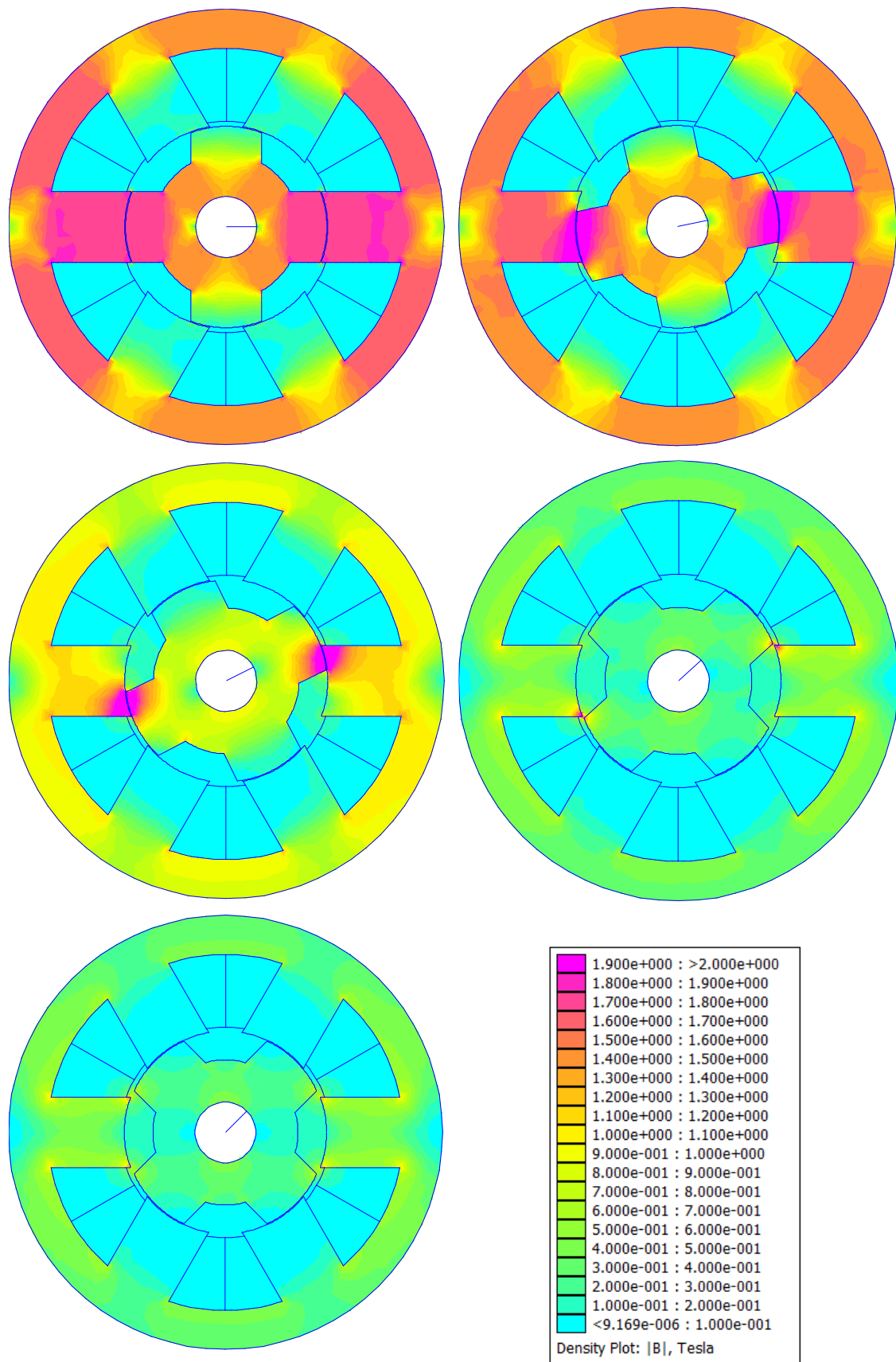
Στη συνέχεια ακολουθούν οι καμπύλες αυτεπαγωγής των τυλιγμάτων (Εικόνα 32) κάθε φάσης σε συνάρτηση με τη θέση του δρομέα. Παρατηρείται ο κορεσμός του μαγνητικού κυκλώματος με την αύξηση του ρεύματος κοντά στην θέση ευθυγράμμισης αφού όσο αυξάνεται το ρεύμα η αυτεπαγωγή μειώνεται για τις αντίστοιχες θέσεις του δρομέα.



Εικόνα 32: Αυτεπαγωγή ενεργής φάσης συναρτήσει της γωνίας του δρομέα



Στην Εικόνα 33 φαίνεται η επίλυση του μαγνητικού κυκλώματος για τις δύο ακραίες θέσεις του δρομέα αλλά και για τρία στιγμιότυπα κατά τη διάρκεια αγωγής σε κανονική λειτουργία. Είναι φανερό η αύξηση της μαγνητικής επαγωγής όσο πλησιάζει ο δρομέας στη θέση ευθυγράμμισης, σχεδόν σε ολόκληρη τη μηχανή, ενώ στη θέση αντίθεσης η τιμή της περιορίζεται κάτω από το  $1T$  λόγω της αυξημένης μαγνητικής αντίστασης του διακένου σε αυτή τη θέση.



Εικόνα 33: Κατανομή μαγνητικής επαγωγής για ονομαστικό ρεύμα και για διάφορες θέσεις δρομέα,  $\theta=0,12,27,42,45$

## 5.4 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΧΑΛΚΟΥ

Από το κεφάλαιο 3.3.1 έχει προκύψει ότι οι απώλειες χαλκού θα είναι

$$P_{cu} = I^2 R \quad (5.2)$$

Η αντίσταση κάθε φάσης μπορεί να υπολογιστεί ως εξής

$$R = \rho \frac{l}{S_w} \quad (5.3)$$

όπου  $\rho$  η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του χαλκού,  $l$  το μήκος των εν σειρά τυλιγμάτων της φάσης και  $S_w$  η διατομή της μίας σπείρας χαλκού.

$$R = \rho \frac{T_{ph} \bar{l}}{2S_{cu}} = \rho \frac{T_{ph}^2 \bar{l}}{2S_{cu}} \quad (5.4)$$

όπου  $\bar{l}$  το μέσο μήκος μίας σπείρας και  $S_{cu}$  η συνολική διατομή του χαλκού ενός τυλίγματος.

$$P_{cu} = I^2 \cdot \rho \frac{T_{ph}^2 \bar{l}}{2S_{cu}} \quad (5.5)$$

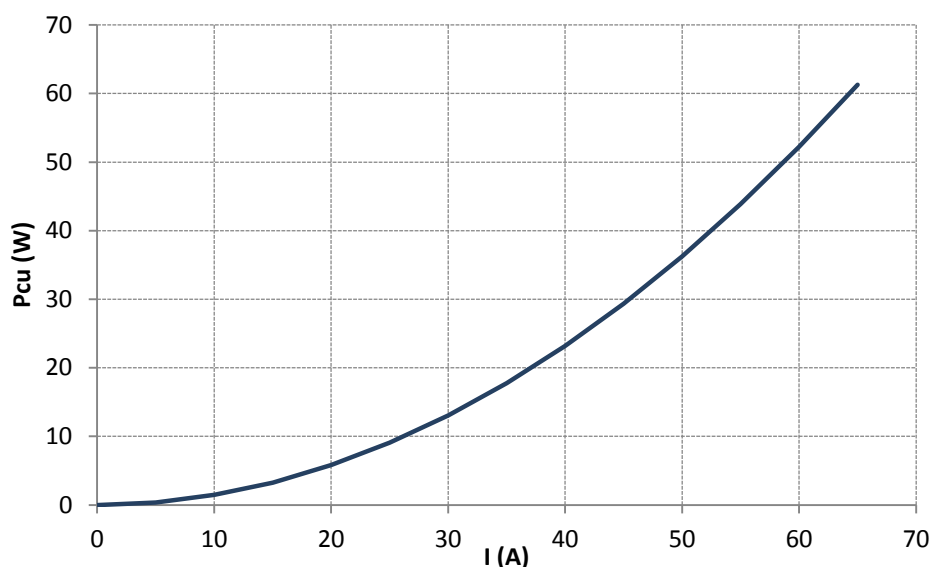
$$\bar{l} = 4 \left( R_{si} - \frac{D}{2} - d \right) \cdot \sin \left( \frac{90}{N_s} + \frac{b_s}{4} \right) + 2L = 157.62mm \quad (5.6)$$

και

$$R = 0.0145\Omega$$

Τελικά για ονομαστικό ρεύμα  $I = 65A$

$$P_{cu} = 61.1W$$



Εικόνα 34: Απώλειες χαλκού συναρτήσει του ρεύματος

## 5.5 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΠΥΡΗΝΑ

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως η μοντελοποίηση και πρόβλεψη των απωλειών πυρήνα στις ηλεκτρικές μηχανές και ιδιαίτερα στις SRM είναι ιδιαίτερα δύσκολη λόγω της μη ημιτονοειδούς μεταβολής της μαγνητικής επαγωγής.

Για τον υπολογισμό των απωλειών πυρήνα έχει χρησιμοποιηθεί αλγόριθμος που χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων [9]. Ο αλγόριθμος αυτός λύνει το μαγνητοστατικό πρόβλημα για μία μηχανική περίοδο και υπολογίζει τη μαγνητική επαγωγή  $B_k(t)$  σε κάθε στοιχείο του πλέγματος ( $N$  στοιχεία). Στη συνέχεια εφαρμόζει DFT σε κάθε χρονοσειρά  $B_k(t)$  κάθε στοιχείου και αναλύει φασματικά τη μαγνητική επαγωγή για να προσδιοριστεί το πλάτος κάθε αρμονικής συνιστώσας ( $\hat{B}_{ki}$ ). Τέλος χρησιμοποιεί τον παρακάτω τύπο για την εύρεση των απωλειών:

$$P_{iron} = \rho \sum_{k=1}^N dV \sum_{i=1}^{180} C_h f_i B_{ki}^2 + C_e f_i^2 B_{ki}^2 \quad (5.7)$$

$\rho$ : πυκνότητα μαγνητικής λαμαρίνας

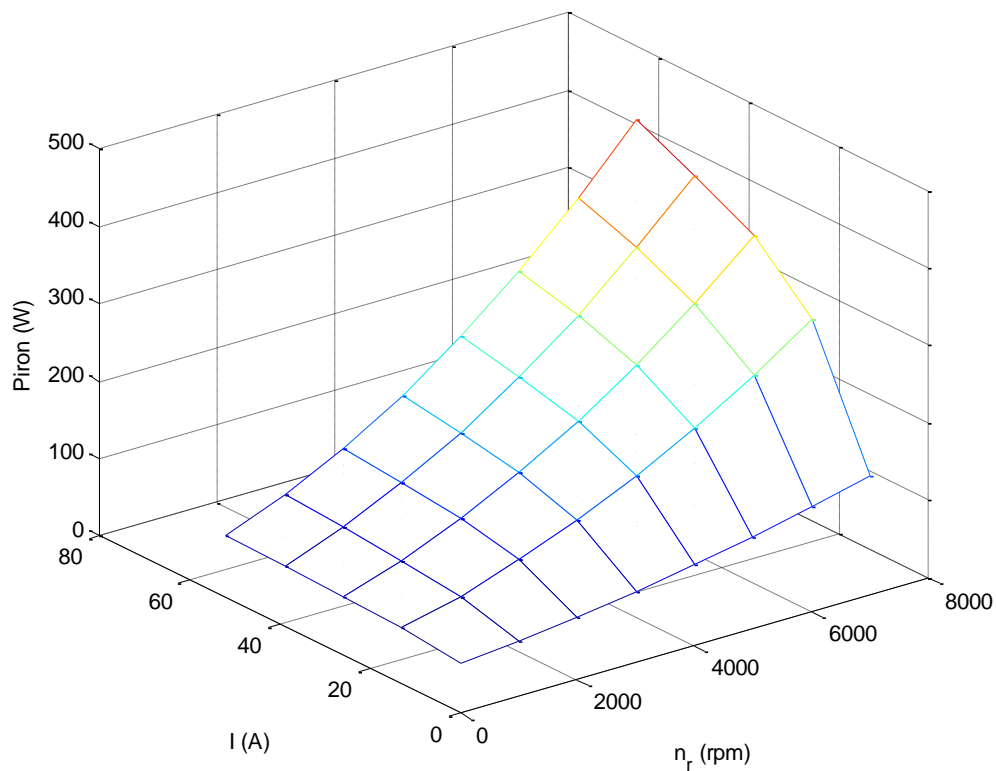
$dV$ : όγκος στοιχείου

$C_h$ : συντελεστής υστέρησης

$C_e$ : συντελεστής δινορευμάτων

$f_i$ : ι-οστή συχνότητα  $i * f_{base}$  όπου  $f_{base} = \frac{n_r}{60}$

Στην Εικόνα 35 φαίνονται τα αποτελέσματα για όλο το εύρος λειτουργίας του κινητήρα

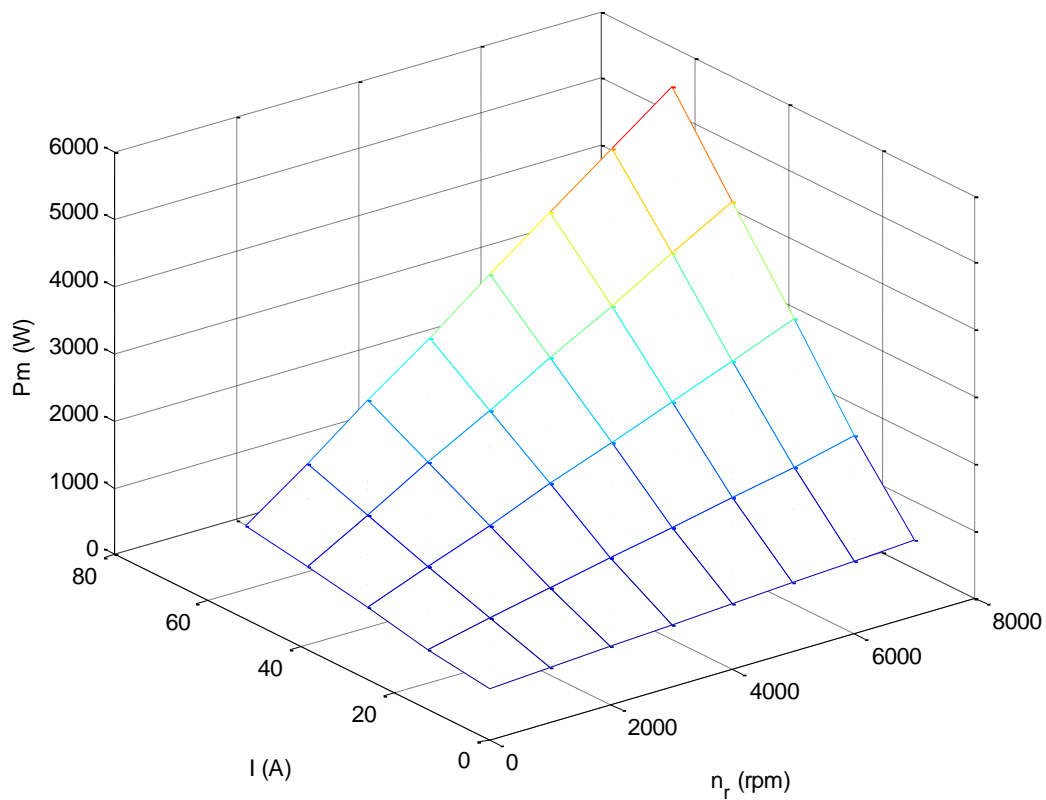


Εικόνα 35: Απώλειες πυρήνα συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας και του ρεύματος

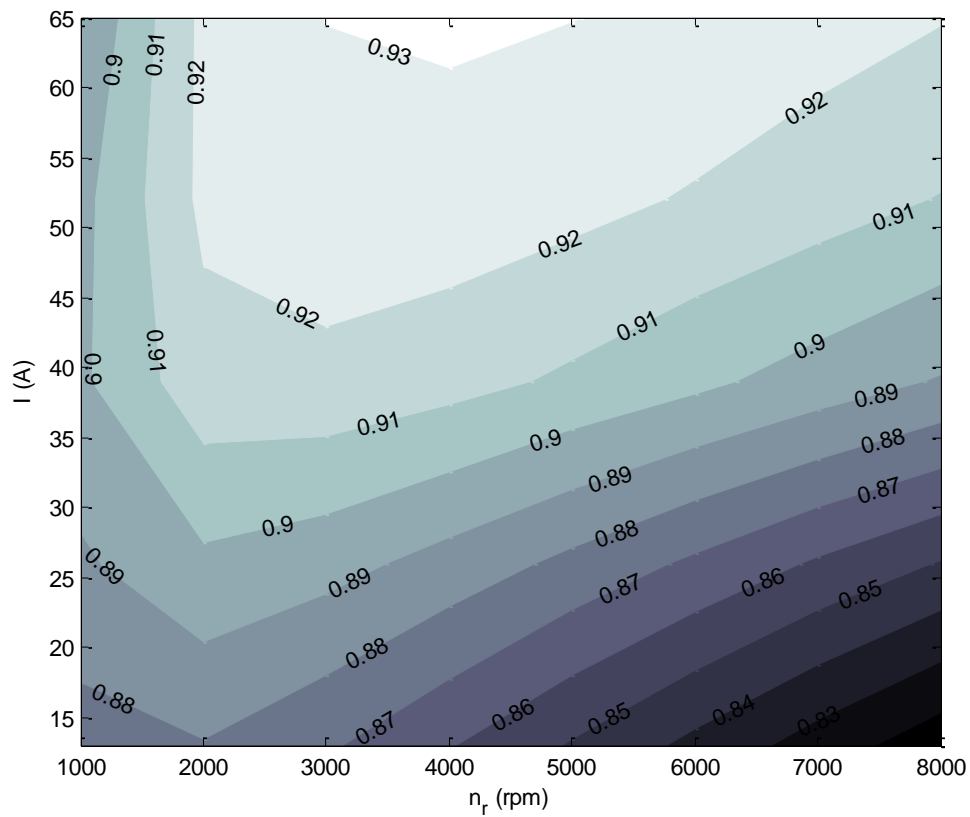
## 5.6 ΜΕΛΕΤΗ ΒΑΘΜΟΥ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Έχοντας υπολογίσει την μηχανική ροπή, τις απώλειες χαλκού και πυρήνα της μηχανής για όλο το εύρος λειτουργίας της είναι δυνατός ο υπολογισμός του βαθμού απόδοσης ( $e$ ).

$$e = \frac{P_m}{P_m + P_{cu} + P_{iron}} = \frac{\omega_m T}{\omega_m T + P_{cu} + P_{iron}} \quad (5.8)$$



Εικόνα 36: Μηχανική ισχύς εξόδου συναρτήσει του ρεύματος και της ταχύτητας περιστροφής



**Εικόνα 37: Χάρτης απόδοσης συναρτήσει του ρεύματος και της ταχύτητας περιστροφής**

Η Εικόνα 37 δείχνει το βαθμό απόδοσης στα διάφορα σημεία λειτουργίας της μηχανής. Παρατηρείται πως ξεπερνάει το 80% σε κάθε σημείο λειτουργίας ενώ ξεπερνάει και το 90% πλησιάζοντας στο ονομαστικό ρεύμα.





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

## ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕ SRM ΣΕ Η/Υ

### 6.1 ΈΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΟΔΗΓΗΣΗ SRM

Στα προηγούμενα κεφάλαια μελετήσαμε τα μέρη ενός συστήματος ηλεκτρικής κίνησης με SRM καθώς και το σχεδιασμό του κινητήρα αυτού του συστήματος. Για τη λειτουργία όμως του συστήματος αυτού είναι απαραίτητη η μελέτη μεθόδων ελέγχου του συστήματος.

Έχει γίνει σαφές από την ανάλυση των προηγούμενων κεφαλαίων ότι πρόκειται περί μη γραμμικού συστήματος με χρονομεταβλητές παραμέτρους το οποίο έχει αυξημένες ανάγκες ελέγχου. Για τον έλεγχο της μηχανής είναι απαραίτητη η βαθιά κατανόηση του ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος αλλά και της λειτουργίας των ηλεκτρονικών ισχύος.

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται και υλοποιείται ένας τρόπος ελέγχου SRM με έμμεσο έλεγχο της ροπής με έλεγχο ρεύματος. Ο έλεγχος αυτός είναι αντίστοιχος με τον έλεγχο ενός τυπικού συστήματος κίνησης. Η προσομοίωση της λειτουργίας γίνεται σε λογισμικό Simulink.

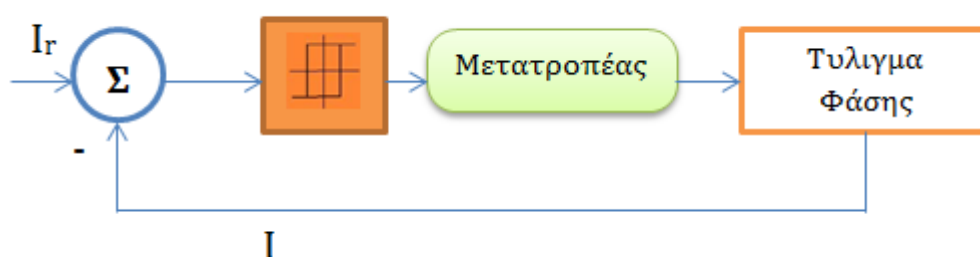
### 6.2 ΈΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΖΩΝΗ ΥΣΤΕΡΗΣΗΣ

Ο έλεγχος με ζώνη υστέρησης είναι ένας μη-γραμμικός τρόπος έλεγχου. Στην τεχνική αυτή η δράση ελέγχου είναι διακριτή και λαμβάνει μόνο τις καταστάσεις ON/OFF αναλόγως της τιμής του σφάλματος του ελεγχόμενου μεγέθους σε σχέση με την επιθυμητή του τιμή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το ελεγχόμενο μέγεθος είναι το ρεύμα κάθε φάσης της μηχανής ενώ το σφάλμα καθορίζεται σε σχέση με την επιθυμητή

τιμή ρεύματος που καθορίζει ο χρήστης του συστήματος (πεντάλ επιτάχυνσης). Ο ημιαγωγικός διακόπτης (IGBT, MOSFET) κάθε φάσης ενεργοποιείται και απενεργοποιείται όταν η μετρούμενη τιμή του ρεύματος είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη αντίστοιχα από την επιθυμητή.

Στην Εικόνα 38 παρουσιάζεται το λειτουργικό διάγραμμα αυτής της τεχνικής ελέγχου. Η μετρούμενη τιμή του ρεύματος αφαιρείται από την τιμή αναφοράς  $I_r$  και υπολογίζεται το σφάλμα. Αυτό με τη σειρά του οδηγείται σε έναν ελεγκτή ζώνης υστέρησης. Αυτός ο ελεγκτής έχει δύο προκαθορισμένα όρια: ένα μέγιστο  $+ΔI_{max}$  και ένα ελάχιστο  $-ΔI_{min}$ . Όταν το σφάλμα ξεπεράσει το πάνω όριο  $I_r - I > ΔI_{max}$  τότε αυτό σημαίνει ότι η τιμή του ρεύματος αρα και της ροπής είναι μικρότερη από την επιθυμητή επομένως κλείνει ο αντίστοιχος διακόπτης και έχουμε εφαρμογή τάσης στο τύλιγμα και αύξηση του ρεύματος. Σε αντίθετη περίπτωση, όπου δηλαδή  $I_r - I < -ΔI_{max}$  η δράση ελέγχου είναι αντίθετη και έχουμε άνοιγμα του διακόπτη (soft switching) ή εφαρμογή μέγιστης αρνητικής τάσης στο τύλιγμα με αποτέλεσμα τη μείωση του ρεύματος. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται διαρκώς σε κάθε κύκλο λειτουργίας του επεξεργαστή του μετατροπέα με σκοπό τη διατήρηση του ρεύματος στα επιθυμητά όρια.

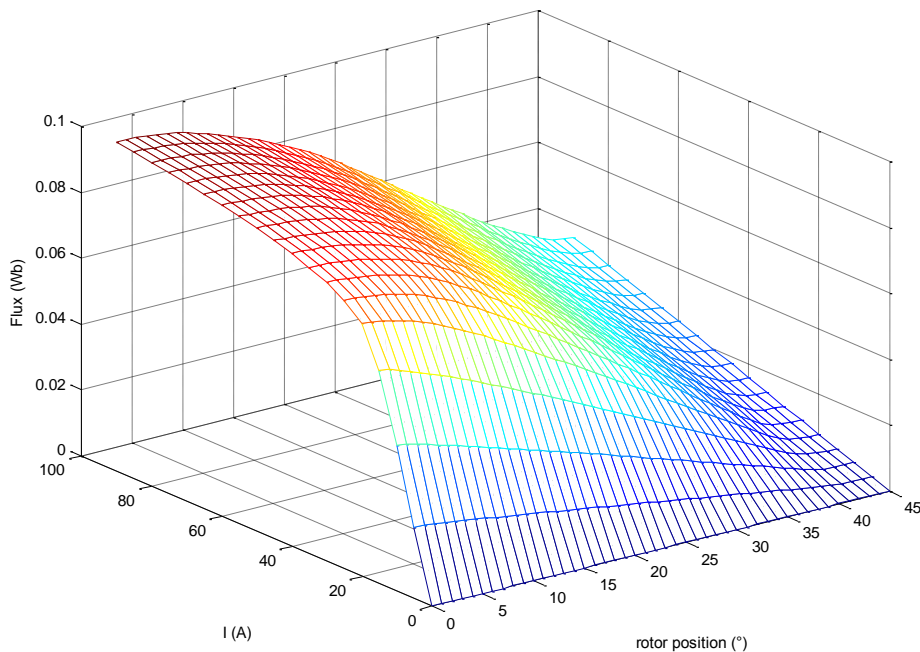
Ο χρήστης του συστήματος είναι δυνατόν να αλλάζει την τιμή του ρεύματος  $I_r$  αλλάζοντας το ρεύμα της μηχανής και επιτυγχάνοντας έλεγχο ροπής.



Εικόνα 38: Απλοποιημένο διάγραμμα ελέγχου ρεύματος με ζώνη υστέρησης

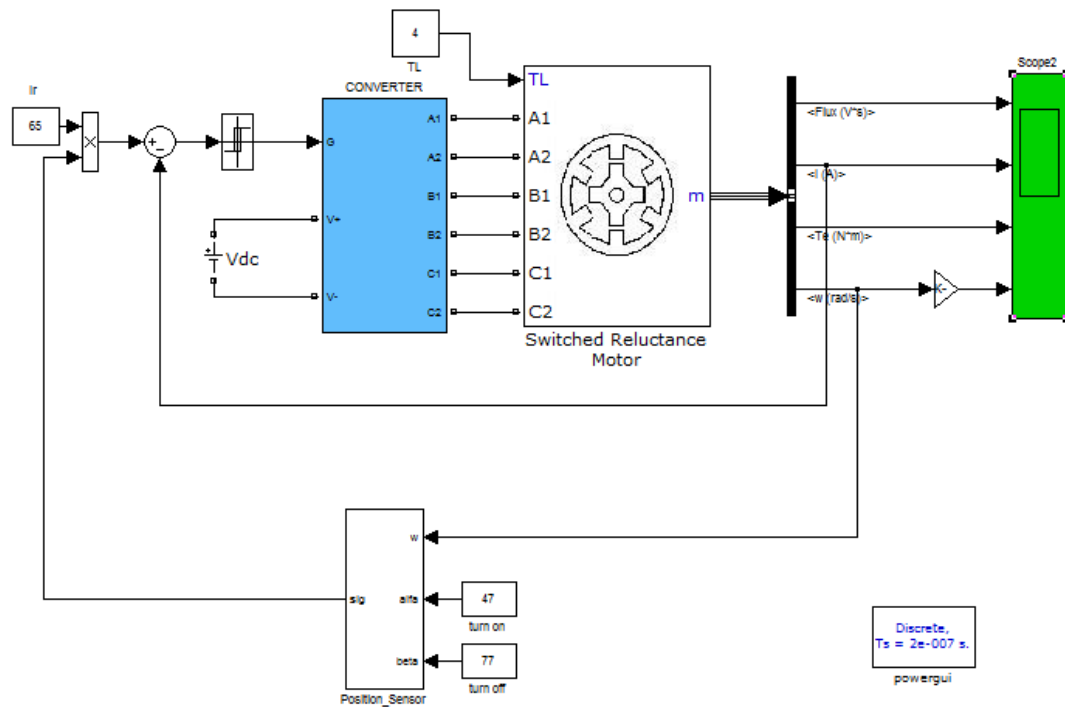
## 6.3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ SIMULINK

Αφού έχει σχεδιαστεί όλο το σύστημα ηλεκτρικής κίνησης είναι απαραίτητη η προσομοίωση και μελέτη της συμπεριφοράς του σε συνθήκες λειτουργίας για να ελεγχθεί η επιτυχία της σχεδίασης. Η προσομοίωση γίνεται στο λογισμικό Matlab Simulink και χρησιμοποιεί έλεγχο ζώνης υστέρησης. Η πηγή του συστήματος είναι ιδανική πηγή DC η οποία προσομοιώνει ικανοποιητικά τις σύγχρονες μπαταρίες λιθίου πολυμερών σε ονομαστική λειτουργία. Το μοντέλο της μηχανής που χρησιμοποιείται βασίζει τη λειτουργία του σε lookup table πεπλεγμένης μαγνητικής ροής συναρτήσεως του ρεύματος και της θέσης του δρομέα (Εικόνα 39).



**Εικόνα 39: Γραφική αναπαράσταση μαγνητικής ροής συναρτήσεως της θέσης του δρομέα και του ρεύματος**

Παρακάτω (Εικόνα 40) φαίνεται το σύστημα ελέγχου της μηχανής όπως σχεδιάστηκε στο Simulink



**Εικόνα 40: Σύστημα οδήγησης SRM με έλεγχο ρεύματος**

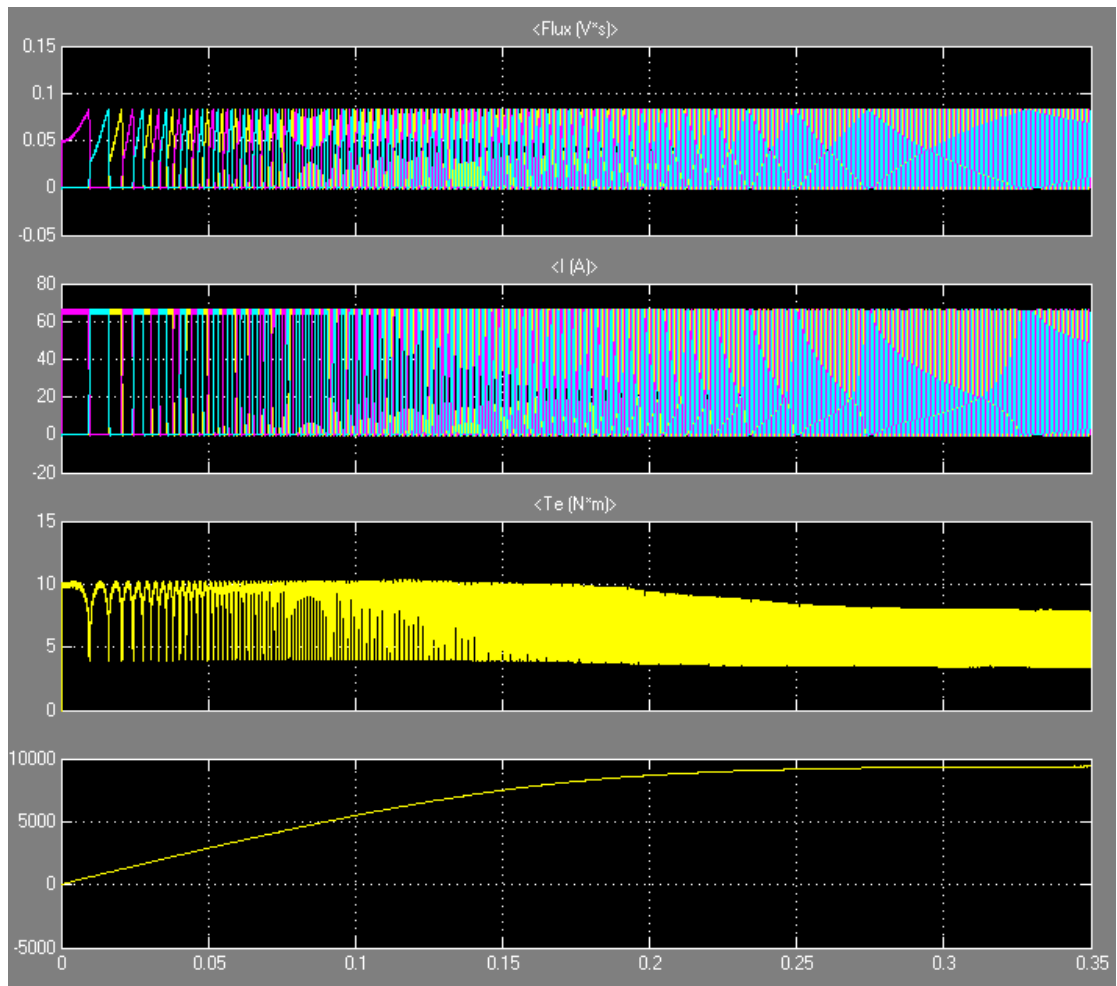
Χρησιμοποιώντας αυτό το σύστημα ελέγχου το οποίο δίνει τη δυνατότητα ελέγχου ροπής με τον έλεγχο του ρεύματος έγινε μία σειρά προσομοιώσεων σε διάφορες συνθήκες φορτίου, σε μεταβατικά φαινόμενα αλλά και σε περίπτωση σφάλματος.

Σε όλες τις περιπτώσεις η DC τάση τροφοδοσίας έχει την τιμή  $V_{DC} = 160V$ , τιμή που πληρεί τα όρια ασφαλείας για χρήση σε ηλεκτρικό όχημα.

### 6.3.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΦΟΡΤΙΟ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΡΟΠΗΣ

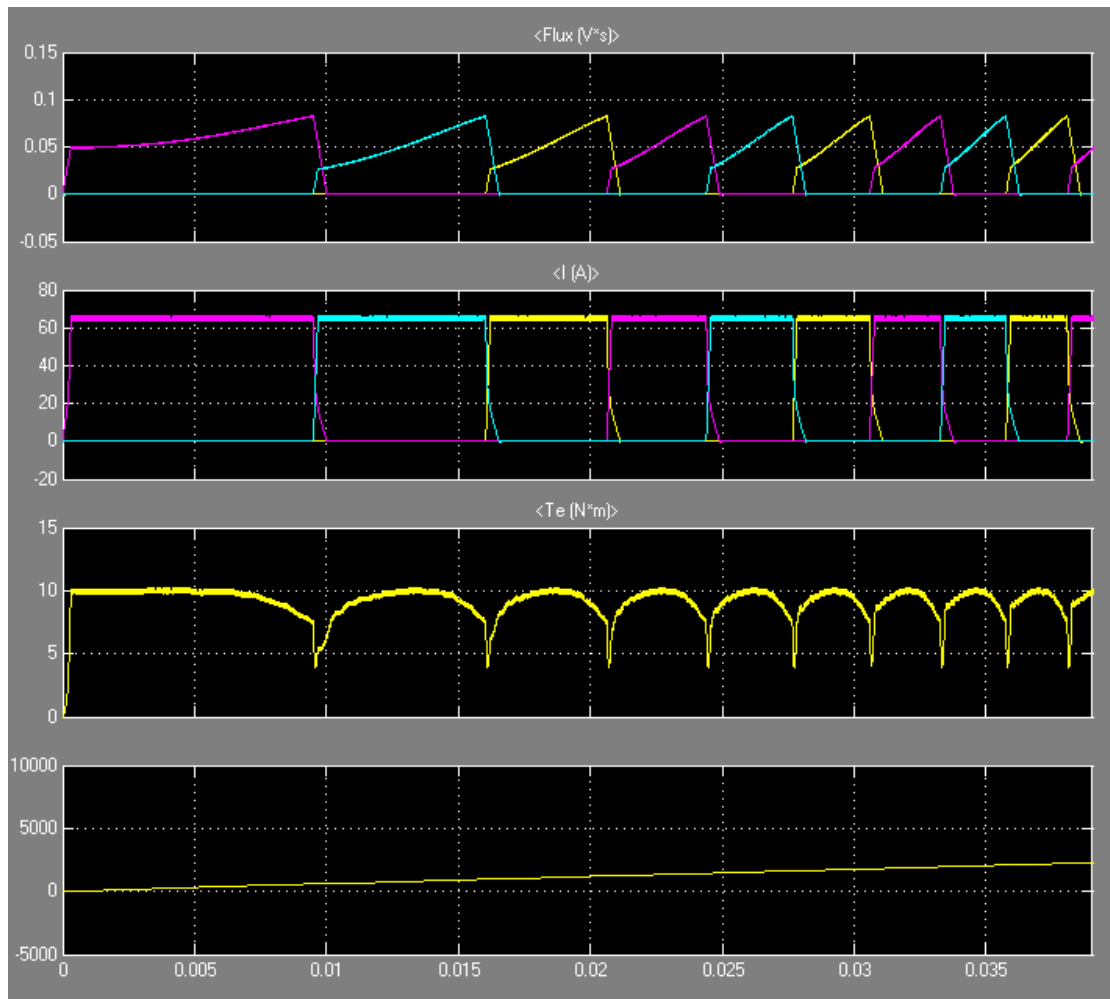
Στη λειτουργία αυτή το φορτίο της μηχανής  $T_L$  έχει σταθερή τιμή, ίση με την ονομαστική της μηχανής.

$$T_L = 4Nm$$

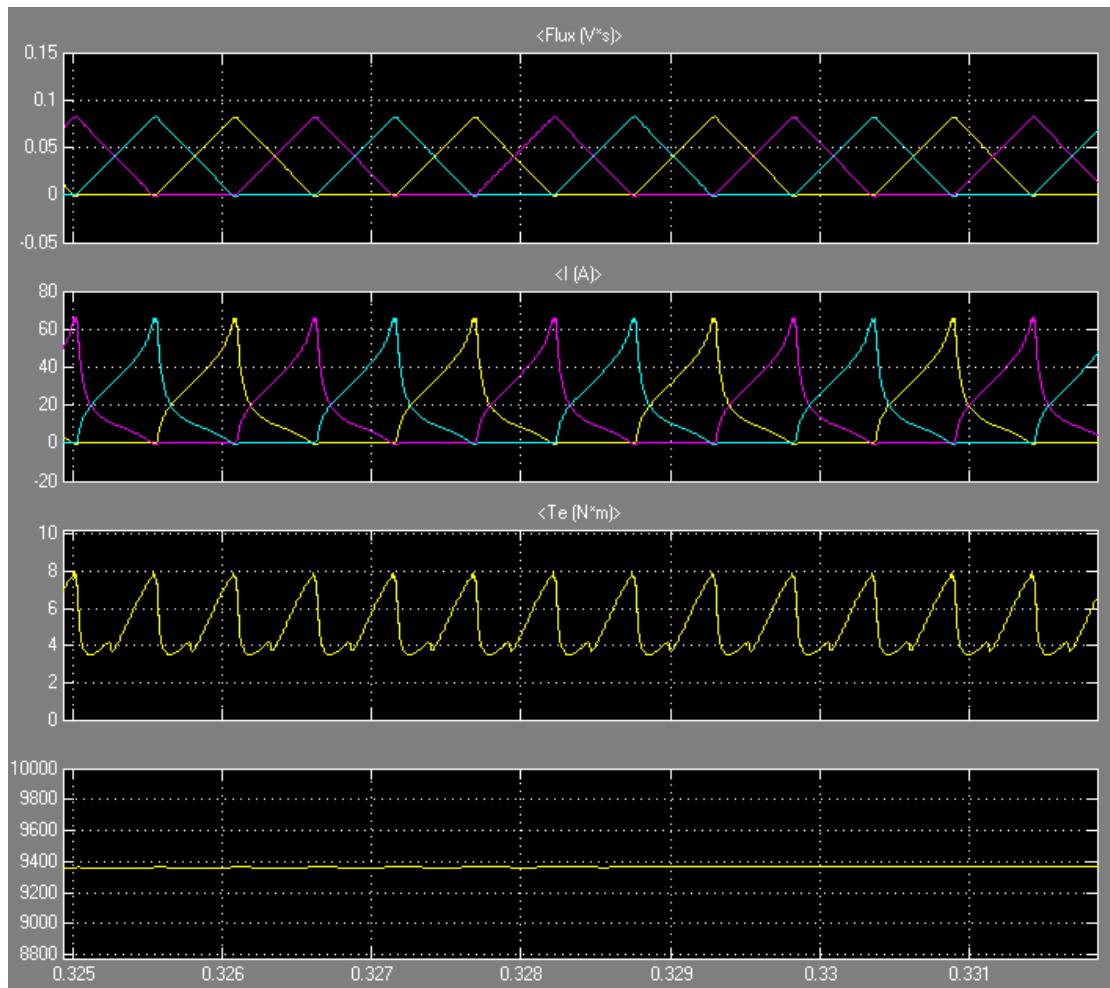


**Εικόνα 41: Λειτουργία με φορτίο 4Nm**

Στην (Εικόνα 41) φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με την εξής σειρά: πεπλεγμένη ροή κάθε φάσης (Vs), ρεύμα κάθε φάσης (A), ηλεκτρομαγνητική ροπή, ταχύτητα (rpm). Παρατηρείται ότι με τάση τροφοδοσίας 160V ο κινητήρας φτάνει τις 9500rpm με ονομαστικό φορτίο και ονομαστικό ρεύμα. Στη συνέχεια φαίνονται αναλυτικά οι κυματομορφές των μεγεθών κατά την εκκίνηση αλλά και κατά την μόνιμη κατάσταση.



**Εικόνα 42: Εκκίνηση με ονομαστικό φορτίο**



**Εικόνα 43: Μόνιμη κατάσταση με ονομαστικό φορτίο**

Παρατηρείται ότι κατά την εκκίνηση και όσο οι στροφές είναι χαμηλές (Εικόνα 42) οι παλμοί του ρεύματος είναι τετραγωνικοί, μη επικαλυπτόμενοι και η κυματομορφή της ροπής είναι όπως αυτή που έχει υπολογιστεί από την επίλυση του μαγνητοστατικού προβλήματος. Στην κορυφή κάθε παλμού ρεύματος φαίνεται μια μικρή αυξομείωση μεγάλης συχνότητας για την οποία ευθύνεται ο έλεγχος από τη ζώνη υστέρησης. Στη μόνιμη όμως κατάσταση (Εικόνα 43) που η ταχύτητα του κινητήρα φτάνει τις 9500rpm η συχνότητα των παλμών είναι τόσο μεγάλη που οι διακόπτες βρίσκονται σε μόνιμη αγωγή για να φτάσει το ρεύμα στην ονομαστική τιμή. Επίσης ο χρόνος ανόδου και καθόδου είναι συγκρίσιμος με το χρονικό διάστημα που διαρκεί ένας παλμός με αποτέλεσμα τα ρεύματα των φάσεων να επικαλύπτονται. Αν και η διακύμανση της ροπής είναι σημαντική η αδράνεια του δρομέα την εξομαλύνει με αποτέλεσμα να μην είναι εμφανής στη γωνιακή ταχύτητα του κινητήρα στις υψηλές στροφές.

### 6.3.1 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΕ ΦΟΡΤΙΟ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ

Σε αυτή την περίπτωση γίνεται μελέτη της απόκρισης σε φορτίο που μεταβάλλεται ως εξής:

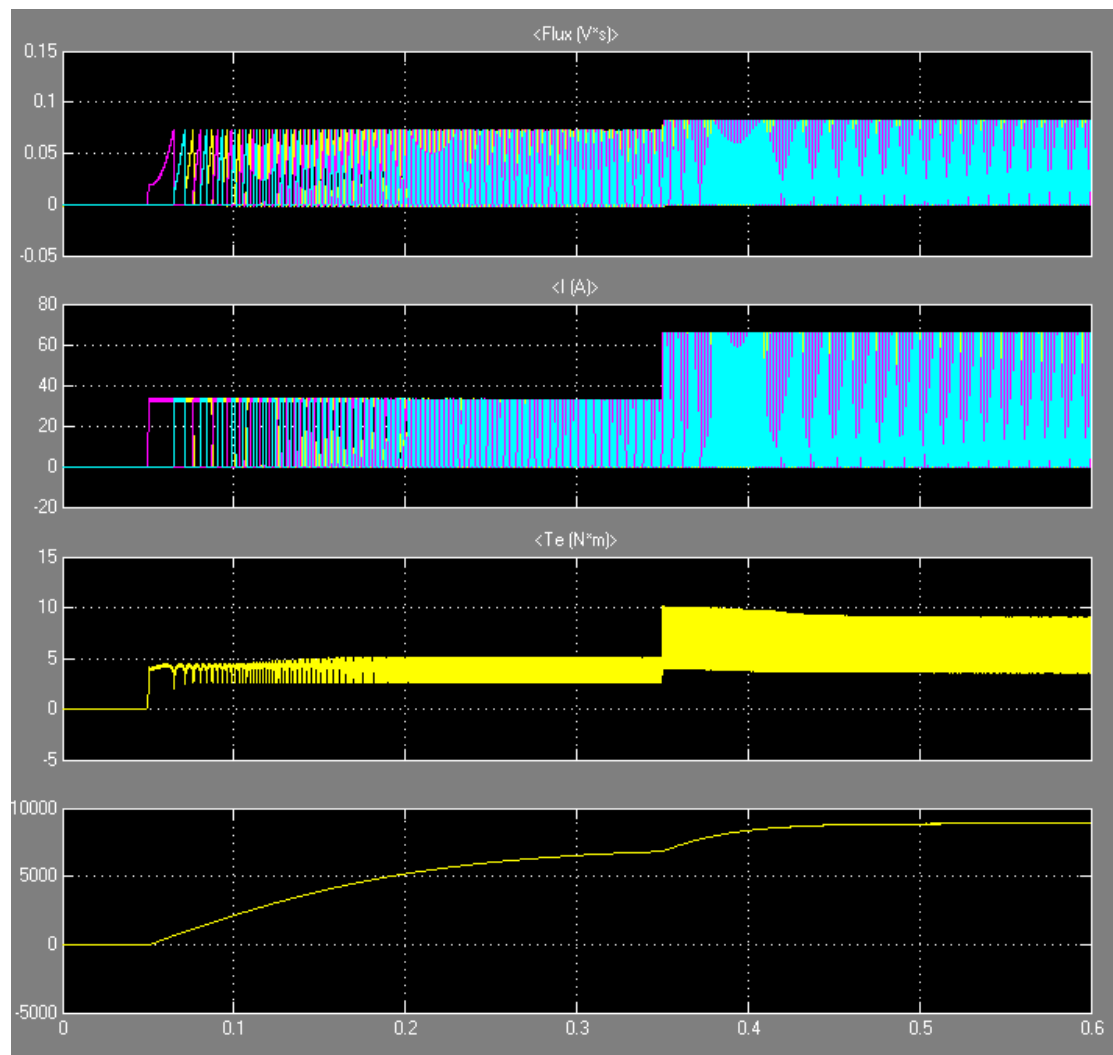
$$T_L = an_r^2 + bn_r$$

Σε αυτή την περίπτωση γίνεται ευκολότερα αντιληπτή και η λειτουργία του ελέγχου ρεύματος από το χρήστη του οχήματος.

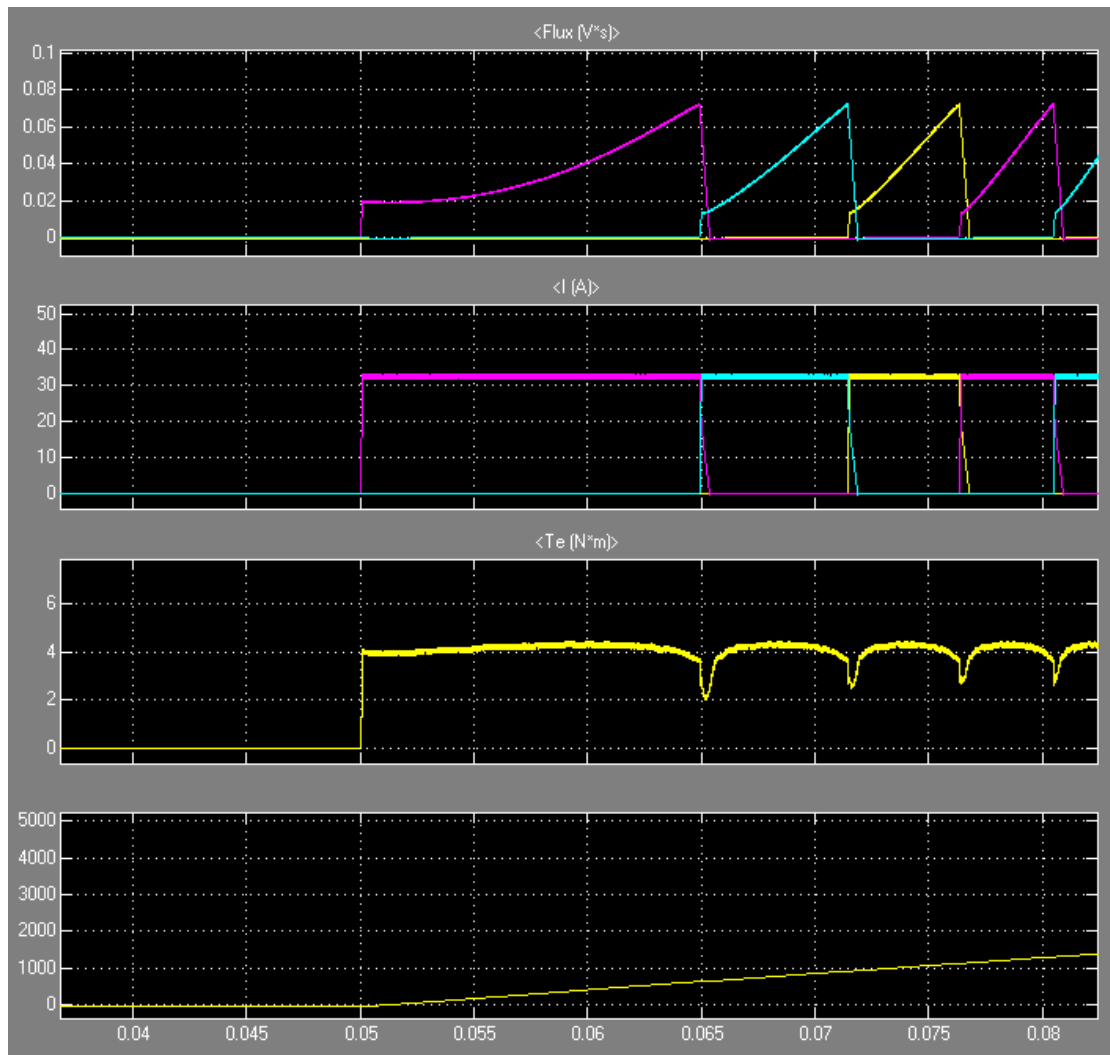
- $0 \leq t < 0.05 \rightarrow I = 0A$
- $0.05 \leq t < 0.35 \rightarrow I = 32.5A$
- $0.35 \leq t < 0.60 \rightarrow I = 65A$

Με την αύξηση του ρεύματος παρατηρείται και αύξηση στην παραγόμενη ροπή της μηχανής και τελικά αύξηση της ταχύτητας του δρομέα όπως φαίνεται στην Εικόνα 46.

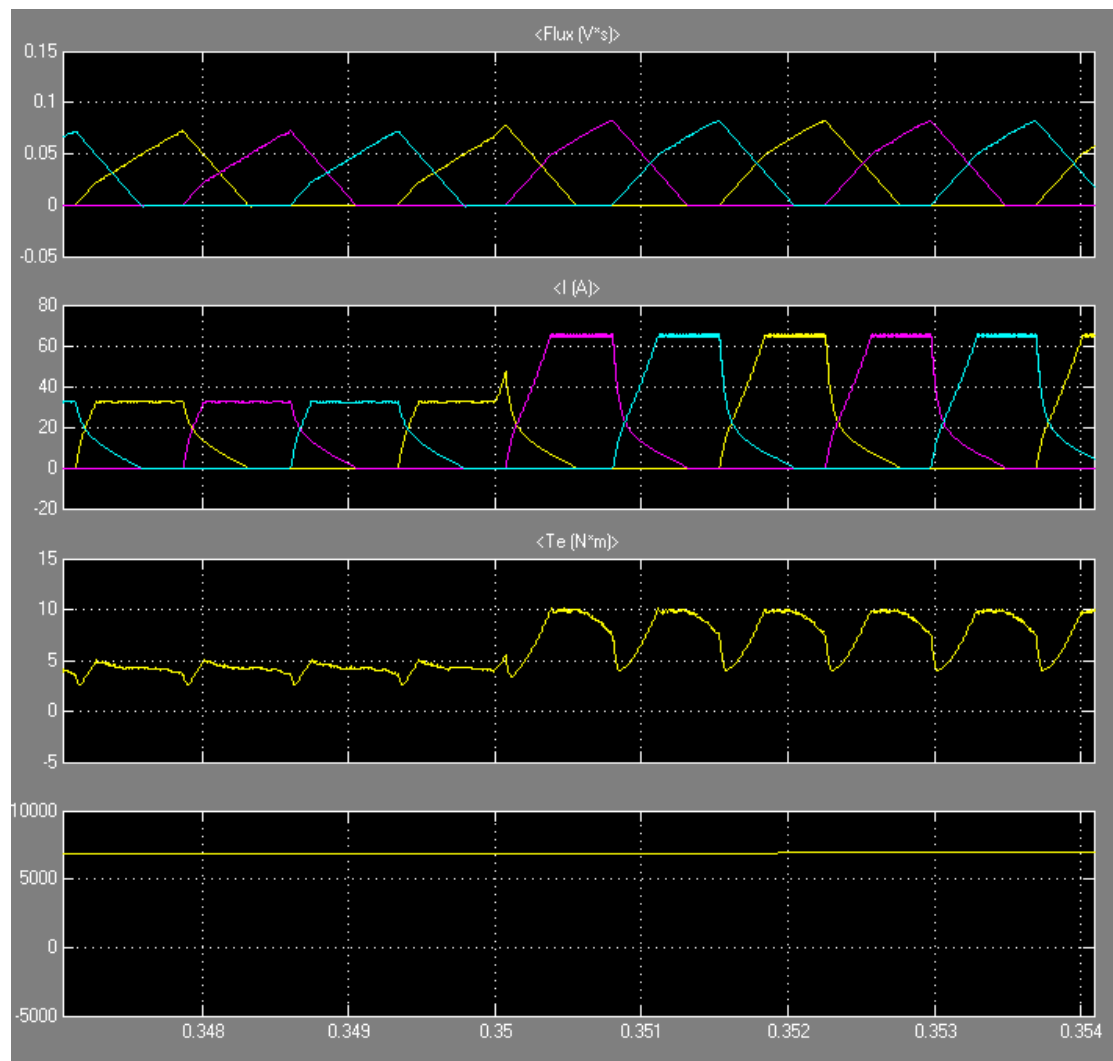




**Εικόνα 44: Εκκίνηση και λειτουργία σε φορτίο παραβολικής ροπής**



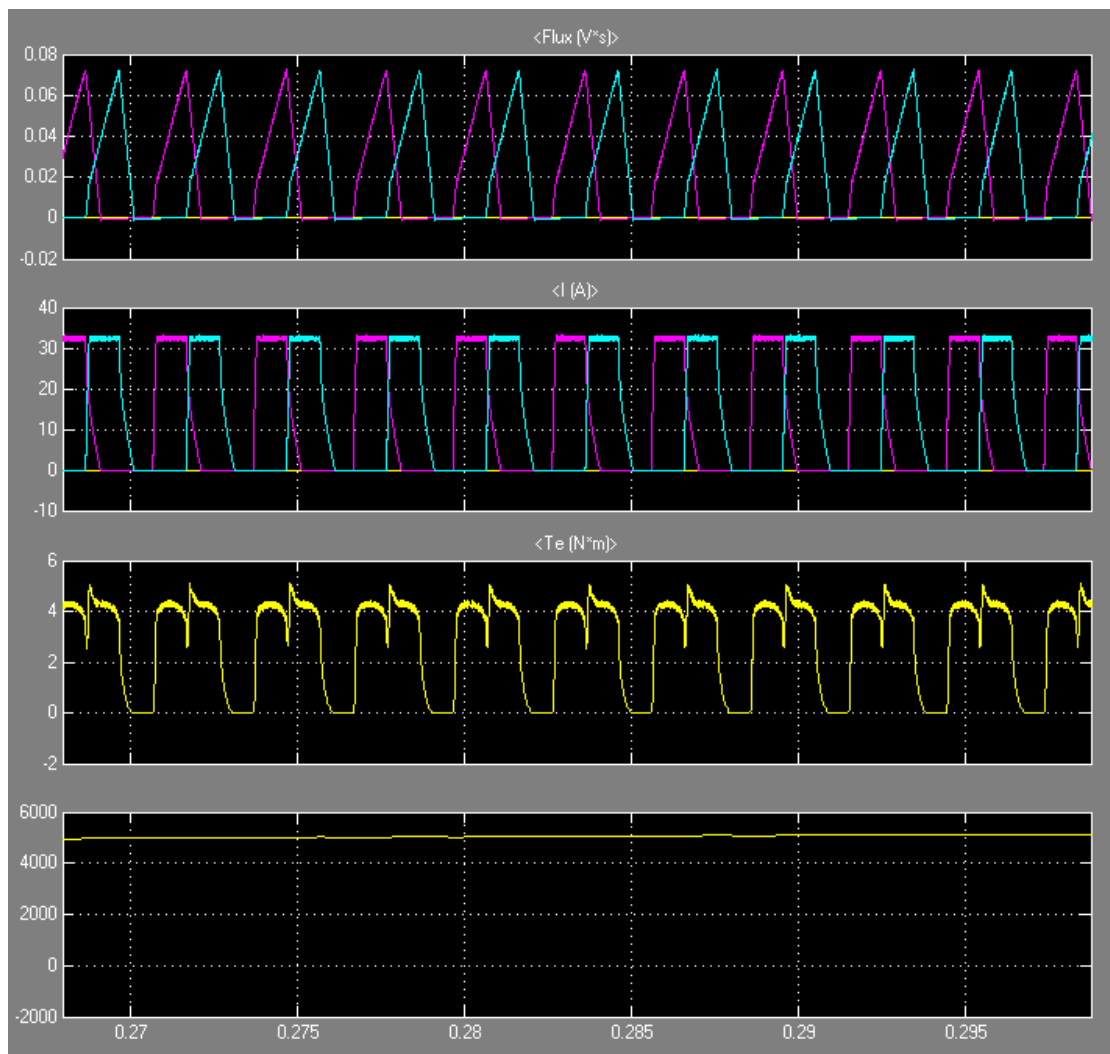
**Εικόνα 45: Εκκίνηση με ρεύμα μισό του ονομαστικού**



**Εικόνα 46: Αύξηση παραγόμενης ροπής με αύξηση ρεύματος στην ονομαστική τιμή**

### 6.3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα της SRM είναι η δυνατότητα της να λειτουργεί ακόμα και όταν μια φάση έχει βγει εκτός λειτουργίας λόγω κάποιου σφάλματος. Η ροπή που αποδίδεται δεν είναι ίδια φυσικά με την κανονική λειτουργία αλλά σε εφαρμογές που είναι απολύτως απαραίτητη η συνεχής λειτουργία της μηχανής ένα τέτοιο πλεονέκτημα είναι ιδιαίτερα σημαντικό.



**Εικόνα 47:** Λειτουργία με σφάλμα στη μία φάση

Στην Εικόνα 47 φαίνεται η λειτουργία της μηχανής με τη φάση A εκτός λειτουργίας. Είναι αντιληπτό ότι η μόνη διαφορά με την κανονική λειτουργία είναι η έλλειψη του παλμού ρεύματος της φάσης A και του αντίστοιχου πλήγματος ροπής. Η έλλειψη αυτή όμως πέρα από την αύξηση της διακύμανσης και τη μείωση της μέσης τιμής της ροπής

δεν επιφέρει άλλες συνέπειες στα κυκλώματα των άλλων φάσεων. Στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο αυτή η δυνατότητα είναι πολύ χρήσιμη αφού η δυνατότητα μετακίνησης του οχήματος ακόμα και μετά από κάποιο ηλεκτρικό σφάλμα είναι μείζονος σημασίας.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή διερευνήθηκε η εφαρμογή ηλεκτρικών συστημάτων σε αμιγώς ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Πιο συγκεκριμένα η μελέτη αυτή εστιάστηκε στη σχεδίαση κινητήριου συστήματος με μηχανή μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης. Από την έρευνα που διεξήχθη προέκυψαν πολλά και χρήσιμα συμπεράσματα. Αρχικά εξερευνήθηκαν τα δυνατά και αδύναμα σημεία των SRMs όσον αφορά τα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης αλλά και γενικότερες εφαρμογές. Σημαντικά πλεονεκτήματα που προέκυψαν όπως η απλότητα κατασκευής, η αυξημένη αξιοπιστία αλλά και η δυνατότητα παροχής μεγάλης ροπής σε μεγάλο εύρος στροφών είναι εξαιρετικά σημαντικά σε τέτοια εφαρμογή. Η σχεδίαση της μηχανής έγινε με εκκίνηση την απαιτούμενη ροπή αλλά και πεδιακά μεγέθη όπως η ηλεκτρική και μαγνητική φόρτιση. Στη συνέχεια όμως αναπτύχθηκε αλγόριθμος παραμετροποιημένης σχεδίασης SRM με σκοπό τη βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης αλλά και της επίδοσης. Παρατηρήθηκε μάλιστα ότι η βελτίωση στην αποδιδόμενη ροπή κάνοντας ανάλυση ευαισθησίας γεωμετρικών παραμέτρων της μηχανής ξεπέρασε το 40%. Ελέγχτηκε επίσης συστηματικά η σύγκλιση των πεπερασμένων στοιχείων, όσον αφορά τη ροπή, συναρτήσει του αριθμού των κόμβων του πλέγματος άρα και του χρόνου επίλυσης και παρατηρήθηκε βέλτιστο αποτέλεσμα με χρήση δύο στρώσεων στοιχείων στα σημεία του διακένου που υπάρχει ισχυρή μαγνητική επαγωγή, δηλαδή στους πόλους στάτη και δρομέα. Αφού υπολογίστηκαν οι παράμετροι της υπό σχεδίαση μηχανής έγινε πλήρης πεδιακή ανάλυση, εξάχθηκε η χαρακτηριστική ρεύματος ροπής και κατασκευάστηκε ο χάρτης απόδοσης από τον οποίο προέκυψε μέγιστος βαθμός απόδοσης που αγγίζει το 92%. Τέλος η λειτουργία μηχανής-μετατροπέα προσομοιώθηκαν σε λογισμικό Simulink και επαληθεύτηκε η δυνατότητα του συστήματος να οδηγήσει φορτία 4Nm σε ταχύτητες περιστροφής άνω των 8000rpm καθώς και η αυξημένη αξιοπιστία που διαθέτει ένα σύστημα ηλεκτρικής κίνησης με SRM.

## 7.2 ΣΗΜΕΙΑ ΠΡΟΑΓΩΓΗΣ ΤΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ

Η εργασία αυτή έχει ως αντικείμενο τον σχεδιασμό ενός κινητήρα για ηλεκτρικό όχημα μικρής κλίμακας. Ο κινητήρας σχεδιάζεται με κύριους στόχους την υψηλή απόδοση αλλά και τη μέγιστη δυνατή επίδοση σε μεγάλο φάσμα ταχυτήτων περιστροφής. Η διαδικασία που χρησιμοποιείται για τη σχεδίαση δεν είναι μόνο αναλυτική αλλά χρησιμοποιεί υπολογιστικά εργαλεία και αριθμητικές μεθόδους επίλυσης για να φτάσει στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Βασικό σημείο καινοτομίας της εργασίας αυτής είναι η κατασκευή αλγορίθμου που σχεδιάζει μηχανές μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης χρησιμοποιώντας λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων με εισόδους τις ειδικές φορτίσεις τις μηχανής, την τοπολογία και την επιθυμητή επίδοση. Πέρα από τη σχεδίαση όμως διερευνήθηκε και η σύγκλιση των πεπερασμένων στοιχείων στον τομέα της επίδοσης σε συνδυασμό με το χρόνο επίλυσης που απαιτείται έτσι ώστε να βρεθεί η βέλτιστη λύση. Αφού σχεδιάστηκε το τελικό μοντέλο της μηχανής έγινε θεωρητική διερεύνηση (πεπερασμένα στοιχεία) όλων των παραμέτρων της και τελικά προσομοιώθηκε η λειτουργία του σε συνεργασία με αντιστροφή σε λογισμικό Simulink για διάφορες φορτίσεις αλλά και κατάσταση σφάλματος για να εξεταστεί η δυνατότητα λειτουργίας υπό συνθήκες σφάλματος.

## 7.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Η εργασία αυτή εστιάστηκε στην ανάπτυξη μεθόδων για την σχεδίαση και μελέτη ηλεκτρικών μηχανών μεταβλητής μαγνητικής αντίστασης και μπορεί να αποτελέσει βάση για τη σχεδίαση και κατασκευή ολοκληρωμένου συστήματος κίνησης πειραματικού ηλεκτρικού οχήματος μικρού μεγέθους με κινητήρα SRM. Με την ολοκλήρωσή της αναδείχθηκαν οι παρακάτω προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση στο αντικείμενο αυτό:

- Κατασκευή της σχεδιασθείσας μηχανής και επαλήθευση των αποτελεσμάτων της πεδιακής ανάλυσης αλλά και της προσομοίωσης λειτουργίας.
- Εκτενής μελέτη των απωλειών πυρήνα σε SRM και προσπάθεια μοντελοποίησης με κατάλληλη τροποποίηση υπαρχόντων μοντέλων ή με δημιουργία νέου.
- Εκτενής μελέτη θερμικής συμπεριφοράς με σκοπό τη μείωση του μεγέθους η τη δυνατότητα υπερφόρτισης για μικρά χρονικά διαστήματα.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Juha Pyrhonen, Tapani Jokinen, Valeria Hrabovcova.** *Design of Rotating Electrical Machines.* s.l. : John Wiley & Sons ltd., 2008.
2. **Krishnan, R.** *Switched Reluctance Motor Drives: modelling, simulation, analysis design and applicaitons.* s.l. : CRC Press, 2001.
3. **Emadi, Ali.** *Energy-Efficient Electric Motors, Third Edition, Revised and Expanded.* s.l. : CRC Press, 2004.
4. **Miller, T.J.E.** *Switched Reluctance Motors and Their Control.* s.l. : Oxford University Press, 1993.
5. **McFee, S. Webb, J.P. Lowther, D.A.** A tunable volume integration formulation for force calculation in finite-element based computational magnetostatics. *IEEE Transactions on Magnetics.* January 1988 , σ. 439.
6. **Rahman, K.M. Schulz, S.E.** Design of high-efficiency and high-torque-density switched reluctance motor for vehicle propulsion. *IEEE Transactions on Industry Applications.* December 2002, Τόμ. 38, 6, σ. 1500.
7. **Μανωλάς, Ιάκωβος.** *Σχεδίαση και Έλεγχος Ηλεκτρικών Μηχανών Μεταβλητής Μαγνητικής Αντίστασης (Switched Reluctance Machines – SRMs).* s.l. : ΕΜΠ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, 2010. Διδακτωρική Διατριβή.
8. **Toliyat, Hamid A.** *DSP-Based Electromechanical Motion Control.* s.l. : CRC Press, 2004.
9. **Meeker, David.** Finite Element Method Magnetics: Core Loss Calculation. [Ηλεκτρονικό] 2011. <http://www.femm.info/wiki/CoreLossCalculation>.
10. *High Speed Switched Reluctance Drives: A Promising Alternative to Power Electric Vehicles.* **Hofmann, Andreas G., Kasper, Knut A. και De Doncker, Rik W.** The Shilla Jeju, Korea : IEEE, 2011. 8th International Conference on Power Electronics. σσ. 169-175.

