



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

**Βελτιστοποίηση γεωμετρίας για διαφορετικά υλικά  
μονίμων μαγνητών σε κινητήρες για ηλεκτρικά  
οχήματα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Κ. Σακκάς

**Επιβλέπων:** Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2020





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

## Βελτιστοποίηση γεωμετρίας για διαφορετικά υλικά μονίμων μαγνητών σε κινητήρες για ηλεκτρικά οχήματα

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Κ. Σακκάς

**Επιβλέπων:** Αντώνιος Γ. Κλαδάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 13 Οκτωβρίου 2020.

.....  
Αντώνιος Κλαδάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Στάυρος Παπαθανασίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Αντώνιος Αντωνόπουλος  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2020

.....

Γεώργιος Κ. Σακκάς

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Γεώργιος Κ. Σακκάς, 2020

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.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται και μελετά σε βάθος το θέμα της Βελτιστοποίησης Ηλεκτρικού Κινητήρα σε εφαρμογή Ηλεκτροκίνησης, τόσο σε επίπεδο επιλογής κατάλληλου είδους μαγνητικών υλικών όσο και βελτιστοποίησης της γεωμετρίας. Αυτό γίνεται, έχοντας λάβει υπόψιν τους κινδύνους του φαινομένου της απομαγνήτισης, όταν η μηχανή βρίσκεται σε κατάσταση σφάλματος.

Αρχικά, παρουσιάζεται μια σύντομη επισκόπηση της τεχνολογίας ηλεκτρικών κινητήρων και της εφαρμογής τους στην ηλεκτροκίνηση. Αναλύονται διάφορες αρχές λειτουργίας, είδη τυλίγματος, τοπολογίες μαγνητών και με αυτό τον τρόπο προσδιορίζονται οι επιλογές χαρακτηριστικών του κινητήρα που μελετάται και εξετάζεται κατά τη διάρκεια της εργασίας.

Στο θεωρητικό κεφάλαιο παρουσιάζεται μία περιεκτική ανασκόπηση της θεωρίας της απομαγνήτισης. Αρχικά δίνονται μέθοδοι προσδιορισμού της καμπύλης B-H των μαγνητών με βάση τα δεδομένα του κατασκευαστή. Στη συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά η εξάρτηση της απομαγνήτισης από τη γωνία που σχηματίζει το εξωτερικό πεδίο με τον ορθό άξονα του μαγνήτη. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται, κυρίως, στις μεθόδους και στρατηγικές υπολογισμού της απομαγνήτισης μέσω των συναρτήσεων μετεπεξεργασίας της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

Ακολουθεί, η περιγραφή και η χρήση αναλυτικών μεθόδων προκαταρκτικής σχεδίασης ηλεκτρικών κινητήρων με βάση το νέο ευρωπαϊκό οδηγικό κύκλο (NEDC). Με αυτές τις μεθόδους προσδιορίζονται προσεγγιστικά οι διαστάσεις καθώς και άλλα χαρακτηριστικά που οφείλει να έχει η μηχανή για να αποδίδει τις επιθυμητές επιδόσεις όπως η ροπή, η ταχύτητα περιστροφής, η Back EMF και το ονομαστικό ρεύμα.

Στη συνέχεια, σχεδιάζονται και παρατίθενται οι αλγόριθμοι της προ-επεξεργασίας και μετεπεξεργασίας της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων στο προγραμματιστικό περιβάλλον του MATLAB. Οι αλγόριθμοι αυτοί και η άρρηκτη διασύνδεσή τους, οδηγούν στον αρκετά λεπτομερή υπολογισμό των επιδόσεων και των χαρακτηριστικών καθώς επίσης και της απομαγνήτισης σε οποιαδήποτε λειτουργική κατάσταση της μηχανής. Τέλος, σχεδιάζεται και εφαρμόζεται η παράλληλη επεξεργασία των αλγορίθμων πεπερασμένων στοιχείων, με στόχο την παράλληλη ανάλυση μεγάλου πλήθους μηχανών.

Οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν, εφαρμόζονται σε γεωμετρία με ένθετους, ακτινικούς και τύπου V μαγνήτες με σκοπό τον υπολογισμό των επιδόσεων, χαρακτηριστικών και της συμπεριφοράς της, στην απομαγνήτιση. Η ανάλυση της απομαγνήτισης έγινε με βάση το περιοριστικό μοντέλο και ελέγχθηκε η εξάρτησή της από την τιμή του ρεύματος στάτη, τη γωνία του ρεύματος και τη θερμοκρασία των μαγνητών.

Η παραπάνω ανάλυση έγινε τοποθετώντας κάθε φορά ένα είδος μαγνήτη στην ίδια γεωμετρία για τρία διαφορετικά είδη μαγνητικών υλικών. Ακόμη, χρησιμοποιήθηκε και συνδυασμός των κατάλληλων ειδών μαγνητών στην ίδια γεωμετρία. Σ' αυτή τη περίπτωση αναλύθηκε η εξάρτηση της απομαγνήτισης ως προς τη θερμοκρασία από τα χαρακτηριστικά της γεωμετρίας.

Μετά την ανάδειξη της βέλτιστης γεωμετρίας, ακολούθησε τέλος, ανάλυση του πάχους των μαγνητικών υλικών και της αντοχής που προσδίδεται απέναντι στην εξάρτηση της απομαγνήτισης ως προς τη θερμοκρασία.

Η εργασία ολοκληρώνεται με την τοποθέτηση των συμπερασμάτων και τις δυνατότητες εξέλιξης και εμβάθυνσης των ερευνητικών θεμάτων που πραγματεύεται.

Λέξεις κλειδιά: Ηλεκτρικό Όχημα, Ηλεκτρικοί Κινητήρες Μονίμων Μαγνητών, Απομαγνήτιση, Βελτιστοποίηση Γεωμετρίας, Περιοριστικό Μοντέλο, Πεπερασμένα Στοιχεία, Βραχυκύκλωμα, Μαγνήτες Νεοδυμίου, Ανάλυση Ευαισθησίας

## ABSTRACT

This thesis undertakes an Optimization of Electric Motors in Electromobility applications, both in terms of selecting the appropriate type of permanent magnet material and optimizing the respective motor geometry. The risks of demagnetization effects as well as their impact on the machine operating characteristics in case of fault incidence are considered.

First, a brief overview of electric motor technology is presented implemented in Electromobility applications. Various operating principles, winding types, permanent magnet topologies are analyzed in order to determine the machine constitutive parts characteristics, that are studied and examined in this work.

An introductory chapter presents a comprehensive review of the theory of demagnetization. Methods for determining the B-H curve of magnets based on the manufacturer's data are illustrated. The dependence of the demagnetization risks on the angle formed by the outer field with the soft magnetic axis of the magnet, is described in detail. Particular emphasis is given to the methods and techniques for calculating demagnetization through the post-processing functions of finite element analysis.

Furthermore, description and use of detailed methods for the preliminary design of electric motors based on the new European driving cycle (NEDC). These methods approximate the dimensions as well as other machine characteristics in order to achieve the desired performance such as torque, rotational speed, back EMF and rated current.

Next, the pre-processing and post-processing algorithms implemented in conjunction with finite element analysis in the MATLAB programming environment are designed and presented. These algorithms, enable a detailed calculation of performance characteristics as well as demagnetization impact on any operating condition of the machine.

Finally, a parallel processing of finite element algorithms is designed and implemented, facilitating the parallel analysis of a large number of machines. These algorithms are applied to the selected machine topologies in order to calculate the performance, the characteristics and the behavior under demagnetization. The selected topologies include inset, radial and V type permanent magnets. The demagnetization analysis was performed based on the limiting model and its dependence on the stator current value, the current angle and the temperature of the magnets.

The above analysis was extensively performed by considering one type of magnetic material in each machine geometry amongst three different types of magnetic materials. In particular cases, a combination of suitable types of different magnetic materials in the same machine geometry was also considered. In these cases, the temperature dependence of the demagnetization on the geometry characteristics was equally analyzed.

After determining the optimal geometric topology, an analysis of the thickness of the magnetic materials was performed. During this analysis, the important reduction of the demagnetization impact with temperature, when the permanent magnet thickness was increasing, has been observed.

The last chapter of this thesis concentrates the derived conclusions and indicates some points for further development.

**Keywords:** Electric Vehicle, Electric Permanent Magnet Motors, Demagnetization, Geometry Optimization, Restrictive Model, Finite Element, Short Circuit, Neodymium Magnets, Sensitivity Analysis

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με σεβασμό και ευγνωμοσύνη θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους αμέριστα βοήθησαν για την εξέλιξη και την περάτωση της διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Αντώνιο Κλαδά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας την εργασία αυτή, καθώς και για την αδιάλειπτη και ακούραστη καθοδήγηση και συνεργασία του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της. Θα ήθελα ακόμη να τον ευχαριστήσω για τις γνώσεις που με ιδιαίτερο ζήλο μου μετέδωσε κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου στο πολυτεχνείο.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες είναι απαραίτητο να εκφράσω στον κ Ιάκωβο Μανωλά ,ο οποίος με ιδιαίτερη προσοχή και ευχαρίστηση βοήθησε στην οργάνωση της διπλωματικής. Οι συμβουλές του υπήρξαν πολύτιμες και άκρως απαραίτητες για την εξέλιξη της εργασίας.

Σημαντική βοήθεια, ακόμη, αποτέλεσαν, για μένα , οι συζητήσεις με τον κ. Μίνω Μπενιακάρ τόσο κατά τη διεξαγωγή του μαθήματος κατασκευής ηλεκτρικών μηχανών όσο και κατά τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

Εκφράζω ακόμη τις ευχαριστίες μου στον κ. Α. Κλαδά καθώς και στον κ. Κ. Λάσκαρη των οποίων τα επιτεύγματα αποτέλεσαν, για μένα, πηγή έμπνευσης για την ενασχόληση μου με τους ηλεκτρικούς κινητήρες.

Επιπρόσθετα ευχαριστώ τα αξιότιμα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, τον Καθηγητή κ. Σταύρο Παπαθανασίου και τον Επίκουρο Καθηγητή Αντώνιο Αντωνόπουλο για την επιστημονική τους συνδρομή.

Ακόμη ευχριστίες θέλω να απευθύνω σε όλους τους φίλους και συμφοιτητές μου που σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στάθηκαν δίπλα μου με πολύτιμες συμβουλές, πολύ γέλιο και συμπαράσταση.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου η οποία στάθηκε πολύτιμος αρωγός καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	7
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	8
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	12
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>12</b>
1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	12
1.2 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	14
<b>ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ</b>	<b>14</b>
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗ	14
2.1.1 Η ΣΗΜΕΡΙΝΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗΣ	15
2.1.2 ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΕΙΔΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗΣ	16
2.1.3 ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ ΕΝΟΣ ΑΜΙΓΟΥΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ	17
2.2 ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΕΙΔΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗ	19
2.2.1 Η ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΕΙΔΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	23
2.2.1.1 ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΕΙΔΗ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ (PMSM)	24
2.2.1.2 ΕΙΔΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΔΡΟΜΕΑ ΣΕ ΜΗΧΑΝΕΣ ΑΚΤΙΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ	26
2.2.2 ΕΙΔΗ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΣΤΑΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΑΚΤΙΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ (RF-PMSM)	27
2.3 ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ	28
2.3.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ	29
2.3.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FEA) ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ.	32
2.4 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ	34
2.4.1 ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ: ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ	35
2.4.2 ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ: ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ ΚΑΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ	39
2.4.3 ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΣΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ	41
2.5 Η ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΣΕ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ	47
2.6 ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	53
<b>ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ</b>	<b>53</b>

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ:	53
3.2 ΜΕΛΕΤΗ ΚΥΚΛΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	53
3.3 ΘΕΩΡΙΑ ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ	55
3.3.1 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ	55
3.3.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ, ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ, ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ	56
3.3.3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΑΥΛΑΚΑΣ ΚΑΙ ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΑ ΘΕΡΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ	56
3.3.4 ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ, ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΡΟΠΗ	57
3.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΗΧΑΝΗΣ	59
3.4.1 ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΗΣ	59
3.4.2 ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ	61
3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ	64
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b>	<b>65</b>
<b>ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ (2D-FEA) ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ (PRE &amp; POST PROCESS &amp; PARALLEL PROCESS)</b>	<b>65</b>
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ:	65
4.2 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ	65
4.3 ΠΡΟ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΑΤΗ	69
4.4 ΠΡΟ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ	70
4.5 ΠΡΟ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΔΡΟΜΕΑ	71
4.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΠΡΑΞΗ	76
4.7 ΜΕΤΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ	78
4.7.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ	78
4.7.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ	80
4.7.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ	82
4.8 ΠΑΡΑΛΛΗΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΩΔΙΚΑ	84
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</b>	<b>86</b>
<b>ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ</b>	<b>86</b>
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	86
5.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΗΣ	86
5.3 ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΜΑΓΝΗΤΗ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΤΙΣ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ	87
5.3.1 ΜΗΧΑΝΗ ΜΕ ΜΑΓΝΗΤΕΣ ND52	89
5.3.1.1 ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	90
5.3.1.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 1,5 ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ	95
5.3.1.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 7 ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ	98
5.3.2 ΜΗΧΑΝΗ ΜΕ ΜΑΓΝΗΤΕΣ ND50H	99
5.3.2.1 ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	100
5.3.2.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 1.5 ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ	100
5.3.2.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 7 ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ	101
5.3.3 ΜΗΧΑΝΗ ΜΕ ΜΑΓΝΗΤΕΣ ND42UH	102
5.3.3.1 ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	103
5.3.3.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 1.5 ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ	103
5.3.3.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 7 ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ	104
5.3.4 ΜΗΧΑΝΗ ΜΕ ΣΥΝΔΙΑΣΜΟ ΜΑΓΝΗΤΩΝ: ND42UH (SPOKE & V-TYPE), ND50H (INSERT TYPE)	105
5.3.4.1 ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	106
5.3.4.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 1.5 ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ	106
5.3.4.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 7 ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ	107

5.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	108
5.4.1 ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	109
5.4.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 7 ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ	110
5.5.1 ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	112
5.5.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 7 ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ	114
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6</b>	<b>116</b>
<b>ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>116</b>
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	116
6.2 ΣΥΝΟΨΗ	116
6.3 ΚΥΡΙΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	116
6.4 Η ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗ	117
6.5 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	118
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>119</b>
<b>ΑΝΑΦΟΡΕΣ</b>	<b>120</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ</b>	<b>122</b>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάδειξη της σημασίας της απομαγνήτισης των μόνιμων μαγνητών σε σύγχρονους κινητήρες όσον αφορά την ελαχιστοποίηση του κόστους για την παραγωγή τους. Ακόμη στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία αλγορίθμων που θα εξετάζουν τη γεωμετρία ως προς την επίδοση της και ως προς την αντοχή που έχει στην απομαγνήτιση. Οι αλγόριθμοι αυτοί αποτελούν προϋπόθεση για την εύρεση βέλτιστης γεωμετρίας με γνώμονα την απομαγνήτιση και την επίδοση. Η ανάλυση της απομαγνήτισης των μηχανών ως παράμετρος ευαισθησίας με στόχο την διατήρηση των αρχικών επιδόσεων, μας οδηγεί σε μία νέα μηχανή με αυξημένη αντοχή σε σφάλματα ή σε μία νέα μηχανή με όσο το δυνατό λιγότερο υλικό μαγνήτη με επαρκή συμπεριφορά σε ακραίες συνθήκες και συνθήκες σφάλματος.

Η παρούσα εργασία δεν έχει ως άμεσο στόχο την ελαχιστοποίηση της υπολογιστικής ισχύος στους υπολογιστικούς αλγορίθμους ανάλυσης της απομαγνήτισης, ωστόσο το σύγχρονο ανταγωνιστικό περιβάλλον επιτάσσει την ανάδειξη οδών ανάλυσης με όσο το δυνατόν λιγότερη πολυπλοκότητα και περιπλοκότητα. Επιπλέον, η ανάλυση μιας τυπικής γεωμετρίας με λίγους βαθμούς ελευθερίας είναι αρκετά βοηθητική στην εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας ώστε να πληροί τους στόχους που θέλουμε να επιτύχουμε, αφού μπορούμε σε λίγο χρόνο με επαρκώς γρήγορους αλγορίθμους να την εξάγουμε. Στην περίπτωση της μελέτης της απομαγνήτισης, οι γεωμετρίες με λίγους βαθμούς ελευθερίας ίσως δίνουν την αίσθηση αναλογίας ανάμεσα στην ποσότητα και στην αντοχή των μαγνητών, και συνεπώς στερούν την δυνατότητα επίτευξης μεγάλης αντοχής με σχετικά μικρό όγκο μαγνήτη. Με σκοπό να αναλυθεί πλήρως η σχέση της αντοχής των μαγνητών με το μέγεθος τους έγινε χρήση μιας σύνθετης πολλών μεταβλητών γεωμετρίας δρομέα.

Τέλος, στην παρούσα εργασία, τονίζονται και τα οφέλη που μπορεί να μας παρέχει μια επιλογή γεωμετρίας με διαφορετικά είδη και βαθμίδων μαγνητών στις διάφορες θήκες του δρομέα.

### 1.2 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική πραγματεύεται, όπως γίνεται έκδηλο και από τον τίτλο, τη βελτιστοποίηση γεωμετρίας των ηλεκτρικών κινητήρων με τη χρήση διάφορων κύριων μαγνητικών υλικών και τη συμπεριφορά τους στην απομαγνήτιση.

Αποτελείται από τρεις κύριες νοηματικές ενότητες, οι οποίες αναλύονται σε έξι διακριτά κεφάλαια. Η πρώτη ενότητα της εργασίας αποτελεί το πρώτο εισαγωγικό μέρος και εμπεριέχει τον τίτλο της, την περίληψη και τα περιεχόμενα καθώς και το 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο που δηλώνει το σκοπό και την δομή της διπλωματικής.

Ακολουθεί η δεύτερη ενότητα, η οποία αποτελείται από τα κεφάλαια 2, 3 και 4. Αρχικά, γίνεται ανασκόπηση της διεθνούς και εγχώριας βιβλιογραφίας και επισημαίνεται το κύριο θεωρητικό υπόβαθρο, που είναι απαραίτητο για την κατανόηση της λειτουργίας των ηλεκτρικών κινητήρων και στη συνέχεια αναλύονται με την πρέπουσα λεπτομέρεια οι βασικές αρχές του φαινομένου της απομαγνήτισης που λαμβάνει χώρα σε έναν ηλεκτροκινητήρα, όταν βρίσκεται σε κατάσταση σφάλματος. Αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2 ανήκουν οι παρακάτω υπο-ενότητες:

- Εισαγωγή στην Ηλεκτροκίνηση

- Τα βασικά είδη ηλεκτρικών κινητήρων στην ηλεκτροκίνηση
- Τρόποι Ανάλυσης της Λειτουργίας Σύγχρονων Μηχανών Μόνιμων Μαγνητών
- Υλικά κατασκευής Ηλεκτρικών Μηχανών
- Η σύγχρονη μηχανή μόνιμων μαγνητών σε κατάσταση Σφάλματος
- Θερμική και μηχανική ανάλυση ηλεκτρικών μηχανών

Και αντίστοιχα το Κεφάλαιο 3 αναλύει τις παρακάτω έννοιες και μεθόδους:

- Μελέτη Κύκλου Φόρτισης Κινητήρα
- Θεωρία Προκαταρκτικής Σχεδίασης και οι Μέθοδοι Σχεδίασης
- Οριοθέτηση Χαρακτηριστικών Μηχανής
- Χρήση και Συμπεράσματα Αναλυτικών Μεθόδων

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται με λεπτομέρεια ο σχεδιασμός του προς σχεδίαση κινητήρα με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και ακολουθεί η σχηματική αναπαράσταση και επεξήγηση των αλγορίθμων συστημικής ανάλυσης. Αυτό φαίνεται και από τις διακριτές υπό ενότητες του κεφαλαίου :

- Οργάνωση της Μηχανής
- Προ-επεξεργασία : Κατασκευή Γεωμετρίας Στάτη, Τυλίγματος και Δρομέα
- Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων στην Πράξη και Μετεπεξεργασία
- Παραλληλοποίηση Κώδικα

Τρίτη και τελευταία ενότητα αποτελεί το πρακτικό κομμάτι της διπλωματικής εργασίας, το οποίο αφορά την απαρίθμηση των αποτελεσμάτων των αλγορίθμων και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Απαρτίζεται από τα

- Κεφάλαιο 5 : Αριθμητικά Αποτελέσματα και Ανάλυση Ευαισθησίας
- Κεφάλαιο 6 : Σύνοψη και Συμπεράσματα

Τα αριθμητικά αποτελέσματα προκύπτουν με βάση τους προαναφερθέντες αλγορίθμους και χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη συμπερασμάτων και στην ανάλυση ευαισθησίας με γνώμονα τη γεωμετρία της μηχανής και του πάχους των μαγνητών καθώς και τις επιπτώσεις τους στην ροπή και στην απομαγνήτιση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

#### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗ

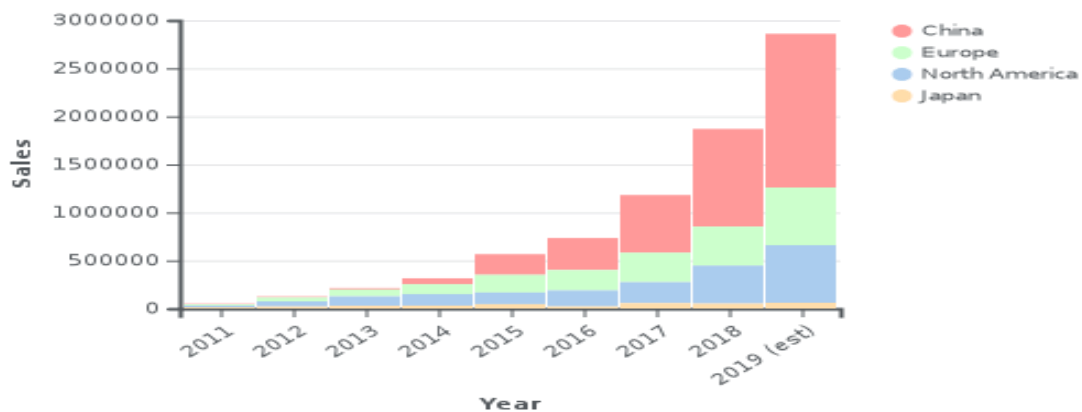
Σε παγκόσμια κλίμακα υπάρχει η τάση για θετική εξέλιξη της στάσης ζωής που πρέπει να έχει ο καθένας από εμάς απέναντι στο περιβάλλον. Το παρελθόν μας αποδεικνύει πώς οι μέχρι τώρα ενέργειες του ανθρώπου απέναντι στο περιβάλλον υπήρξαν επιβλαβείς και καταστροφικές όχι μόνο για το οικοσύστημα αλλά και για την υγεία και για το ευ ζην όλων των έμβιων όντων που ζουν σε αυτό. Οι μελέτες που έχουν γίνει και συνεχίζουν να γίνονται όσον αφορά την ενεργειακή οικονομία και το περιβαντολογικό αντίκτυπο των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, μας υποδεικνύουν ότι το μέλλον βρίσκεται στην παραγωγή ενέργειας μέσω ανανεώσιμων διεσπαρμένων πηγών. Η διαχείριση αυτής της καθαρής ενέργειας όσον αφορά την παραγωγή της αλλά και την κατανάλωση της δίνει χώρο ύπαρξης στο αντικείμενο της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής. Όσο πιο υψηλός ο βαθμός απόδοσης της μετατρεπόμενης ενέργειας τόσο πιο μικρή η απαίτηση για κατανάλωση ενέργειας από μη ανανεώσιμους πόρους.

Ένα μεγάλο μέρος της ανθρώπινης δραστηριότητας είναι οι μετακινήσεις και οι μεταφορές, στις οποίες χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο μηχανές εσωτερικής καύσης. Αυτού το είδους οι μηχανές δαπανούν μεγάλα ποσά ενέργειας για την παραγωγή μικρού ωφέλιμου έργου. Στον αντίποδα βρίσκεται η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως ανεμογεννήτριες, και από τα θερμικά εργοστάσια παραγωγής, τα οποία αξιοποιούν αποδοτικές μεθόδους θερμοδυναμικών κύκλων. Δεδομένου ότι η ηλεκτρομηχανική μετατροπή διαθέτει βαθμούς απόδοσης μεγαλύτερους από 95%, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα πως η εξ ηλεκτρίση των μετακινήσεων και μεταφορών θα είχε θετικό αντίκτυπο στο περιβάλλον. Για το λόγο αυτό κράτη και ενώσεις κρατών με γνώμονα ένα πιο καθαρό και φιλικό προς τον άνθρωπο περιβάλλον, δίνουν οικονομικά κίνητρα στην αγορά για την απόκτηση αμιγών ηλεκτρικών οχημάτων ενώ παράλληλα επιρρίπτουν ποινές και δασμούς σε δραστηριότητες που περιέχουν καύση ορυκτών καυσίμων.

Η εδραίωση της ηλεκτροκίνησης στην σύγχρονη καθημερινότητα καλείται να αντιμετωπίσει ποικίλες προκλήσεις. Μια εκ των προκλήσεων είναι η αυτονομία των οχημάτων. Ουσιαστική λύση στο πρόβλημα δίνουν οι καινοτόμες μηχανές αυξημένων αποδόσεων και οι μπαταρίες νέων τεχνολογιών που αποσκοπούν στην αύξηση της αποθηκευμένης ενέργειας. Όσον αφορά τις μηχανές, επιτακτική είναι η ανάγκη εύρεσης σπάνιων γαιών όπως το Νεοδΐμιο για την αύξηση της απόδοσης τους. Η δημιουργία μηχανών και κινητήρων από τέτοια μεταλλεύματα με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος καθώς και η ευρεία διάδοση τους στην αγορά αποτελεί πρόκληση για τη σημερινή βιομηχανία κατασκευής ηλεκτρικών οχημάτων. Η κύρια όμως δυσκολία που αντιμετώπιζε στο παρελθόν και συνεχίζει να αποτελεί το κύριο ερευνητικό περιεχόμενο της ηλεκτροκίνησης είναι τα υλικά των μπαταριών που χρησιμοποιεί. Ωστόσο, πλέον το πρόβλημα αυτό έχει αντιμετωπιστεί σε μεγάλο βαθμό με τη χρήση μπαταριών ιόντων Λιθίου. Τέλος, ο συνδυασμός των δύο αυτών μεταλλευμάτων είναι ένα κρίσιμο ζήτημα για την εδραίωση της τιμής τους στην αγορά, δημιουργώντας πολλές και ευμετάβλητες στον χρόνο σχεδιαστικές επιλογές ώστε να επιτυγχάνεται κάθε φορά ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής. Το αποτέλεσμα αυτής της μελέτης αναδεικνύει την ηλεκτροκίνηση σε θέση ανταγωνιστική μαζί με τα συμβατικά οχήματα.

### 2.1.1 Η ΣΗΜΕΡΙΝΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗΣ

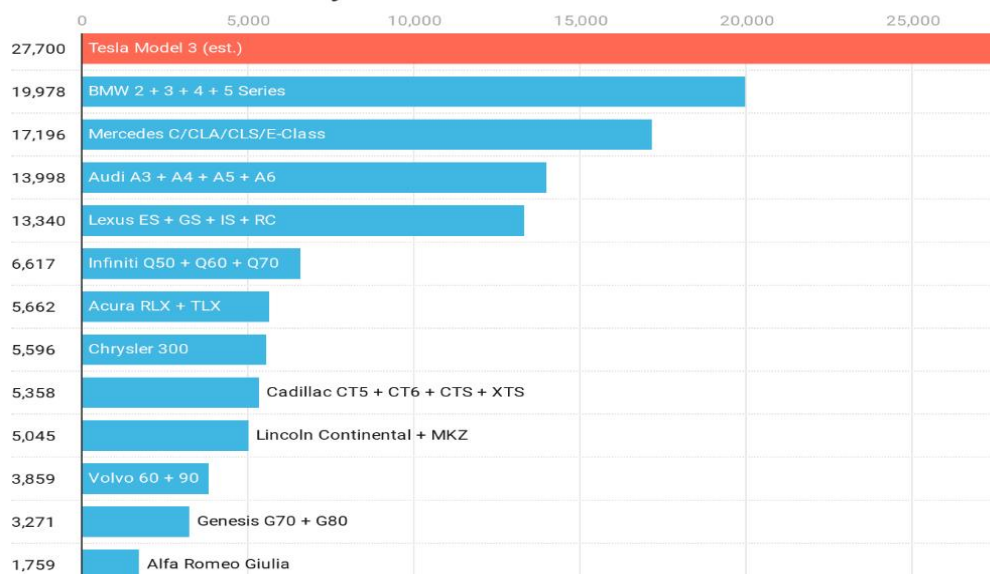
Η αγορά των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ένας αντιπροσωπευτικός δείκτης της σημασίας που έχει η ηλεκτροκίνηση στην σημερινή καθημερινότητα. Καθημερινά η άποψη της κοινής γνώμης διαμορφώνεται ανάλογα με τις κοινωνικές δυνάμεις που ασκούνται σε αυτή, και συνεπώς η συνείδηση για ένα καθαρό περιβάλλον ακολουθούμενη από οικονομικά κίνητρα οδηγούν τον σύγχρονο άνθρωπο, όλο και πιο κοντά στην αγορά ενός ηλεκτροκίνητου οχήματος. Παρακάτω δίνεται ένα διάγραμμα σχετικό με τον αριθμό των πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων που έχουν πραγματοποιηθεί την τελευταία δεκαετία ανά τον κόσμο.



Σχ.2.1.1.1 Πωλήσεις Ηλ. Οχημάτων από 2011 έως 2018 σύμφωνα με τα δεδομένα της Wikipedia ([tinyurl.com/zwug3pp](http://tinyurl.com/zwug3pp))

Το πρώτο τρίμηνο του 2020 το πρώτο σε πωλήσεις μικρού-μεσαίου μεγέθους αυτοκίνητο στην Αμερική (USA) υπήρξε το Tesla Model 3 ξεπερνώντας μάλιστα και ολόκληρες σειρές από παγιωμένες αυτοκινητοβιομηχανίες στον χώρο. Παρακάτω δίνεται ένα διάγραμμα που αποδεικνύει πώς το μέλλον της ηλεκτροκίνησης ίσως είναι πιο ευοίωνα από της προϋπάρχουσες προβλέψεις.

#### Small + Midsize Luxury Car Sales – Q1 2020



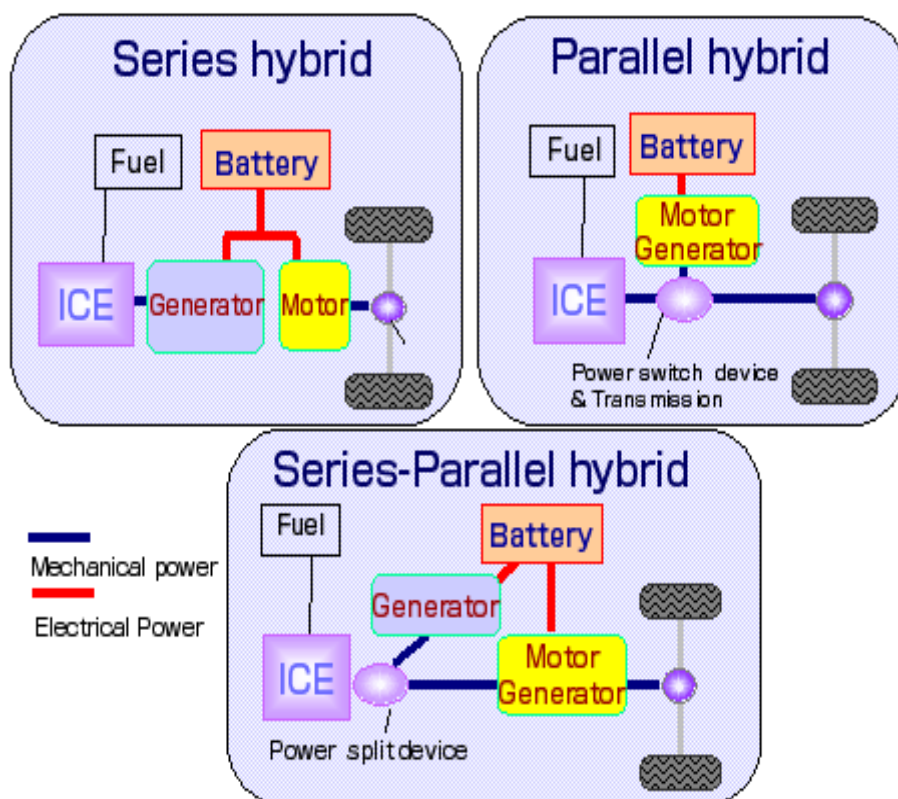
USA sales in the first quarter of 2020. Automaker data except for Tesla Model 3 sales, which are an informed estimate. Chart: CleanTechnica • Source: Automakers, CleanTechnica • Created with Datawrapper

Σχ.2.1.1.2 Πωλήσεις αυτοκινήτων Α' τριμήνου 2020 στις ΗΠΑ σύμφωνα με τη μελέτη της σελίδας: ["cleantechnica.com"](http://cleantechnica.com) ([tinyurl.com/y34wo827](http://tinyurl.com/y34wo827))

### 2.1.2 ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΕΙΔΗ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗΣ

Τα οχήματα που χρησιμοποιούν την ηλεκτρική ενέργεια για την κίνησή τους είτε ως κύριο μέσω κίνησης (αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα) είτε ως βοηθητικό μέσω (Υβριδική τεχνολογία μηχανής εσωτερικής καύσης και ηλεκτροκινητήρα) συνθέτουν την σύγχρονη αυτοκινητοβιομηχανία της ηλεκτροκίνησης.

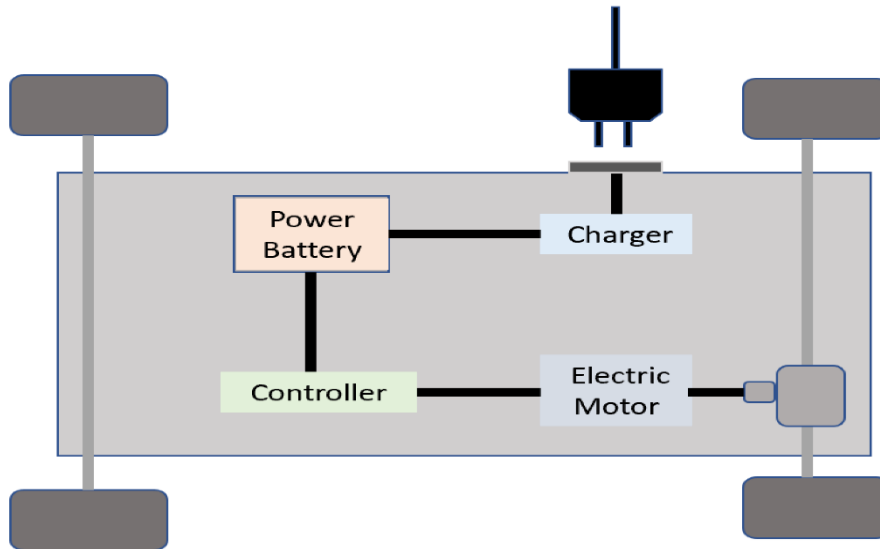
Τα υβριδικά αυτοκίνητα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με την κύρια πηγή παροχής ώσης. Τα παράλληλα υβριδικά αυτοκίνητα χρησιμοποιούν τον ηλεκτρικό κινητήρα ως βοηθητικό για χαμηλές σχετικά ταχύτητες ενώ η μηχανή εσωτερικής καύσης ενεργοποιείται σε πιο υψηλές ταχύτητες. Τα οχήματα αυτά χρησιμοποιούν κυρίως αναγεννητική πέδηση για την παροχή ενέργειας στις μπαταρίες ενώ μερικά από αυτά διαθέτουν και δυνατότητα φόρτισης. Από την άλλη πλευρά είναι η σειριακή υβριδική τεχνολογία που είναι πιο κοντά στην καθαρή ηλεκτροκίνηση. Τα οχήματα αυτά κινούνται αποκλειστικά με ηλεκτροκινητήρα ενώ διαθέτουν και μηχανή εσωτερικής καύσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μιας γεννήτριας στις μπαταρίες. Η σειριακή υβριδική τεχνολογία έχει σημαντικά προτερήματα σε επίπεδο αποδόσεων, όμως το βάρος των οχημάτων είναι σχετικά αυξημένο. Και σε αυτή τη τεχνολογία υπάρχει η δυνατότητα φόρτισης και αναγεννητικής πέδησης. Ωστόσο ο συνδυασμός αυτών των δύο τεχνολογιών είναι επίσης εφικτός συνδυάζοντας ορισμένα πλεονεκτήματα και των δύο μεθόδων με τίμημα την πολυπλοκότητα. Παρακάτω δίνεται ένα τυπικό διάγραμμα που αναπαριστά τα επιμέρους μέρη της κάθε μίας από αυτές τις τεχνολογίες



Σχ.2.1.2.1 Block διάγραμμα των συστημάτων πρόωσης υβριδικής τεχνολογίας. Η εικόνα αυτή βρέθηκε στην ιστοσελίδα "evaap.org" ([tinyurl.com/yynrsx6r](http://tinyurl.com/yynrsx6r))



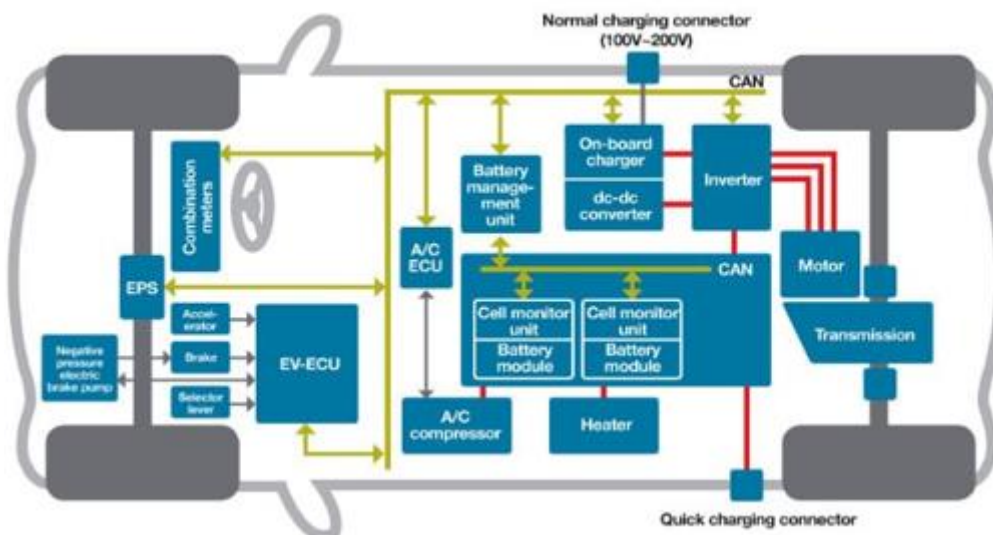
Τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα, διαθέτουν αποκλειστικά ηλεκτροκινητήρες και μπαταρίες. Η απόδοσή τους είναι πολύ υψηλή αφού η μόνη παροχή ενέργειας προέρχεται από την δυνατότητα αποθήκευσης στις μπαταρίες κάτι το οποίο είναι αρκετά ακριβό εξαιτίας του κόστους της. Και σ' αυτή την τεχνολογία το βάρος του οχήματος είναι αρκετά υψηλό λόγω του μεγέθους της μπαταρίας. Παρ' όλα αυτά η δυναμική του αυτοκινήτου (Vehicle Dynamic) και η κατανομή του βάρους μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν στο στόχο της οδηγικής αίσθησης.



Σχ. 2.1.2.2 Block Διάγραμμα του συστήματος πρόωσης ενός αμιγούς ηλεκτρικού οχήματος. Η εικόνα βρέθηκε στην ιστοσελίδα "mdpi.com" ([tinyurl.com/y6zze8vh](http://tinyurl.com/y6zze8vh))

### 2.1.3 ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΜΕΡΗ ΕΝΟΣ ΑΜΙΓΟΥΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Τα βασικά μέρη που συνθέτουν το σύστημα πρόωσης ενός αμιγούς ηλεκτρικού οχήματος δίνονται σχηματικά παρακάτω:



Σχ. 2.1.3.1 Τα βασικά μέρη ενός ηλεκτροκίνητου αυτοκινήτου, μαζί με τα περιφερικά συστήματα ελέγχου. Η εικόνα αυτή βρέθηκε στην ιστοσελίδα [arrow.com](http://arrow.com) ([tinyurl.com/y5h7pbfw](http://tinyurl.com/y5h7pbfw))

Όπως παρατηρούμε και στην εικόνα (Σχ 1.5) τα βασικά μέρη ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι η μπαταρία, ο αντιστροφέας, ο ηλεκτροκινητήρας, το κιβώτιο ταχυτήτων

και το διαφορικό. Το κάθε ένα από αυτά θα πρέπει να ανταλλάσσει πληροφορίες μέσω σημάτων τόσο μεταξύ τους όσο και με τον οδηγό ή χειριστή αλλά και με τους διάφορους αισθητήρες που υπάρχουν στο όχημα. Για το λόγο αυτό έχουν κατά καιρούς εφαρμοστεί αρκετά πρωτόκολλα επικοινωνίας αν και το πιο διαδεδομένο είναι το CAN BUS. Μια ακόμα σημείωση είναι πως το κάθε ένα από τα παραπάνω κύρια συστήματα έχει και άλλα διάφορα υποσυστήματα όπως η μπαταρία το BMS ( Battery Management System), ο ηλεκτροκινητήρας διαθέτει στοιχεία ελέγχου θέσεις δρομέα για την σωστή οδήγησή του από τον αντιστροφέα κλπ. Το κύριο κέντρο ελέγχου ενός αυτοκινήτου όσον αφορά τη βοήθεια οδήγησης αλλά και την αναγνώριση σφαλμάτων την παρέχει ως μονάδα επεξεργασίας η ECU (Engine Control Unit). Επίσης, κατά τον σχεδιασμό των ηλεκτρικών αυτοκινήτων η μπαταρία πολλές φορές δεν διαθέτει το επιθυμητό επίπεδο τάσης για την επιμέρους λειτουργία των άλλων συστημάτων και συνεπώς αναγκαίο είναι τότε να υπάρξει και ένας μετατροπέας DC-DC. Σε αυτή τη περίπτωση, για λόγους ασφάλειας και Ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, υπάρχει πλήρη απεξάρτηση των δύο κυκλωμάτων χαμηλής και υψηλής ισχύος. Η δυνατότητα φόρτισης ενός αυτοκινήτου από υπέρ-φορτιστές οδηγεί στη ύπαρξη και άλλου ηλεκτρονικού εξοπλισμού, επίσης και οι αντίξοες καιρικές συνθήκες οδηγούν στην ύπαρξη συστημάτων προθέρμανσης και ψύξης των μπαταριών.

Παρακάτω περιγράφεται πιο λεπτομερώς η λειτουργία των βασικών μερών ενός ηλεκτρικού οχήματος:

**Μπαταρία:** Είναι το μέρος όπου η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρο-χημική και με αυτή τη μορφή αποθηκεύεται στις κυψελίδες (Battery cells). Η κάθε κυψελίδα θα πρέπει να φορτίζεται με ομοιόμορφο τρόπο και να ελέγχεται συνεχώς ως προς τη θερμοκρασία του, την υγρασία, τυχόν διαρροές κλπ. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροκίνηση είναι αρκετά ευαίσθητες και χρήζουν ειδικής προσοχής και διαχείρισης, αφού η εσωτερική της αντίσταση από ηλεκτρολογικής μεριάς είναι αρκετά μικρή και τα ρεύματα που εν δυνάμει μπορούν να αναπτυχθούν είναι μεγάλα. Τα είδη των μπαταριών αυτών είναι ποικίλα και αλλάζουν ανάλογα με τις τεχνολογικές εξελίξεις και την τιμή στην αγορά. Ορισμένα από αυτά τα υλικά ονομαστικά είναι: οι μπαταρίες ιόντων Λιθίου, Λιθίου πολυμερών, Νικελίου-Καδμίου, Νικελίου μετάλλου, οξέων Μολύβδου κλπ. Κάποιοι από τους βασικούς παράγοντες για την επιλογή της κατάλληλης μπαταρίας είναι: η πυκνότητα αποθηκευμένης ενέργειας, η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδώσει και ο αριθμός των κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης.

**Αντιστροφέας ή Αναστροφέας (Inverter):** Ο αντιστροφέας αποτελεί την κύρια μονάδα τροφοδότησης του ηλεκτρικού κινητήρα. Ουσιαστικά μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια από την μπαταρία που είναι συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο πολυφασικό με συγκεκριμένη φάση και συχνότητα. Ο αντιστροφέας για να επιτύχει τη σωστή μορφή ρευμάτων, τα οποία με τη σειρά τους παράγουν την επιθυμητή, σύμφωνα με την ECU, ροπή στον κινητήρα, χρησιμοποιεί λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων που προέρχονται από αισθητήρες. Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος που υπάρχουν στο εσωτερικό αυτού, η μελέτη σφαλμάτων των αισθητήρων και η μαθηματική πολυπλοκότητα των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση των τάσεων εξόδου αποτελούν μεγάλη τεχνολογική πρόκληση για περεταίρω εξέλιξη τους. Η πιο κοινή μέθοδος ελέγχου ηλεκτρικών κινητήρων ονομάζεται Space Vector Control(SVC) ή Field Oriented Control(FOC). Γενικότερα οι μέθοδοι ελέγχου των ηλεκτρικών μηχανών στηρίζονται στην ανάλυση των ηλεκτρικών μεγεθών της μηχανής σε δύο άξονες: ορθού και κάθετου. Η απλοποίηση αυτή που καθιστά εφικτό τον έλεγχο των ηλεκτροκινητήρων προτάθηκε πρώτη φορά από τον

Robert H. Park το 1929. Μία ακόμη λειτουργία του αντιστροφέα είναι και η ανόρθωση του τριφασικού ρεύματος που παράγει ο κινητήρας κατά τη πέδη, με σκοπό την φόρτιση των μπαταριών. Η λειτουργία του κινητήρα με αναγεννητική πέδηση, αποκαλείται και λειτουργία τεσσάρων τεταρτημορίων.

**Κινητήρας (Motor):** Ο κινητήρας ή οι κινητήρες είναι το κέντρο της ηλεκτρομηχανικής μετατροπής. Στους κινητήρες καταναλώνεται ηλεκτρική ισχύς από την μπαταρία μέσω του αντιστροφέα και παράγεται μηχανική ισχύς. Η απόδοση των κινητήρων στα ηλεκτρικά οχήματα είναι αρκετά υψηλή ξεπερνώντας ακόμα και το 95%. Ο κινητήρας για να μπορεί να οδηγηθεί σωστά από τον αντιστροφέα διαθέτει και ψηφιακό αισθητήρα για τον έλεγχο θέσης του δρομέα. Στους κινητήρες παράγεται η επιθυμητή ροπή που επιθυμεί ο χρήστης ή επιβάλλει η ECU σε οριακές συνθήκες. Ο έλεγχος της ροπής που απαιτείται από κάθε κινητήρα μέσω της ECU είναι αρκετά σύνθετο πρόβλημα και εμπλέκει την δυναμική του αμαξώματος (Vehicle Dynamics). Τα είδη των ηλεκτρικών κινητήρων είναι πολλά και στη συνέχεια θα γίνει μια γενική ανασκόπηση της περιοχής αυτής, ωστόσο στην ηλεκτροκίνηση το είδος των κινητήρων που έχει εδραιωθεί είναι οι μηχανές επαγωγής και οι σύγχρονες μηχανές μονίμων μαγνητών.

**Σύστημα μετάδοσης:** Το σύστημα μετάδοσης αποτελείται από το κιβώτιο ταχυτήτων και το διαφορικό. Στην ηλεκτροκίνηση το κιβώτιο ταχυτήτων είναι συνήθως σταθερής σχέσης και μάλιστα τέτοια ώστε να επιτρέπει τον ηλεκτροκινητήρα να παράγει λιγότερη ροπή από αυτή που φθάνει στους τροχούς. Στα ηλεκτρικά οχήματα δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη σύμπλεξης και αποσύμπλεξης αφού ο ηλεκτροκινητήρας δεν απαιτεί κάποιο όριο ελάχιστων στροφών λειτουργίας. Το διαφορικό χρησιμοποιείται για να μεταδώσει την κίνηση του κινητήρα στον εσωτερικό και εξωτερικό τροχό. Πολλά, όμως, ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιούν περισσότερους από έναν ηλεκτροκινητήρες και συνεπώς το διαφορικό δεν είναι πάντα απαραίτητο.

## 2.2 ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΕΙΔΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΩΝ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗ

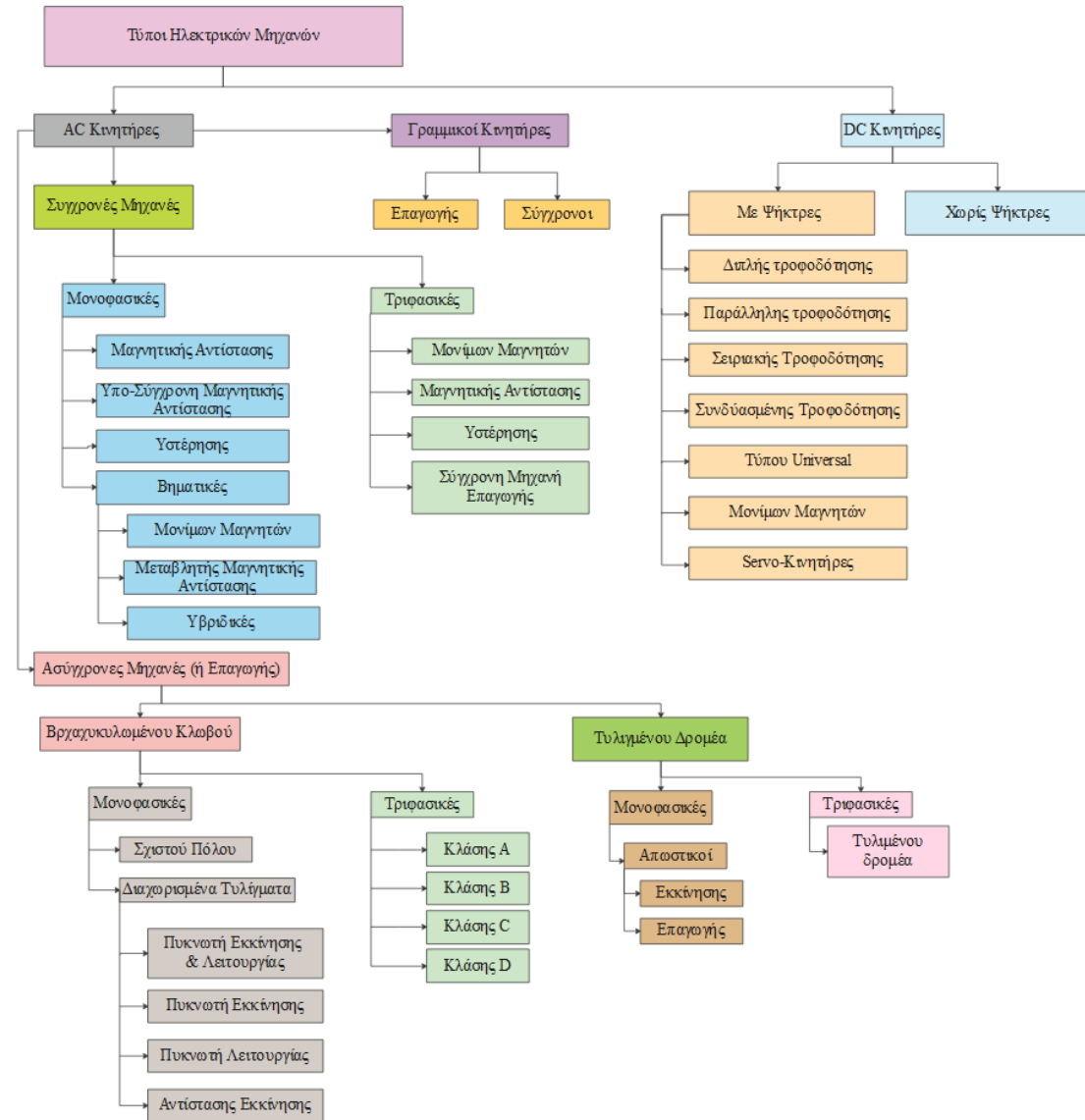
Η εξέλιξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος τα τελευταία χρόνια είναι ραγδαία, και συνεπώς η δυνατότητα που υπάρχει στο να μπορούν να ελεγχθούν ισχυρά ρεύματα και υψηλές τάσεις σε μεγάλες συχνότητες είναι αξιοθαύμαστη. Με βάση τις δυνατότητες αυτές των ηλεκτρονικών ισχύος -πλέον- μπορούν να δημιουργηθούν κατάλληλες πηγές τροφοδότησης με δυνατότητα ελέγχου πραγματικού χρόνου. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ευσταθών συστημάτων οδήγησης κινητήρων υψηλής απόδοσης. Συνεπώς, οι κινητήρες που οδηγούνται από σύγχρονους αντιστροφείς έχουν τη δυνατότητα να σχεδιάζονται σαν ένα συνολικό σύστημα (κινητήρας – αντιστροφέας) ώστε να επιτυγχάνουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Ανάλογα με την εφαρμογή οι προδιαγραφές των κινητήρων ποικίλουν. Συνήθως οι προδιαγραφές που θέτονται σε κινητήρες είναι το σύστημα τροφοδότησης του, η επίδοση, δηλαδή η ροπή που μπορεί να αποδώσει ο κινητήρας στην ταχύτητα που κινείται δεδομένου του συστήματος τροφοδότησης, η απόδοση, το κόστος κατασκευής, η ποιότητα της ροπής δηλαδή το αρμονικό περιεχόμενο της, η τάση και το αρμονικό περιεχόμενο που παράγει ως Back EMF, το εύρος ταχύτητας, ο ηλεκτρομαγνητικός και ο ακουστικός θόρυβος, το βάρος, το μέγεθος κλπ. Οι προδιαγραφές αυτές συνήθως καταδεικνύουν και το είδος του κινητήρα που θα κατασκευαστεί και θα χρησιμοποιηθεί αργότερα.

Αρχικά στην ηλεκτροκίνηση είχε προταθεί η χρήση κινητήρων συνεχούς ρεύματος με σκοπό να εκμεταλλευθούν άμεσα την πηγή ισχύος συνεχούς ρεύματος που είναι οι μπαταρίες. Ταυτόχρονα μπορούσε να πραγματοποιηθεί και εύκολος έλεγχος της

ταχύτητας του οχήματος μέσω μεταβλητών αντιστάσεων και στοιχειωδών ηλεκτρονικών ισχύος. Στην συνέχεια, η εξέλιξη που υπήρξε στα ηλεκτρονικά ισχύος απέκλεισε την ιδέα αυτή καθώς τα προβλήματα σε βλάβες και η χαμηλή απόδοση των κινητήρων αυτών μπορούσε πλέον να αντιμετωπιστεί με την χρήση άλλων ειδών κινητήρων. Σήμερα η επιλογή του κατάλληλου κινητήρα διαφέρει από αυτοκίνητο σε αυτοκίνητο και μάλιστα μπορεί ακόμη στο ίδιο αυτοκίνητο να υπάρχουν διαφορετικά είδη κινητήρων, συνδυάζοντας έτσι τα θετικά στοιχεία διαφόρων τεχνολογιών.

Παρακάτω δίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα των πιο διαδεδομένων ειδών ηλεκτρικών κινητήρων.

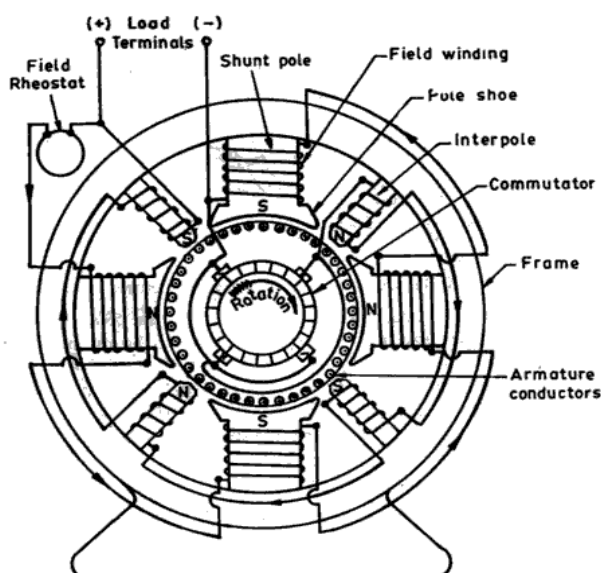


Σχ. 2.2.1 Σχηματική αναπαράσταση των ειδών των ηλεκτρικών κινητήρων ανάλογα με τη σχεδίαση του στάτη – δρομέα και την αρχή λειτουργίας τους. Το σχήμα αποτελεί μετάφραση εικόνας στην ιστοσελίδα “electrical-knowhow.com” (tinyurl.com/y4rhju78)

Στη συνέχεια περιγράφεται πιο αναλυτικά η αρχή λειτουργίας ορισμένων τύπων από τις παραπάνω κατηγορίες:

**Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος:** Οι κινητήρες αυτοί βασίζονται στην λειτουργία τους στην ικανότητα τους να διατηρούν στον χώρο κάθετα τα μαγνητικά πεδία του στάτη και

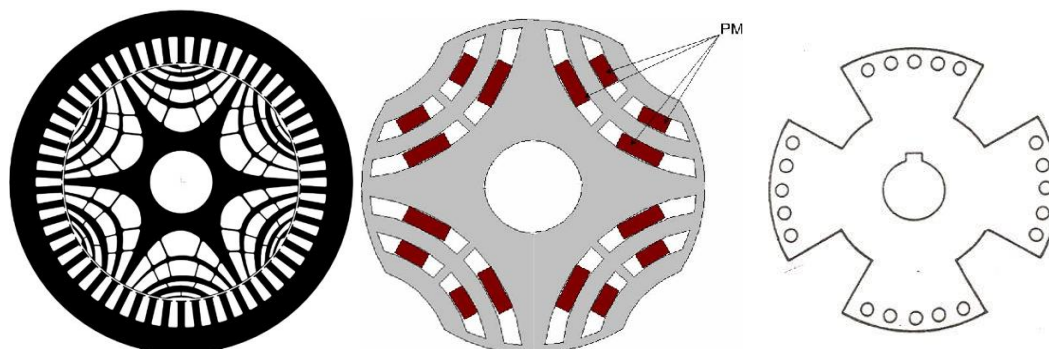
του δρομέα. Για να το επιτύχουν αυτό διαθέτουν ένα τύλιγμα διέγερσης στον στάτη το οποίο είναι σταθερό και στον δρομέα διαθέτουν ειδικό βροχοτύλιγμα ή κυματοτύλιγμα τυμπάνου. Οι άκρες του τυλιγματος συνδέονται σε ειδικής μορφολογίας επαφές που αποκαλούνται ψήκτρες. Οι ψήκτρες φροντίζουν κάθε στιγμή οι τομείς του δρομέα να είναι κατάλληλα ηλεκτρισμένοι ώστε το συνιστάμενο πεδίο να είναι κάθετο σε αυτό της διέγερσης. Το μεταγωγικό φαινόμενο που δημιουργείται στις ψήκτρες, η αντίδραση οπλισμού και οι υπερτάσεις  $L(di/dt)$  αντιμετωπίζονται με τους βοηθητικούς πόλους στάτη οι οποίοι διαρρέονται από ρεύματα τυμπάνου διατηρώντας έτσι τα δύο πεδία κάθετα, ακόμη και σε ισχυρά ρεύματα ενώ ταυτόχρονα εξαλείφουν και τα φαινόμενα  $L(di/dt)$ . Ωστόσο οι πολύ μεγάλες μηχανές διαθέτουν και τυλίγματα αντιστάθμισης στα πέλματα διέγερσης για την εξάλειψη του προβλήματος αντίδρασης οπλισμού ελαχιστοποιώντας τη μετακίνηση της ουδέτερης ζώνης και την εξασθένιση της ροής. Ακόμη σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι οι τρόποι σύνδεσης ανάμεσα στα κυκλώματα διέγερσης και τυμπάνου προσδίδουν διαφορετικά χαρακτηριστικά ροπής στην μηχανή. Αυτοί οι τρόποι σύνδεσης προσδιορίζονται κυρίως από τον κατασκευαστή.



Σχ. 2.2.2 Σχηματική δομή ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος με βοηθητικούς πόλους. Η εικόνα βρέθηκε στην ιστοσελίδα "blog.oureducation.in" ([tinyurl.com/yjytay7d](http://tinyurl.com/yjytay7d))

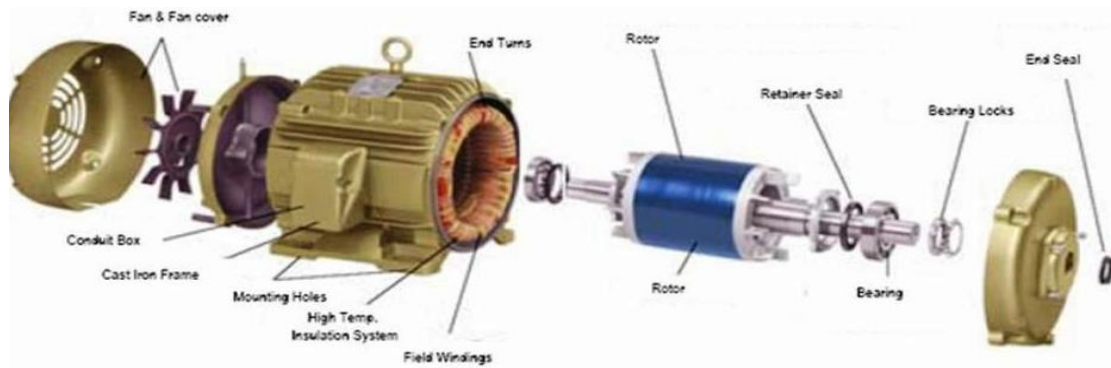
**Μηχανές μαγνητικής αντίστασης (Reluctance Motor):** Οι μηχανές αυτές διαθέτουν διάφορες τεχνολογίες τυλιγμάτων στάτη όμως είτε από την οδήγηση του κινητήρα είτε από την ημιτονικότητα των ρευμάτων το πεδίο του στάτη στις μηχανές αυτές καταλήγει να είναι στρεφόμενο. Ο δρομέας είναι σχεδιασμένος ώστε η ροή του στάτη να διευκολύνεται από κάποιες οδούς ενώ σε κάποιες άλλες όχι. Αυτή η έλλειψη συμμετρίας, όπου συχνά αναφέρεται και ως εκτυπότητα, δίνει την δυνατότητα ανάπτυξης μαγνητικής ροπής στο δρομέα. Η μαγνητική ροπή είναι η ροπή που επάγεται σε ένα σιδερένιο αντικείμενο (όπως μια ακίδα) όταν κάποιο εξωτερικό μαγνητικό πεδίο αναγκάζει το αντικείμενο να ευθυγραμμιστεί με το πεδίο. Μερικές τεχνολογίες τυλιγμάτων στάτη, σε συνδυασμό με τον τρόπο ρευματοδότησης τους, δημιουργούν τις κατηγορίες των μηχανών DC switched reluctance, Synchronous Reluctance ενώ η ύπαρξη κλωβού στον δρομέα μας δίνει την κατηγορία των Inductance Reluctance. Πολλές φορές στον δρομέα για υποβοήθηση πεδίου χρησιμοποιούνται και μόνιμοι μαγνήτες συνθέτοντας την κατηγορία Permanent Magnet assisted Synchronous Reluctance. Από όλες τις παραπάνω κατηγορίες, η

μόνη κατηγορία που μπορεί να εκκινήσει (μόνη της) , συνδεδεμένη στο δίκτυο και χωρίς την ύπαρξη ηλεκτρονικών ισχύος, είναι η κατηγορία των κινητήρων μαγνητικής αντίστασης επαγωγής. Στην ηλεκτροκίνηση αυτού του είδους οι κινητήρες διαθέτουν σύνθετο έλεγχο του αντιστροφέα.



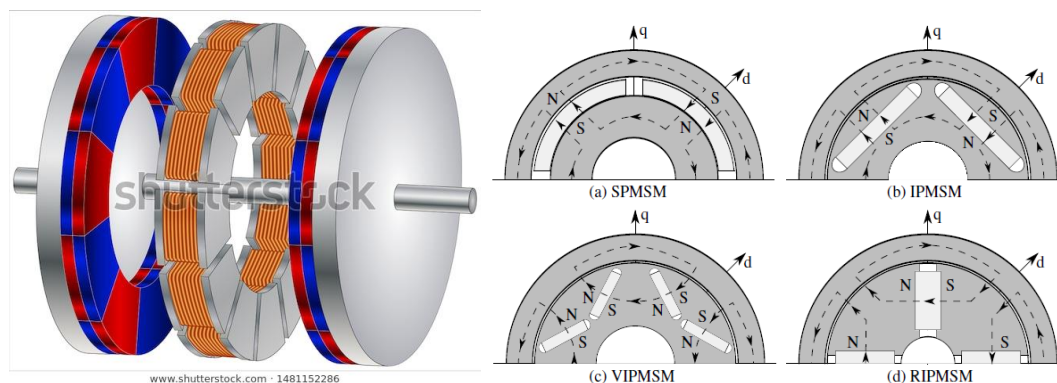
Σχ 2.2.3 Απεικόνιση της γεωμετρίας δρομέα-στάτη σε μια σύγχρονη μηχανή μαγνητικής αντίστασης στα αριστερά, στο κέντρο παρουσιάζεται μία εικόνα δρομέα μηχανής μαγνητικής αντίστασης υποβοηθούμενη από μόνιμους μαγνήτες και δεξιά μια εικόνα με τον δρομέα μιας μηχανής επαγωγής μαγνητικής αντίστασης. Οι εικόνες βρέθηκαν στις ιστοσελίδες: "electricmotorengineering.com" ([tinyurl.com/y6dt2huf](http://tinyurl.com/y6dt2huf)), "semanticscholar.org" ([tinyurl.com/yxsfqnbv](http://tinyurl.com/yxsfqnbv)) και "circuitglobe.com" ([tinyurl.com/y3nt87wa](http://tinyurl.com/y3nt87wa)).

**Ασύγχρονοι κινητήρες ή κινητήρες επαγωγής:** Οι κινητήρες αυτοί βασίζουν τη λειτουργία τους στο φαινόμενο της επαγωγής. Αρχικά το τύλιγμα του στάτη είναι τέτοιο ώστε να μπορεί καθώς διαρρέεται από ημιτονικά ρεύματα να διαμορφώνει ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο ίδιας ή υποπολλαπλάσιας συχνότητας αναλόγως τους πόλους και το είδος τυλίγματος που διαθέτει ο κινητήρας. Στην συνέχεια εξαιτίας της αντιρροπής του φορτίου ή της αρχικής αδράνειας του δρομέα η ταχύτητά του δεν είναι ίδια με αυτή του πεδίου του στάτη και συνεπώς αρχίζουν να αναπτύσσονται ρεύματα, εξ αιτίας του φαινομένου της επαγωγής στο βραχυκυκλωμένο κλωβό ή στα τυλίγματα του δρομέα. Τα ρεύματα αυτά σχηματίζουν το δικό τους πεδίο και συνεπώς μπορεί μέσω της αλληλεπίδρασης του με το προϋπάρχον πεδίο του δρομέα αναπτύσσει ροπή. Το είδος της διαμόρφωσης του δρομέα επηρεάζει άμεσα την απόδοση του κινητήρα, την ονομαστική ολίσθηση και τα ρεύματα εκκίνησης. Στην περίπτωση του τυλιγμένου δρομέα αναγκαία είναι η ύπαρξη δακτυλιοφόρων. Ωστόσο αυτοί οι κινητήρες παρουσιάζουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά εκκίνησης και απόδοσης στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας με τίμημα την ακριβή κατασκευή του τυλίγματος δρομέα. Ο συντελεστής ισχύος μίας μηχανής επαγωγής είναι συνήθως από 75-87% και συνεπώς καταναλώνει άεργο ισχύ. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται είτε με την προσθήκη πυκνωτών αντιστάθμισης είτε με την χρήση μίας σύγχρονης μηχανής σε κάποια άλλη εφαρμογή στην ίδια θέση του δικτύου.



Σχ. 2.2.4 Τομή επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού. Στο σχήμα διακρίνονται και τα επιμέρους μέρη μια τέτοιας μηχανής. Η εικόνα βρέθηκε στην ιστοσελίδα “electrical-knowhow.com” (tinyurl.com/gm7dbwz)

**Σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών:** Οι κινητήρες αυτού του τύπου εξ αιτίας της ύπαρξης του μαγνήτη, διαθέτουν το ένα εκ τω δύο πεδίων που αλληλοεπιδρούν για την παραγωγή ροπής ανέξοδο και χωρίς την ύπαρξη κάποιας δαπάνης ρεύματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής απόδοσης σε σύγκριση με τα άλλα είδη των κινητήρων. Ωστόσο, στην περίπτωση όπου η πρόωση του κινητήριου συστήματος προέρχεται από άλλη πηγή ροπής, τότε ο κινητήρας μονίμων μαγνητών δημιουργεί απώλειες επειδή δεν μπορεί να μετριάσει το σταθερό πεδίο των μαγνητών. Τα είδη των τυλιγμάτων του στάτη που χρησιμοποιούνται στις μηχανές αυτές είναι πολλά και διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα συγκεντρωμένα και τα καταναμημένα. Η κάθε μία από τις κατηγορίες αυτές, παρουσιάζει διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ως προς το μέγεθος των αγωγών εκτός του ενεργού μήκους της μηχανής, της ημιτονικότητας του πεδίου, την ταλάντωση ροπής κλπ. Ακόμη, οι μηχανές αυτές χωρίζονται και σε κατηγορίες ανάλογα με την διαμόρφωση και την τοποθέτηση των μαγνητών. Πολλοί κινητήρες αυτού του είδους, λειτουργούν με αξονική ροή, ακτινική ροή, εξωτερικό ή εσωτερικό δρομέα. Ο στόχος πολλών μηχανών μονίμων μαγνητών είναι η αύξηση της πυκνότητας ισχύος και της απόδοσης. Ο έλεγχος αυτού του είδους των μηχανών, είναι -πλέον- σχετικά απλός μπορεί όμως να εγκυμονεί κίνδυνους όσον αφορά την αποφυγή και πρόβλεψη σφαλμάτων κατά τη λειτουργία τους. Τα κύρια μειονεκτήματα είναι το μεγάλο κόστος, η πιθανότητα αποκόλλησης σε ορισμένες γεωμετρίες των μαγνητών, ο κίνδυνος απομαγνήτισης και το μεγάλο κόστος των μαγνητών ως υλικά κατασκευής.



Σχ2.2.5 Διαφορετικές τεχνολογίες μηχανών μονίμων μαγνητών. Οι ιστοσελίδες που περιείχαν τις παραπάνω εικόνες είναι: “shutterstock.com”( tinyurl.com/yylwvkk8) και “ial.uni-hannover.de” (tinyurl.com/y3yqku2).

### 2.2.1 Η ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΥ ΕΙΔΟΥΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Η επιλογή του κατάλληλου είδους κινητήρα στην ηλεκτροκίνηση αποτελεί μια σύνθετη και πολλές φορές χρονοβόρα διαδικασία. Αρχικά, κάθε είδος κρίνεται ως προς την



καταλληλότητά του από κάποια γενικά χαρακτηριστικά όπως η αξιοπιστία της κατασκευής του, η απόδοσή του, η πυκνότητα ισχύος, η δυσκολία ελέγχου οδήγησης, το κόστος, η ποιότητα των επιδόσεών του κλπ. Αυτά τα γενικά χαρακτηριστικά διαμορφώνονται, βέβαια, και από την κατασκευή και σχεδίαση της κάθε μηχανής ξεχωριστά. Στον παρακάτω πίνακα η αξιολόγηση των ειδών μηχανών γίνεται, με μία πιο γενική, και αποστασιοποιημένη από τη γεωμετρία, θέση.

Τύπος Μηχανής		Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
PM Machines	Radial PMSM	Υψηλή επίδοση, καλή απόδοση, κατάλληλη για υψηλές ταχύτητες	Υψηλό κατασκευαστικό κόστος, Ευαίσθητες στη θερμοκρασία, μόνιμη ύπαρξη απωλειών πυρήνα εξαιτίας της ύπαρξης των μαγνητών
	BLDC		
	Axial PMSM		
Induction Machines (IM)		Υψηλή αξιοπιστία, χαμηλό κατασκευαστικό κόστος, Υψηλή ευρωστία	Περιορισμένη μέγιστη ταχύτητα εξαιτίας των μεγάλων απωλειών που δημιουργούνται στον δρομέα
Reluctance Machines	SyRM	Υψηλή ταχύτητα, χαμηλές απώλειες δρομέα, εύκολη κατασκευή	Χαμηλός συντελεστής ισχύος, χαμηλή πυκνότητα ισχύος
	SRM	Υψηλή αντοχή δομέα, Υψηλή ταχύτητα επιφάνειας, Απλό τύλιγμα	Ακουστικός θόρυβος, πίο υψηλές απώλειες

Σχ. 2.2.1.1 Σχήμα ανάδειξης συγκριτικών πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων που διακατέχουν τα διάφορα είδη ηλεκτρικών κινητήρων. Ο πίνακας αυτός, στηρίζεται στη μελέτη της δημοσίευσης [1].

Ωστόσο, και η επιστημονική ωρίμανση που διαθέτει το κάθε είδος το τοποθετεί σε ανταγωνιστική θέση, για την εφαρμογή του στην ηλεκτροκίνηση. Η σχεδίαση διαφορετικών ειδών μηχανών και η προσομοίωση τους για την ίδια εφαρμογή, συνυπολογίζοντας τον κύκλο φόρτισης που θα τεθούν να αντιμετωπίσουν, οδηγεί σε πλήρη γνώση και ποσοτικοποίηση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων που προσδίδει το κάθε είδος.

Παρατηρούμε λοιπόν, και με βάση τον παραπάνω πίνακα (Σχ 2.2.6) πως οι μηχανές μονίμων μαγνητών διαθέτουν σοβαρά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων μηχανών με τίμημα το κόστος την ευαισθησία στην απομαγνήτιση και τις μόνιμες απώλειες πυρήνα. Ένα βασικό ερώτημα είναι λοιπόν, πώς θα μπορέσει η ευαισθησία στην απομαγνήτιση να αντιμετωπιστεί χωρίς να αυξηθεί η ποσότητα των μαγνητών αυξάνοντας με τη σειρά της το συνολικό κατασκευαστικό κόστος της μηχανής.

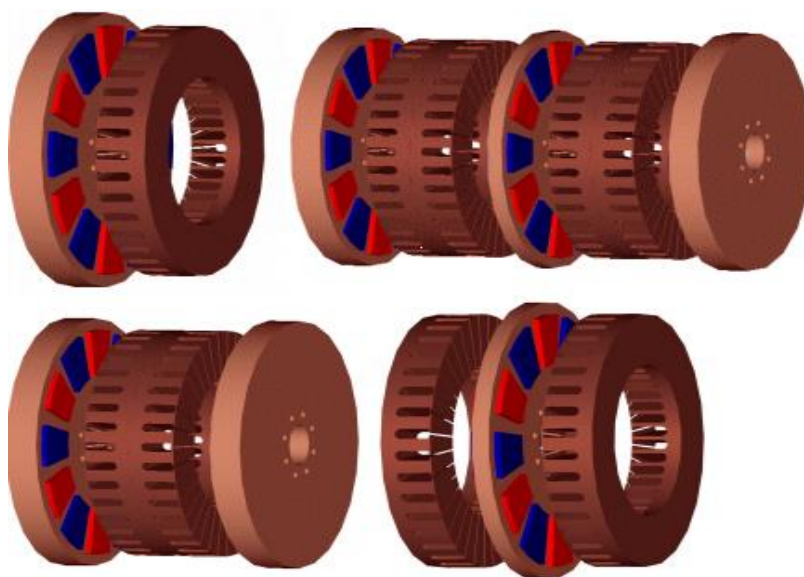
Σε αυτή τη περίπτωση η επιλογή του είδους της μηχανής μονίμων μαγνητών προσδίδει και αυτή κάποιο είδος διαφοροποίησης των χαρακτηριστικών που η μηχανή τελικώς θα διαθέτει.

#### 2.2.1.1 ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΕΙΔΗ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ (PMSM)

Οι τύποι σύγχρονων μηχανών μονίμων μαγνητών είναι πολλοί. Η κατηγοριοποίηση αυτών, γίνεται με βάση την κατεύθυνση της ροής σε αξονικές και ακτινικές και με βάση την θέση που έχουν οι μόνιμοι μαγνήτες.



Οι μηχανές αξονικής ροής εμπεριέχουν ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι των μηχανών ακτινικής ροής ειδικά όταν ο αριθμός των πόλων είναι μεγάλος και το μήκος της μηχανής δεν μπορεί να αυξηθεί εύκολα. Μια πιο λεπτομερή σύγκριση των ακτινικών και αξονικών μηχανών γίνεται στη δημοσίευση [2] η οποία παρατίθεται και στην βιβλιογραφία. Ο σκοπός της μελέτης αυτής έγινε για να τεκμηριωθούν τα πεδία εφαρμογών του κάθε είδους. Για την σύγκριση αυτή χρησιμοποιήθηκαν υποθέσεις, οι οποίες στερούν την δυνατότητα γενίκευσης και επιτρέπουν την περαιτέρω μελέτη του θέματος σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές. Αυτού του είδους οι μηχανές μονίμων μαγνητών, διαθέτουν πολλές διαφορετικές υποκατηγορίες με βάση την θέση του δρομέα και του στάτη. Τα πιο διαδεδομένα είδη μηχανών μονίμων μαγνητών αξονικής ροής (*AF PMSM*) είναι: μονός δρομέας μόνος στάτης, μονός δρομέας με διπλό στάτη, διπλός δρομέας με μονό στάτη, μηχανές πολλών δίσκων.

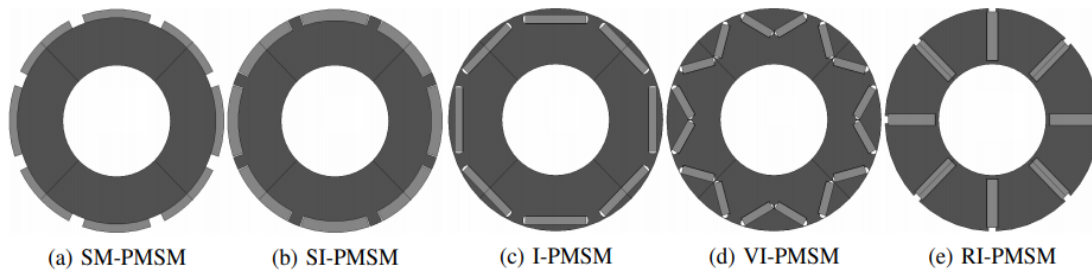


Σχ.2.2.1.1.1. Η εικόνα απεικονίζει διάφορα είδη μηχανών μονίμων μαγνητών αξονικής ροής. Η εικόνα βρέθηκε στην εργασία του κ. A. Parviainen ([tinyurl.com/y3shavsr](http://tinyurl.com/y3shavsr))

Οι μηχανές ακτινικής ροής αποτελούν το πιο διαδεδομένο είδος μηχανών μονίμων μαγνητών. Τα επιμέρους είδη αυτής της κατηγορίας είναι οι μηχανές εξωτερικών και οι μηχανές εσωτερικών μαγνητών. Το κάθε είδος από τις μηχανές ακτινικής ροής διαθέτει διαφορετική συμπεριφορά όσον αφορά τη λειτουργία της μηχανής σε ορισμένο φάσμα ταχυτήτων και την ικανότητα να της, να αναπτύσσει ροπή. Ακόμα διαφορές υπάρχουν στην ενίσχυσή ή εξάλειψη της συνιστώσας μαγνητικής ροπής (Reluctance Torque) και στην ικανότητα να διατηρούν την μαγνήτισή τους σε δύσκολες συνθήκες. Πολλές φορές ακόμα υπάρχουν και συνδυασμοί των ειδών μηχανών ακτινικής ροής με σκοπό την χρήση πλεονεκτημάτων που προσφέρει η εκάστοτε γεωμετρία.

Μία ειδική κατηγορία είναι οι μηχανές που διαθέτουν και διαφορετικά είδη μαγνήτη σε κάθε θέση. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν και οι μηχανές μεταβλητής ροής VF PMSM οι οποίες αυξάνουν σημαντικά το εύρος της απόδοσης στους χαρτες ροπής ταχύτητας. Όσον αφορά τις μηχανές μεταβλητής ροής σημαντικές πληροφορίες εμπεριέχονται στη δημοσίευση [3].

Πιο κάτω δίνονται μερικές από τις πιο διαδεδομένες κατηγορίες δρομέα σε μηχανές ακτινικής ροής.



Σχ. 2.2.1.1.2 Η εικόνα απεικονίζει διάφορα είδη μηχανών μόνιμων μαγνητών ακτινικής ροής. α)Επιφανειακοί, β)Ένθετοι επιφανειακοί, γ)Ένθετοι (εσωτερικοί), δ)Τύπου V, ε)Ακτινικοί. Η εικόνα βρέθηκε στην δημοσίευση [4].

### 2.2.1.2ΕΙΔΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΔΡΟΜΕΑ ΣΕ ΜΗΧΑΝΕΣ ΑΚΤΙΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

**Επιφανειακοί μαγνήτες:** Αυτού του είδους οι μηχανές, είναι οι πιο γεωμετρικά απλές με υψηλό βαθμό απόδοσης, και για τον λόγω αυτό αποτελούν τη βάση της μελέτης των μηχανών μόνιμων μαγνητών στην ηλεκτροκίνηση. Οι μηχανές αυτές διαθέτουν ομοιόμορφη μαγνητική αντίσταση στο διάκενο επειδή η μαγνητική διαπερατότητα των μαγνητών είναι όμοια μ' αυτή του αέρα και συνεπώς η συνιστώσα της μαγνητικής ροπής (Reluctance) είναι σχεδόν μηδενική. Η γεωμετρική απλότητα τους, έχει ως αποτέλεσμα μειωμένο κατασκευαστικό κόστος. Η χρήση της γεωμετρίας αυτής επιφέρει και μείωση της ροής σκέδασης αφού για τη σύζευξη της ροής με τον στάτη υπάρχει μόνο το διάκενο, αυξάνοντας έτσι την επίδοση της μηχανής σε σχέση με το μαγνητικό υλικό που χρησιμοποιείται. Το γεγονός αυτό πολλές φορές έχει αρνητικό αποτέλεσμα γιατί εμποδίζει την ανάπτυξη ροής σκέδασης όταν αυτό είναι επιθυμητό στην λειτουργία εξασθένησης του πεδίου. Οι κυριότεροι κίνδυνοι που υπάρχουν σε αυτή την κατηγορία μηχανών, είναι η ευαισθησία σε απομαγνήτιση και η αποκόλληση των μαγνητών σε υψηλή ταχύτητα. Για το λόγω αυτό, σχεδιάζονται και μηχανές εξωτερικού δρομέα στους οποίους εξαλείφεται το πρόβλημα της αντοχής στήριξης των μαγνητών. Σ' αυτή την περίπτωση όμως αναπτύσσονται προβλήματα ψύξης, επειδή η κύρια πηγή απωλειών – το τύλιγμα – βρίσκεται συγκεντρωμένο σε μικρότερο όγκο. Η αύξηση αυτής της θερμοκρασίας, κάνει την μηχανή πιο ευάλωτη σε φαινόμενα απομαγνήτισης. Επιπλέον σε αυτού του είδους μηχανών αμφίβολο είναι και το σχήμα που μπορούν να έχουν οι μαγνήτες στην επιφάνεια του δρομέα. Σε αυτό το ερώτημα απαντά, θέτοντας ορισμένα κριτήρια προς βελτιστοποίηση, μία δημοσίευση του κ. Κ. Λάσκαρη σε συνεργασία με τον κ. Α. Κλαδά [5,6].

**Ένθετοί επιφανειακοί μαγνήτες:** Σε αυτή την περίπτωση η γεωμετρία είναι αρκετά όμοια με την περίπτωση των επιφανειακών μαγνητών. Η διαφορά έγκειται στο υλικό σιδήρου που υπάρχει ανάμεσα στους μαγνήτες. Αυτό δημιουργεί μια ανομοιομορφία στην μαγνητική αντίσταση του διακένου και συνεπώς η μηχανή αποκτά συνιστώσα μαγνητικής ροπής (Reluctance). Το μεγάλο προτέρημα είναι η βελτίωση της μηχανικής αντοχής σε θέματα αποκόλλησης με τίμημα την ευαισθησία στην μερική απομαγνήτιση. Μικρά είναι ωστόσο και τα οφέλη που παρουσιάζει η ικανότητα της μηχανής στην λειτουργία εξασθένησης του πεδίου, σε σύγκριση με την μηχανή επιφανειακών μαγνητών

**Εσωτερικοί μαγνήτες:** Οι μηχανές αυτές περιέχουν τους μόνιμους μαγνήτες εσωτερικά του δρομέα. Η διάταξη με την οποία τοποθετούνται στο εσωτερικό του δρομέα, οι μαγνήτες, προσδίδει ορισμένες διαφοροποιήσεις όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της μηχανής. Ανεξαρτήτως διάταξης, οι μηχανές αυτές είναι αρκετά πιο σύνθετο να κατασκευαστούν σε σχέση με τις παραπάνω κατηγορίες λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας της γεωμετρίας. Οι πιο συνηθισμένες τοπολογίες είναι η "I type" (ένθετοι εσωτερικοί μαγνήτες), η "V-type"(εσωτερικοί τύπου V), η "Spoke" (εσωτερικοί

ακτινικοί), η “Multilayer-buried” (εσωτερικοί πολυστρωματικοί). Στις παραπάνω κατηγορίες υπάρχει από λίγο έως πολύ ανομοιομορφία στην μαγνητική αντίσταση και συνεπώς υπάρχει συνιστώσα μαγνητικής ροπής (Reluctance torque). Η ύπαρξη αυτής της συνιστώσας συνεπάγεται πως η γωνία μέγιστης ροπής είναι μεγαλύτερη από 90 ηλεκτρικές μοίρες. Ακόμη η συνιστώσα μαγνητικής αντίστασης δίνει την δυνατότητα λειτουργίας σε υψηλές ταχύτητες χωρίς την ανάγκη μεγάλης μείωσης του ορθού πεδίου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία για τη μελέτη της απομαγνήτισης των μαγνητών έγινε χρήση μιας μηχανής σύνθετης τοπολογίας η οποία συνδυάζει ένθετους εσωτερικούς μαγνήτες «Insert», μαγνήτες τύπου «V» και ακτινικούς μαγνήτες «Spoke». Επιπλέον, το είδος και το μέγεθος των φραγμάτων ροής, «Flux Barriers» επιλέγονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να διαμορφώνουν και αυτά την αντοχή στην απομαγνήτιση. Οι λόγοι που επιλέχθηκε η γεωμετρία αυτή, βρίσκονται στο γεγονός ότι προσδίδουν μια πιο γενική εικόνα της αλληλεπίδρασης που έχει το μέγεθος των μαγνητών σε κάθε θέση καθώς και η επίδραση που έχει η γεωμετρία του δρομέα σ' αυτό.

### **2.2.2 ΕΙΔΗ ΤΥΛΙΓΜΑΤΩΝ ΣΤΑΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΑΚΤΙΝΙΚΗΣ ΡΟΗΣ (RF-PMSM)**

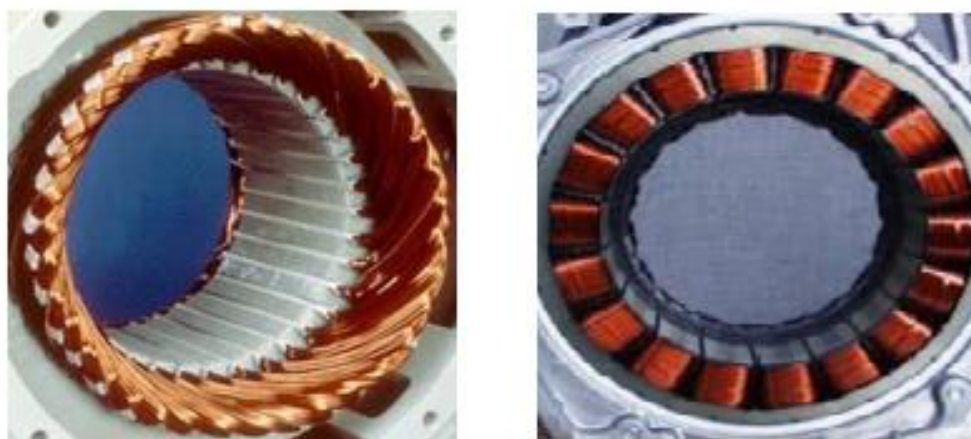
Οι μηχανές μονίμων μαγνητών ακτινικής ροής εκμεταλλεύονται την ύπαρξη του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό της μηχανής. Το τυλίγμα του στάτη φροντίζει κάθε φορά να δημιουργεί μια ημιτονική κατανομή μαγνητικής επαγωγής στο διάκενο. Η παραγωγή ροπής στον δρομέα οφείλεται στην αλληλεπίδραση του πεδίου του στάτη με το πεδίο του δρομέα. Η ανάλυση των επιμέρους αρμονικών των δύο πεδίων αυτών και η συσχέτιση της εκάστοτε αρμονικής του πεδίου του δρομέα με αυτές του στάτη, δημιουργούν την κύρια και τις επιμέρους αρμονικές ροπής. Η συσχέτιση αρμονικών στάτη δρομέα γίνεται χρησιμοποιώντας την χωρική τους ανάλυση συνυπολογίζοντας την σχετική χρονική ταχύτητα που έχουν. Ένας από τους κύριους στόχους, λοιπόν των δύο αυτών σχεδιασμών είναι η μείωση των αρμονικών των δύο πεδίων.

Η ανάπτυξη ροπής ωστόσο δεν είναι απαραίτητο να γίνεται με βάση τη θεμελιώδη αρμονική του στάτη. Σ' αυτή την περίπτωση, αρκετές φορές, είναι διακριτή στην ανάλυση πεδίου η θεμελιώδης αρμονική του στάτη που «διασχίζει» τον δρομέα. Συνήθως αυτό γίνεται στην κατηγορία των συγκεντρωμένων τυλιγμάτων. Μια ακόμη κατηγορία τυλίγματος είναι και αυτή των κατανεμημένων τυλιγμάτων, η οποία έχει ως στόχο την βελτίωση της κύριας αρμονικής του πεδίου (μειώνοντας τις δευτερεύουσες αρμονικές), η οποία και παράγει την κύρια ροή της μηχανής. Οι δύο αυτές κατηγορίες είναι ανταγωνιστικές μεταξύ τους όσον αφορά το κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος. Πιο αναλυτικά περιγράφονται πιο κάτω.

Επικαλυπτόμενα, διανεμημένα: Αυτού του είδους τα τυλίγματα παράγουν μία πιο ημιτονική κατανομή της ΜΕΔ στο διάκενο. Για το λόγο αυτό είναι και τα πιο ευρέως διαδεδομένα τυλίγματα σε μηχανές μονίμων μαγνητών. Η έλλειψη αρμονικών βοηθά στη μείωση της ταλάντωσης ροπής και στις περαιτέρω απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων. Τα κύρια μειονεκτήματά τους είναι το μήκος των αγωγών στα άκρα του τυλίγματος το οποίο αυξάνει τις απώλειες χαλκού, η αύξηση του συνολικού βάρους και η μη ύπαρξη δυναμικής συμπεριφοράς σε σφάλματα. Σε αυτού του είδους τυλίγματος, υπάρχει η δυνατότητα να μεταβάλλεται ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο και φάση, καθώς και ο αριθμός των αυλάκων που επικαλύπτει η μία φάση την άλλη.

Επιμέρους κατηγοριοποίηση γίνεται και ως προς τον τρόπο σύνδεσης των άκρων τυλίγματος (μεταξύ συστάδων) σε κυματοειδή και βροχοειδή.

Μη επικαλυπτόμενα συγκεντρωμένα: Αυτή η κατηγορία έχει εξελιχθεί τα τελευταία χρόνια με στόχο την αύξηση της πυκνότητας ισχύος και την περαιτέρω μείωση των απωλειών χαλκού. Ωστόσο το κύριο μειονέκτημα είναι το ευρύ φάσμα αρμονικών που εμπεριέχονται στην ροπή. Σε υψηλές ταχύτητες εξαιτίας των αρμονικών του πεδίου αναπτύσσονται πρόσθετες απώλειες δινορρευμάτων στον δρομέα και στους μόνιμους μαγνήτες. Η σχεδίαση του κάθε είδους συγκεντρωμένου τυλίγματος είναι σύνθετη, επειδή ανάλογα με τους πόλους που διαθέτει η μηχανή, επιτρέπονται συγκεκριμένοι συνδυασμοί αριθμού αυλάκων. Οι συνδυασμοί αριθμών αυλάκων και πόλων δημιουργούν συγκεκριμένο συντελεστή τυλίγματος, ο οποίος είναι καθοριστικός στην σχεδίαση των μηχανών. Ουσιαστική μελέτη που αφορά τους συνδυασμούς αυτούς και την συμπεριφορά των αρμονικών σε αυτού του είδους τυλίγματος έχει γίνει στην διδακτορική διατριβή του κ. Μ. Μπενιακάρ με τίτλο: «Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κινητήρων με θεώρηση των απωλειών των μόνιμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης» το 2014 [7].



Σχ.2.2.2.1 Στάτης μηχανής με κατανεμημένα (αριστερά) και συγκεντρωμένα (δεξιά) τυλίγματα. Οι εικόνες βρέθηκαν στον ιστό "electrical4u.net" (tinyurl.com/y3jx7eqb)

Η επιλογή του τυλίγματος για την παρούσα διπλωματική εργασία, έγινε με βάση την ημιτονικότητα του πεδίου. Ο λόγος που η ημιτονικότητα κρίθηκε σημαντική είναι η κατανομή του πεδίου που δημιουργείται στο εσωτερικό της μηχανής σε ακραίες φορτίσεις (συνθήκες βραχυκυκλωμάτων). Με βάση την ΜΕΔ που το τύλιγμα αυτό δημιουργεί, μπορούμε να προσδιορίσουμε και την επίδραση που έχει στην μερική απομαγνήτιση η γωνία του ρεύματος που αρχικά δημιούργησε το πεδίο. Ωστόσο, η γεωμετρία και η βελτιστοποίηση των παραμέτρων του τυλίγματος, ξεπερνά το ερευνητικό περιεχόμενο της εργασίας και συνεπώς θεωρούνται ως αμετάβλητα.

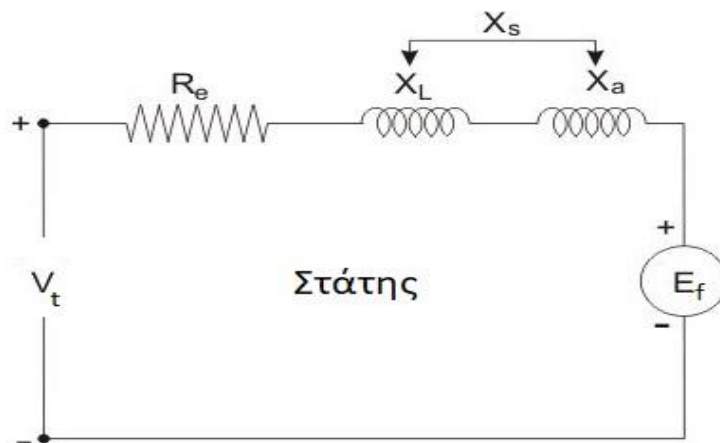
### **2.3 ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ**

Η αρχή λειτουργίας των σύγχρονων μηχανών έχει αναλυθεί πολλά χρόνια πριν, όταν αυτού του είδους οι μηχανές χρησιμοποιήθηκαν αρχικά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάλυση αρχικά, έγινε, με βάση την μεταβολή της ροής που εμφανίζεται στο τριφασικό τύλιγμα από την περιστροφή της διέγερσης στον δρομέα. Η μέθοδος αυτή έχει το μειονέκτημα πως στην ανάλυση του τριφασικού τυλίγματος υπάρχουν πολλές εξισώσεις και μεταβλητές και συνεπώς η μαθηματικοποίηση των φαινομένων έγινε πολύπλοκη. Σήμερα, η ανάλυση των μηχανών αυτών, γίνεται με τη βοήθεια του

μετασχηματισμού Park ο οποίος μειώνει σε συμμετρικές λειτουργίες, τις μεταβλητές από τρεις του τυλίγματος, σε δύο ορθού και καθέτου άξονα, εμπνευσμένος από τη λειτουργία των μηχανών συνεχούς ρεύματος. Επιπλέον, στις μηχανές μονίμων μαγνητών η μαθηματική ανάλυση γίνεται πιο εύκολα εφόσον δεν υπάρχει το τύλιγμα διέγερσης ή κάποιο τύλιγμα απόσβεσης στον δρομέα.

### 2.3.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ

Η οποιαδήποτε προσπάθεια για μαθηματική μοντελοποίηση μηχανών, συνοδεύεται από παραδοχές που γίνονται, με σκοπό να μπορέσουμε με ικανοποιητική ακρίβεια να εξάγουμε ορισμένα συμπεράσματα. Η πρώτη και πιο απλή μέθοδος είναι η ανάλυση μόνιμης κατάστασης της μηχανής. Έτσι σχηματίζεται το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα της ηλεκτρεγερτικής δύναμης που επάγει ο δρομέας στον στάτη συνδεδεμένος σε σειρά από μία αντίδραση και ένα πηνίο που περιγράφουν την επαγωγική αντίδραση και τις ωμικές απώλειες της μηχανής. Παρακάτω δίνεται και η σχηματική απεικόνιση του κυκλώματος.



Σχ. 2.3.1.1 Απεικόνιση ισοδύναμου κυκλώματος στάτη σύγχρονης μηχανής.

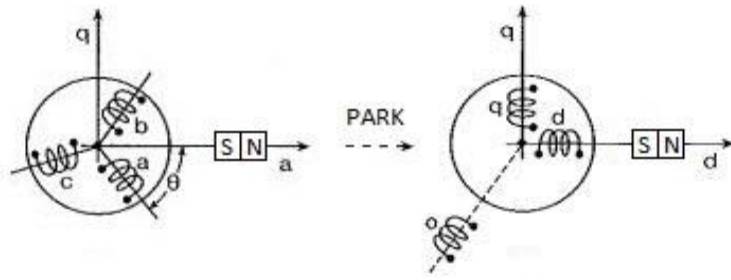
Στο σχήμα 2.3.1 διακρίνουμε δύο αντιδράσεις την αντίδραση σκέδασης  $X_a$  και την αντίδραση μαγνήτισης  $X_L$  που συνθέτουν την ολική αντίδραση του στάτη  $X_s$ , ακόμα δίνεται και η φορά της Back EMF που απεικονίζεται με το σύμβολο  $E_f$ .

Για την περεταίρω ανάλυση των μηχανών αυτών θα πρέπει πρώτα να γίνει αναφορά στον μετασχηματισμό Park. Οι μαθηματικοί τύποι δίνονται παρακάτω:

$$\begin{pmatrix} f_d \\ f_q \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Το  $f$  είναι ένα οποιοδήποτε μέγεθος (ροές, τάσεις, ρεύματα κλπ.) και η γωνία  $\theta$  (σε ηλεκτρικές μοίρες) είναι η γωνία που σχηματίζει ο άξονας  $d$  με τον άξονα της φάσης  $A$ .

Ο μετασχηματισμός Park δεν είναι τίποτα άλλο από ένα μαθηματικό εργαλείο στροφής και προβολής του τριφασικού συστήματος  $abc$  σε ένα πλαίσιο (επίπεδο) δύο αξόνων που στρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα του πεδίου. Μεγάλη και καθοριστική είναι η χρησιμότητα του στον έλεγχο των σύγχρονων και ασύγχρονων τριφασικών μηχανών. Η γενίκευση του μετασχηματισμού υπάρχει στο άρθρο [8].



Σχ.2.3.1.2 Μετασχηματισμός Park στα τυλίγματα μιας Σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών. Στο σχήμα ο άξονας a είναι ο άξονας της 'διέγερσης', μετά τον Μετασχηματισμό Park μετατρέπεται σε άξονα d.

Από το παραπάνω σχήμα προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$u_d = R i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_r \lambda_q \quad (2.2)$$

$$u_q = R i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_r \lambda_d \quad (2.3)$$

Όπου:

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{Mag} \quad (2.4)$$

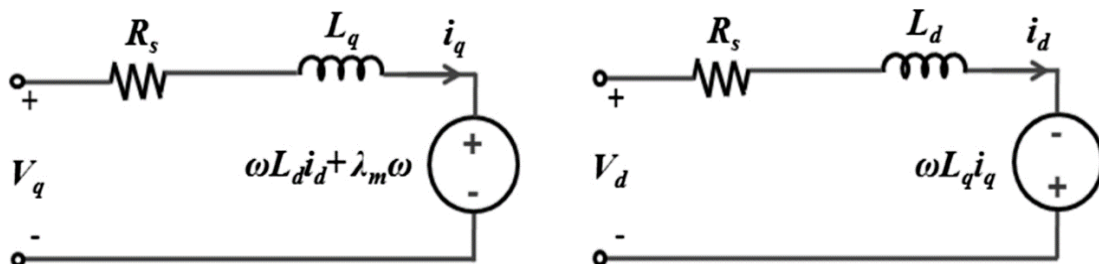
$$\lambda_q = L_q i_q \quad (2.5)$$

Υποθέτοντας ότι η ροή του μαγνήτη στον άξονα d δεν μεταβάλλεται με τον χρόνο προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις των κυκλωμάτων της μηχανής.

$$u_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r \cdot L_q i_q \quad (2.6)$$

$$u_q = R i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + \omega_r \cdot (\lambda_{Mag} + L_d i_d) \quad (2.7)$$

Στην συνέχεια δίνονται σχηματικά τα δύο αυτά κυκλώματα:

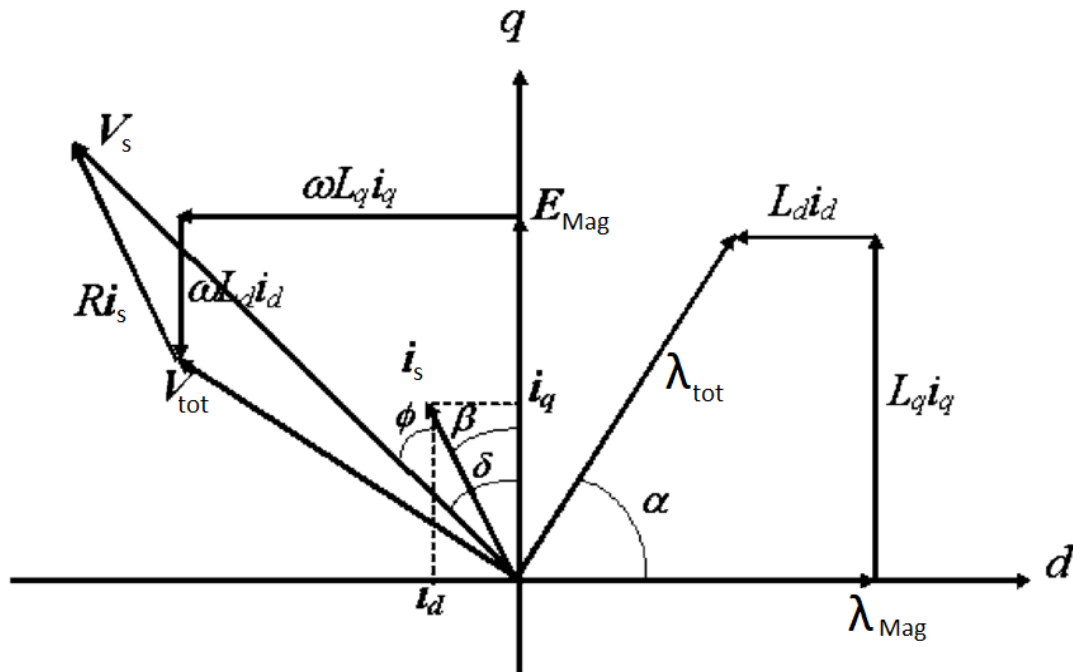


Σχ. 2.3.1.3 Απεικόνιση των ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων της σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών με θεώρηση μικρών απωλειών πυρήνα.

Τέλος, με τη βοήθεια αυτών των κυκλωμάτων μπορεί να σχεδιαστεί και το λειτουργικό διανυσματικό διάγραμμα της μηχανής. Το διάγραμμα αυτό δείχνει γραφικά την θέση των φασιθετών του ρεύματος, της τάσης και της ροής του μαγνήτη στο επίπεδο dq. Η μεταφορά των μεγεθών αυτών σε τριφασικά μεγέθη γίνεται με την χρήση του



αντίστροφου μετασχηματισμού Park. Πιο κάτω δίνεται μια ενδεικτική εικόνα αυτού του διαγράμματος.



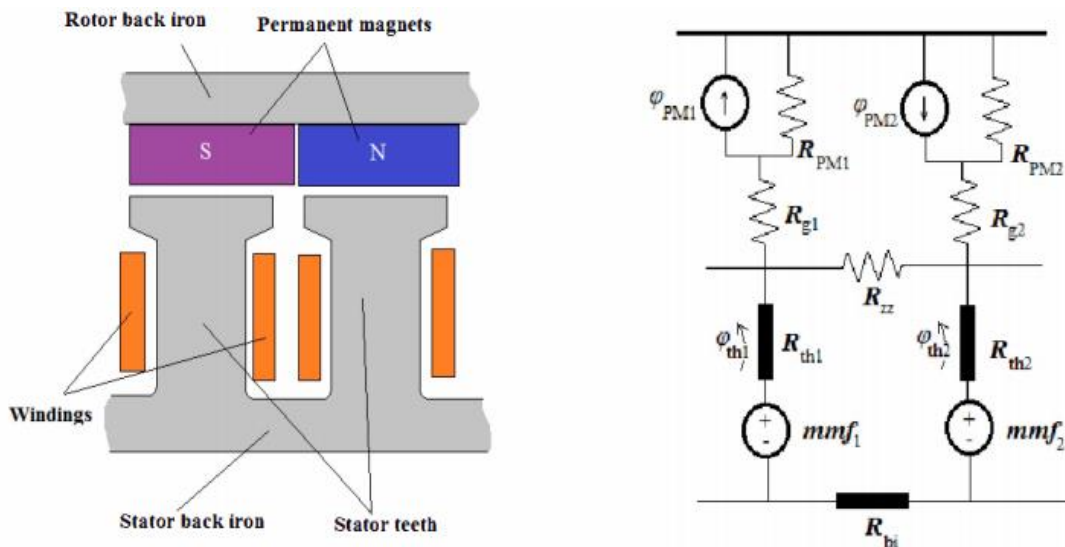
Σχ. 2.3.1.4 Δομή διανυσματικού διαγράμματος σύγχρονης μηχανής μονίμων μαγνητών.

Για να ολοκληρωθεί αυτή η ανάλυση της μηχανής είναι αναγκαίο να προσδιορίσουμε και την ικανότητα να παράγει ροπή. Ο τύπος που συνδέει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της μηχανής και τον αριθμό των πόλων (P) δίνεται παρακάτω:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} [(L_d - L_q) \cdot i_d i_q + \lambda_{Mag} i_q] \quad (2.8)$$

Στην παραπάνω εξίσωση είναι ακόμα εμφανής και η συνιστώσα της μαγνητικής ροπής (Reluctance). Οι αυτεπαγωγές που εμφανίζονται στους άξονες d και q της μηχανής είναι χαρακτηριστικό της μαγνητικής αντίστασης και συνεπώς της γεωμετρίας. Έτσι η διαφορά των αυτεπαγωγών των αξόνων, αντιπροσωπεύει εκτυπότητα και δίνει την επίδραση της μαγνητικής ροπής στην επίδοση της μηχανής. Ωστόσο, σε αυτού του είδους τις μηχανές, η κύρια συνεισφορά στην ροπή γίνεται από την αλληλεπίδραση του πεδίου του μαγνήτη με το κάθετο σε αυτό πεδίο του στάτη, για την παραγωγή του οποίου οφείλεται το ρεύμα του άξονα q.

Περαιτέρω ανάλυση των κινητήρων μπορεί να γίνει με το ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα. Η μέθοδος (EMEC) αυτή, χρησιμοποιεί μία πιο λεπτομερή ανάλυση του πεδίου που υπάρχει στο εσωτερικό του κινητήρα και διαφέρει ανάλογα με τη γεωμετρία που έχει επιλεγεί. Η ακρίβεια της μεθόδου αυτής, μεταβάλλεται σύμφωνα με τις παραδοχές, και την συνεισφορά που έχουν στο τελικό αποτέλεσμα τα φαινόμενα που αγνοούμε (πχ τριβές, απώλειες, επιπτώσεις των χωρικών αρμονικών πεδίου κλπ...). Ένα τέτοιο παράδειγμα δίνεται στην δημοσίευση [9] στην οποία γίνεται μια σύγκριση ανάμεσα στο μοντέλο ισοδυνάμου μαγνητικού κυκλώματος, στην ανάλυση μέσω μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων και στην πραγματικότητα. Η παραπάνω δημοσίευση πραγματοποιεί σύγκριση με βάση την ηλεκτρεγερτική δύναμη που παράγεται στα τυλίγματα της μηχανής.



Σχ.2.3.1.5 Μια ενδεικτική παρουσίαση μορφής ανάλυσης με τη μέθοδο του ισοδύναμου μαγνητικού κυκλώματος για σύγχρονη μηχανή επιφανειακών μαγνητών. Η εικόνα εμπεριέχεται στη δημοσίευση [10].

Τέλος, η κυρίαρχη μέθοδος ανάλυσης μηχανών σε επίπεδο σχεδίασης και προχωρημένου ελέγχου, είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να θεωρηθεί απλή ενώ η ακρίβεια της είναι πολύ μεγάλη και εξαρτάται από το πλήθος και την πυκνότητα των στοιχείων που χρησιμοποιούμε (πυκνότητα πλέγματος ή mesh size). Σε αυτή τη μέθοδο μπορούμε να εξετάσουμε πολλά φαινόμενα όπως η θερμική και η μηχανική ανάλυση. Το μειονέκτημα της είναι η απαίτηση μεγάλης υπολογιστικής ισχύος που χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό των μεγεθών σε κάθε στοιχείο. Μια ηλεκτρική μηχανή, σε μια βασική ανάλυση ηλεκτρομαγνητικού πεδίου χρησιμοποιεί συνήθως από 5.000 έως 50.000 κόμβους, το οποίο μεταφράζεται σε απαίτηση 2-5 δευτερολέπτων για κάθε στιγμιότυπο όταν η επεξεργασία γίνεται από έναν συμβατικό υπολογιστικό πυρήνα. Η μέθοδος από μαθηματική και πεδιακή σκοπιά θα μελετηθεί διεξοδικά πιο κάτω αφού αποτελεί το κύριο εργαλείο πεδιακής ανάλυσης του κινητήρα στην παρούσα διπλωματική εργασία.

### 2.3.2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (FEA) ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ.

Γενικά στοιχεία της μεθόδου: Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος επίλυσης για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων (ΜΔΕ). Η μέθοδος αυτή δίνει την ικανότητα ύπαρξης αξιόπιστων αποτελεσμάτων σε προβλήματα τα οποία η αναλυτική επίλυση είναι πολύ δύσκολη ή και καθόλου εφικτή. Το μειονέκτημα της είναι η υψηλή απαίτηση σε υπολογιστική ισχύ, πρόβλημα που ξεπεράστηκε τα τελευταία χρόνια χάρη της ραγδαίας και υψηλής τεχνολογικής ανάπτυξης των υπολογιστικών μεθόδων (αλγορίθμων) και επεξεργαστικής ικανότητας (Hardware). Τα πεδία εφαρμογών αυτής της μεθόδου καθημερινά αυξάνονται παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα στην βιομηχανία να σχεδιάζει με μεγάλη ακρίβεια κάθε τί το οποίο επιθυμεί!

Ο ηλεκτρομαγνητισμός αποτελεί την βάση όλων των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών τεχνολογιών. Η ανάλυσή των φαινομένων του ηλεκτρομαγνητισμού γίνεται μέσω των μερικών διαφορικών εξισώσεων του J.C. Maxwell οι οποίες διατυπώνονται παρακάτω:



Νόμος Faraday:  $\nabla \times \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$  (2.9)

Νόμος Ampere:  $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$  (2.10)

Νόμος Gauss για τον μαγνητισμό:  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$  (2.11)

Νόμος Gauss για τον ηλεκτρισμό:  $\nabla \times \mathbf{D} = \rho$  (2.12)

Η ανάλυση του πεδίου της μηχανής μονίμων μαγνητών υπάγεται κυρίως στην υποκατηγορία των μαγνητοστατικών προβλημάτων. Σε αυτή την κατηγορία προβλημάτων θεωρούμε πως τα πεδία είναι μόνιμα και συνεπώς δεν αλλάζουν στον χρόνο και ότι δεν υπάρχει καθόλου ύπαρξη του ηλεκτρικού πεδίου. Με αυτές τις υποθέσεις οι εξισώσεις του Maxwell τροποποιούνται ως εξής:

Νόμος Ampere:  $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$  (2.13)

Νόμος Gauss για τον μαγνητισμό:  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$  (2.14)

Σύμφωνα με τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις μηχανές μπορεί να εξαχθεί η σχέση που συνδέει το H με το B πεδίο με βάση την διαπερατότητα 'μ' και τη μαγνήτιση 'M' του υλικού. Η διαπερατότητα σε αυτά τα συνήθη υλικά μπορεί να είναι συνάρτηση ή/και πίνακας.

Έτσι λαμβάνουμε την σχέση:  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} + \mathbf{M}$  (2.15)

Στην συνέχεια για να γίνει μια απλοποίηση και ενοποίηση των σχέσεων (2.13) και (2.14) εισάγεται η έννοια του διανυσματικού δυναμικού A.

Η εξίσωση (2.14) ικανοποιείται ταυτοτικά όταν το πεδίο B μπορεί να γραφεί σαν στροβιλισμός (rot ή  $\nabla \times$ ) μιας διανυσματικής συνάρτησης A εξαιτίας της ταυτότητας  $\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) = 0$ .

Έτσι ο πεδίο B με το διανυσματικό δυναμικό συνδέεται ως:  $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$  (2.16)

Συνεπώς, το πρόβλημα μεταφέρεται στην ικανότητα εύρεσης μιας διανυσματικής συνάρτησης που ικανοποιεί την εξίσωση (2.14) όταν αντικαταστήσουμε το H πεδίο από τη σχέση (2.15) υποθέτοντας πως δεν υπάρχει μαγνήτιση 'M'.

Η σχέση 2.13 τροποποιείται ως εξής:  $\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \mathbf{B} \right) = \mathbf{J}$  (2.17)

Και στη συνέχεια με χρήση της (2.16) και της ταυτότητας  $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$  προκύπτει:

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \nabla \cdot (\nabla \cdot \mathbf{A}) + \mu \mathbf{J} = 0 \quad (2.18)$$

Η υπόθεση πως η σχέση (2.16) ισχύει για κάθε διανυσματική συνάρτηση A δεν μας στερεί το δικαίωμα να βρούμε μόνο τις συναρτήσεις που έχουν απόκλιση (div ή  $\nabla \cdot$ ) μηδενική σύμφωνα με το θεώρημα Helmholtz. Η επιλογή αυτή ονομάζεται συνθήκη Coulomb και η εφαρμογή της μας δίνει την εξίσωση του Poisson.

Συνθήκη Coulomb  $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$  (2.19)

Εξίσωση Poisson  $\frac{1}{\mu} \cdot \nabla^2 \times \mathbf{A} = \mathbf{J}$  (2.20)

Υπολογίζοντας το διανυσματικό δυναμικό μπορεί κανείς εύκολα να εξαγάγει τα πεδία B και H από τις σχέσεις (2.16) και στη συνέχεια (2.15). Στην γενική περίπτωση το

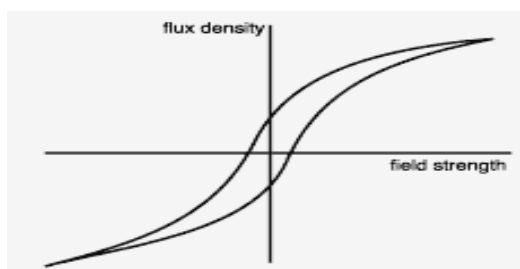
διανυσματικό δυναμικό είναι ένα διάνυσμα τριών συνιστωσών των οποίων οι τιμές εξαρτώνται από τρεις μεταβλητές ενώ η μαγνητική διαπερατότητα είναι μια δοσμένη συνάρτηση εξαρτώμενη από το υλικό με μεταβλητή το πεδίο B. Η αναλυτική λύση της εξίσωσης Poisson είναι γενικά δύσκολη και εμπεριέχει πολλές φορές και υποθέσεις για την τιμή της διαπερατότητας 'μ'. Ωστόσο, η δημιουργία αλγορίθμου και η εφαρμογή της θεωρίας της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων μπορεί εύκολα να λειτουργήσει με μεγάλη ακρίβεια στα αποτελέσματά της.

Στην λύση μερικών διαφορικών εξισώσεων απαραίτητος είναι ο ορισμός και η ανάθεση οριακών συνθηκών που η λύση της θα πρέπει να ακολουθεί. Οι οριακές αυτές συνθήκες κατηγοριοποιούνται ως προς το αν αφορούν την ίδια τη λύση ή τη παράγωγο της λύσης ή κάποιο συνδυασμό αυτών σε συνθήκες τύπου Dirichlet, Neumann και Robin αντίστοιχα. Ακόμη, σημαντικές είναι και οι υποκατηγορίες των συνθηκών Dirichlet σε περιοδικές, αντιπεριοδικές, μετατόπισης κτλ.

## 2.4 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

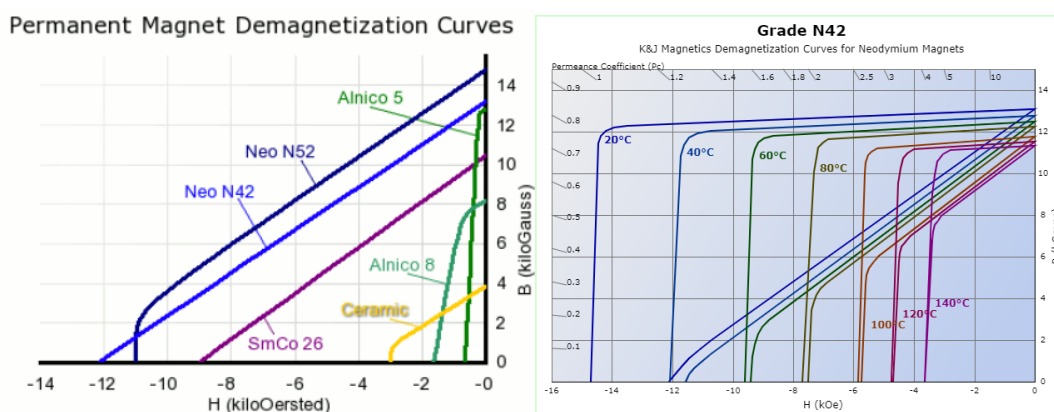
Μια σύγχρονη μηχανή μονίμων μαγνητών για την κατασκευή της χρησιμοποιεί υλικά με βάση την μηχανική αντοχή, την ενίσχυση του πεδίου και την ελάττωση των απωλειών. Η μηχανική αντοχή είναι απαραίτητη για την στήριξη της μηχανής και την μετάδοση της ροπής στα υπόλοιπα κινητήρια συστήματα, που συνδέονται με τους τροχούς. Στην συνέχεια επιλέγονται υλικά για το τύλιγμα με βάση την ηλεκτρική αντίσταση τους που σκοπό έχουν την μείωση των ωμικών απωλειών του κινητήρα. Τέτοια υλικά είναι ο χαλκός και σε αρκετά προχωρημένες απαιτήσεις οι τεχνολογίες υπεραγωγών. Τέλος, σημαντική είναι και η επιλογή των σιδηρομαγνητικών υλικών που χρησιμοποιούνται στην ενίσχυση του μαγνητικού πεδίου και έχουν στόχο την μείωση των απωλειών δινορρευμάτων και απωλειών υστέρησης. Πιο αναλυτικά τα σιδηρομαγνητικά υλικά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ως προς την ικανότητα να διατηρούν την παραμένουσα μαγνήτιση τους σε σκληρά και μαλακά.

Τα μαλακά σιδηρομαγνητικά υλικά: Χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση των προϋπαρχόντων μαγνητικών πεδίων που δημιουργούνται από το τύλιγμα ή τους μαγνήτες. Τα υλικά αυτά έχουν μεγάλη τιμή διαπερατότητας 'μ' στην γραμμική περιοχή και στενό βρόχο υστέρησης. Η εξέλιξη τους αφορά την αύξηση της εσωτερικής αντίστασης ώστε να μην αναπτύσσονται μεγάλα δινορρεύματα, την μείωση του βρόχου υστέρησης καθώς και την αύξηση του σημείου γονάτου κορεσμού. Οι απώλειες του βρόχου υστέρησης αυξάνονται με βάση τη συχνότητα του πεδίου. Ακόμη στον βρόχο αυτόν δημιουργούνται και μικρότεροι βρόχοι όταν το πεδίο δεν αναστρέφεται πλήρως. Σημαντική και λεπτομερής είναι η ανάλυση που έχει γίνει κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής του κ. Π. Ροβολή με θέμα: «Μοντελοποίηση Μαγνητικών Υλικών για Βελτιστοποίηση Κατασκευής και Λειτουργίας Ηλεκτρικών Μηχανών» [11]. Μια τυπική καμπύλη βρόχου υστέρησης δίνεται παρακάτω.



Σχ.2.4.1 Βρόχος υστέρησης Μαλακού μαγνητικού υλικού. Το σχήμα βρέθηκε στην ιστοσελίδα: ["info.ee.surrey.ac.uk"](http://info.ee.surrey.ac.uk) ([tinyurl.com/y6yk36ue](http://tinyurl.com/y6yk36ue))

Τα σκληρά μαγνητικά υλικά: Γνωστά και ως φυσικοί μαγνήτες. Η επιλογή τους γίνεται με βάση την μέγιστη ικανότητα ενέργειας που μπορούν να αποδώσουν και την παραμένουσα μαγνήτιση  $B_r$  που έχουν. Κύριο χαρακτηριστικό επιλογής τους ακόμα είναι και η αντοχή που διαθέτουν να μην χάνουν τη μαγνήτιση τους από κάποιο εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο. Η ύπαρξη μαγνητών, στις μηχανές, προκαλεί ωστόσο πρόσθετες απώλειες δινορρευμάτων, εξαρτώμενες από την ηλεκτρική αντίσταση του μαγνητικού υλικού. Σε τέτοιου είδους υλικά δεν είναι ανάγκη να υπάρξει πλήρη περιγραφή της καμπύλης  $B-H$ , εφόσον κατά τη λειτουργία τους βρίσκονται κατά κύριο λόγο σε γραμμική περιοχή στο δεύτερο τεταρτημόριο της καμπύλης  $B-H$ . Μεγάλη είναι ωστόσο και η εξάρτηση της ικανότητας να διατηρούν την μαγνήτιση τους σε διάφορες θερμοκρασίες. Τυπικές καμπύλες μαγνητών και η εξάρτησή τους από τη θερμοκρασία δίνονται παρακάτω:



Σχ.2.4.2 Στα αριστερά φαίνονται οι καμπύλες  $B-H$  διάφορων τύπων μαγνητών και στα δεξιά η εξάρτηση της καμπύλης  $B-H$  του μαγνήτη Νεοδυμίου ( $NdFeB$ ) N42 με τη θερμοκρασία. Οι εικόνες βρέθηκαν στην σελίδα: ["kjmagnetics.com"](http://kjmagnetics.com) ([tinyurl.com/yyspb933](http://tinyurl.com/yyspb933))

Στην διπλωματική αυτή εργασία, πραγματοποιείται λεπτομερέστερη ανάλυση του φαινομένου της απομαγνήτισης των μονίμων μαγνητών και της ανάπτυξης αλγορίθμου υπολογισμού αυτής.

#### 2.4.1 ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ: ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ

Ένα μεγάλο μειονέκτημα των μηχανών μονίμων μαγνητών αποτελεί ο κίνδυνος απομαγνήτισης (μερικής ή ολικής) των μαγνητών. Το μειονέκτημα αυτό είναι ουσιαστικής σημασίας αφού επηρεάζει άμεσα και αμετάκλητα την απόδοση που έχει σχεδιαστεί να διαθέτει ο κινητήρας. Η επίπτωση της απομαγνήτισης στην απόδοση οφείλεται στο γεγονός πως το πεδίο του δρομέα είναι μειωμένο σε σχέση με αυτό που σχεδιάστηκε να διαθέτει και με σκοπό να διατηρήσει τις επιδόσεις που σχεδιάστηκε, η μείωση αυτή κάνει αναγκαία την αύξηση του πεδίου του στάτη. Η αύξηση του πεδίου στάτη γίνεται με αύξηση του ρεύματος στα τυλίγματα που συνεπάγει πρόσθετες απώλειες στην μηχανή. Η μείωση της απόδοσης ωστόσο συνθέτει και ένα φαινόμενο ντόμινο καθώς αυξάνει την μέση θερμοκρασία λειτουργίας του κινητήρα που κάνει άμεσα πιο ευαίσθητους τους μαγνήτες στην απομαγνήτιση. Συνεπώς, ένας κινητήρας που διαθέτει κίνδυνο μερικής απομαγνήτισης, θα οδηγηθεί συν το χρόνο, σε ολική απομαγνήτιση και συνάμα σε κοστοβόρα αλλαγή του δρομέα. Η δυνατότητα επιβολής της ορθής μαγνήτισης στους μαγνήτες για την αποκατάσταση της πλήρους μαγνήτισης τους, αποτελεί σύνθετο πρόβλημα που απαιτεί πολύ αυστηρές συνθήκες, στις οποίες ο μαγνήτης θα πρέπει να υποβληθεί ώστε να γίνει αυτό εφικτό.

Αρχικά, για την μελέτη των μαγνητών πρέπει να γίνει ένας λεπτομερής προσδιορισμός της καμπύλης του μαγνήτη B-H στο δεύτερο τεταρτημόριο. Για το σκοπό αυτό σύμφωνα με τη δημοσίευση [12] αναφέρεται το εκθετικό μοντέλο υπολογισμού της καμπύλης B-H. Σύμφωνα με την παραπάνω δημοσίευση η συνάρτηση που περιγράφει την καμπύλη αποτελείται από δύο όρους τον γραμμικό και τον εκθετικό. Για την επίτευξη της σωστής τοποθέτησης της, απαραίτητο είναι να προσδιοριστούν οι τιμές δύο σταθερών. Παρακάτω δίνεται ο τύπος της συνάρτησης και η μέθοδος υπολογισμού των σταθερών

$$B(H) = B_r + \mu_0 \mu_r \cdot H - E \cdot e^{K_1(K_2+H)} \quad (2.21)$$

Το E δηλώνει τις μονάδες μέτρησης του εκθετικού όρου (πχ 1 T ή 1 kGauss).

Το  $\mu_r$  δηλώνει την σχετική μαγνητική διαπερατότητα.

Το  $B_r$  δίνεται από τον κατασκευαστή και δηλώνει την παραμένουσα μαγνήτιση.

Το  $K_1$  δηλώνει την οξύτητα του γονάτου ενδεικτική τιμή είναι  $-4 \cdot 10^{-5}$  m/A για μαγνήτες Νεοδυμίου NdFeB κλασικής βαθμίδας (regular grade magnet).

Το  $K_2$  υπολογίζεται από τον τύπο: 
$$K_2 = \frac{\ln\left[\frac{(B_r + (\mu_r - 1) \cdot \mu_0 \cdot jH_c) \cdot \frac{1}{E}}{K_1}\right]}{jH_c} \quad (2.22)$$

Στον τύπο (2.22) το  $jH_c$  δίνεται από τον κατασκευαστή και είναι η τιμή της intrinsic coercivity.

Βάση του συγκεκριμένου μοντέλου, μπορούμε να εξάγουμε μία ικανοποιητική ως προς την ακρίβεια καμπύλη B-H για τη τιμή της  $B_r$ ,  $jH_c$  που δίνει ο κατασκευαστής. Για να γίνει αυτό απαιτείται να επιλεγεί μία ικανοποιητική τιμή για το  $K_1$ . Γενικά, ο κατασκευαστής παρέχει μόνο μία τιμή για τα  $B_r$ ,  $jH_c$  (συνήθως αυτή που έχει ο μαγνήτης στους 20°C) ενώ παρέχονται και δύο συντελεστές της γραμμικής εξάρτησης που έχουν οι τιμές των  $B_r$ ,  $jH_c$  με τη θερμοκρασία. Η εξάρτηση των  $B_r$  και  $jH_c$  από τη θερμοκρασία, περιγράφονται από τους παρακάτω τύπους:

$$B_r(\text{temp}) = \frac{B_r^{@20^\circ\text{C}}}{100} \cdot [100 + (\text{temp} - 20) \cdot \alpha_{B_r}] \quad (2.23)$$

$$jH_c(\text{temp}) = \frac{jH_c^{@20^\circ\text{C}}}{100} \cdot [100 + (\text{temp} - 20) \cdot \alpha_{jH_c}] \quad (2.24)$$

Το  $\alpha_{B_r}$  και το  $\alpha_{jH_c}$  δίνονται από τον κατασκευαστή και περιγράφουν ποσοστιαία μεταβολή ανά μονάδα θερμοκρασίας ( $\%/^\circ\text{C}$ ) ενώ το temp είναι η θερμοκρασία για την οποία θέλουμε να υπολογίσουμε τις τιμές των  $B_r$ ,  $jH_c$ .

Οι αποκλίσεις της μεθόδου αυτής από τις καμπύλες που παρέχει ο κατασκευαστής δεν είναι μεγάλες. Πάρα ταύτα είναι αισθητές και μπορούν να βελτιωθούν με την προσθήκη επιπρόσθετων σταθερών  $\alpha_{K_1}$  και  $\alpha_{jH_c}^{temp^2}$ .

Η προσθήκη του  $\alpha_{K_1}$  γίνεται επειδή, η όξυνση του γονάτου μεταβάλλεται με την θερμοκρασία και συνεπώς η σταθερά  $\alpha_{K_1}$  χρησιμοποιείται για να δώσει τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η μεταβολή αυτή, επηρεάζοντας κατάλληλα τον συντελεστή  $K_1$ . Παρακάτω δίνεται η σχέση του  $K_1$  με τη θερμοκρασία.

$$K_1(\text{temp}) = \frac{K_1^{@20^\circ\text{C}}}{100} \cdot [100 + (\text{temp} - 20) \cdot \alpha_{K_1}] \quad (2.25)$$

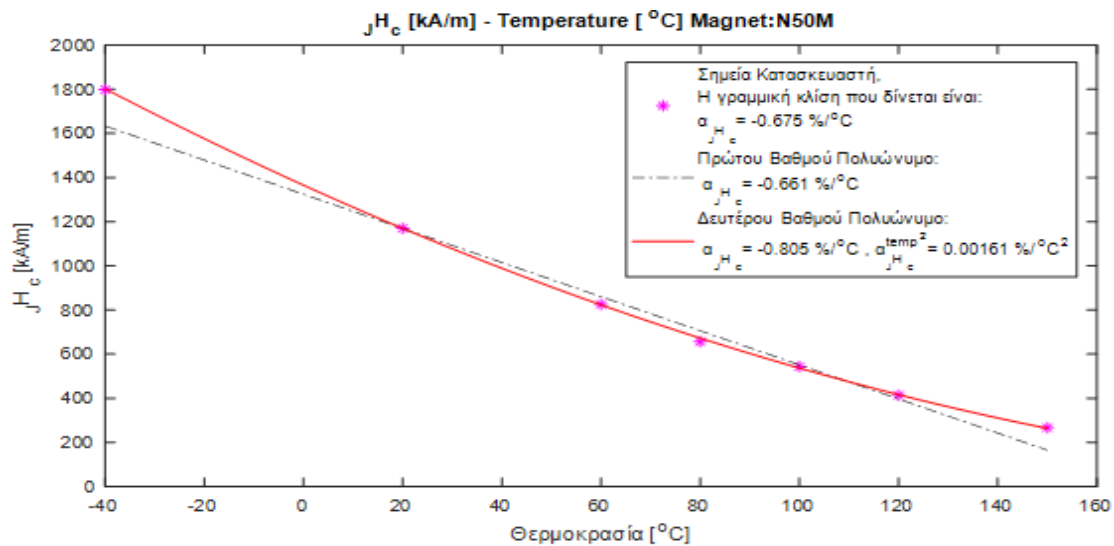
Η τιμή του  $\alpha_{K_1}$  έχει εμπειρικά βρεθεί κοντά στο 0.5 έως 1.3 για μαγνήτες Νεοδυμίου.

Η προσθήκη του  $\alpha_{j_{H_c}}^{temp^2}$  γίνεται επειδή η περιγραφή του  $j_{H_c}$  από τον κατασκευαστή δίνεται με γραμμική σχέση για απλότητα. Ωστόσο είναι καθοριστικής σημασίας η τιμή του  $j_{H_c}$  σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, για την ανάλυση της απομαγνήτισης και κρίνεται απαραίτητη η εισαγωγή ενός δευτεροβάθμιου πολυωνύμου για την αύξηση της ακρίβειας. Η νέα σχέση περιγραφής του  $j_{H_c}$  δίνεται παρακάτω:

$$j_{H_c}(\text{temp}) = \frac{j_{H_c}^{@20^\circ\text{C}}}{100} \cdot [100 + (\text{temp} - 20) \cdot \alpha_{j_{H_c}} + (\text{temp} - 20)^2 \cdot \alpha_{j_{H_c}}^{temp^2}] \quad (2.26)$$

Η τιμή του  $\alpha_{j_{H_c}}^{temp^2}$  και η νέα τιμή του  $\alpha_{j_{H_c}}$  υπολογίζονται με την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων ταιριάζοντας με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις τιμές του  $j_{H_c}$  των διαγραμμάτων του κατασκευαστή με την συνάρτηση (2.26).

Η διαδικασία αυτή γίνεται με τη βοήθεια των υπολογιστικών εργαλείων (MATLAB). Παρακάτω φαίνεται ανάλυση, η οποία συγκρίνει τις δύο συναρτήσεις εξάρτησης (2.24 και 2.26) της  $j_{H_c}$  με τη θερμοκρασία:

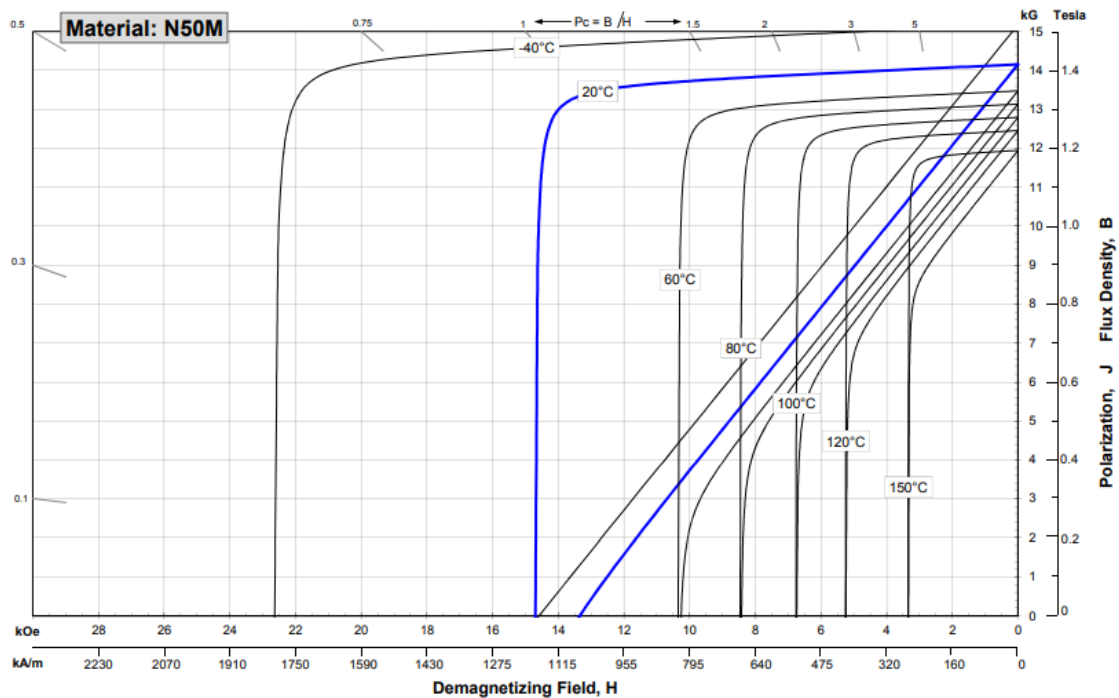
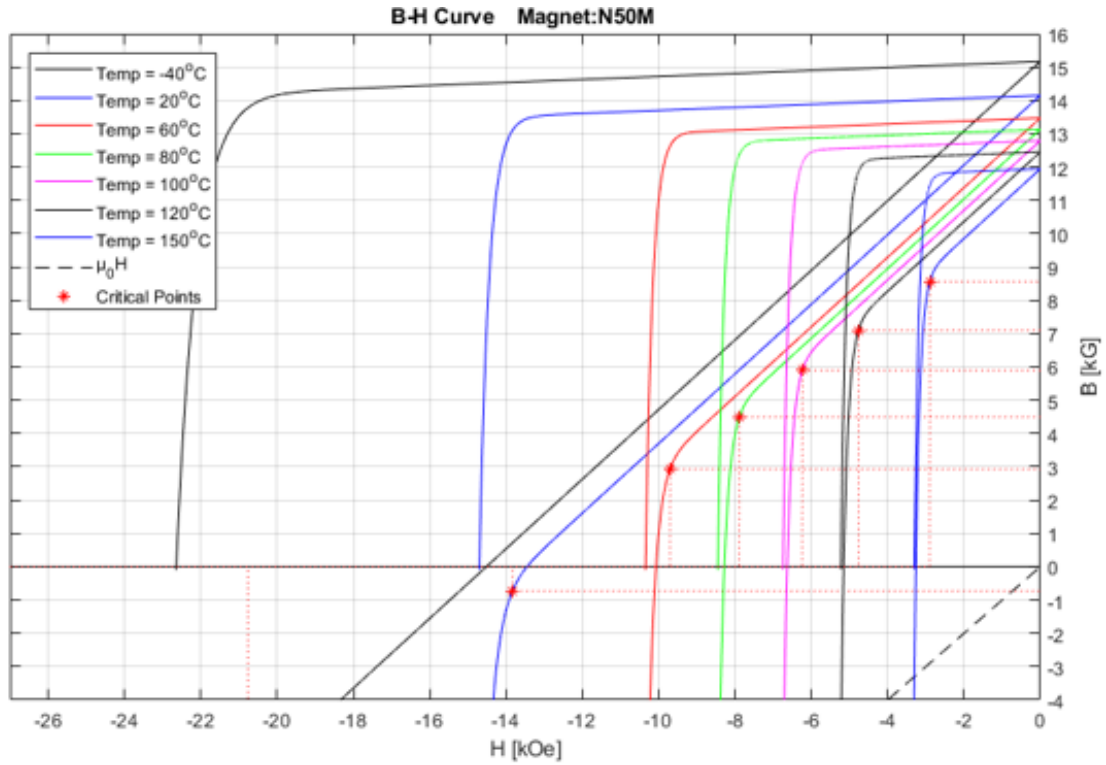


Σχ.2.4.1.1 Η γραφική παράσταση των συναρτήσεων εξάρτησης της  $j_{H_c}$  με τη θερμοκρασία. Το σχήμα έγινε με τη βοήθεια του Matlab.

Θερμοκρασία [°C]	Τιμή $j_{H_c}$ [kOe] Κατασκευαστή	Τιμή $j_{H_c}$ [kOe] Πρωτοβάθμιου πολυωνύμου	Σχετικό σφάλμα [%] Πρωτοβάθμιου πολυωνύμου	Τιμή $j_{H_c}$ [kOe] Δευτεροβάθμιου πολυωνύμου	Σχετικό σφάλμα [%] Δευτεροβάθμιου πολυωνύμου
-40	1798	1634	-9,17	1802	0,21
20	1170	1170	0,00	1170	0,00
60	825	861	4,29	823	-0,23
80	657	706	7,54	673	2,46
100	544	551	1,45	537	-1,20
120	414	397	-4,10	416	0,61
150	267	165	-38,13	264	-1,15

Σχ.2.4.1.2 Πίνακας τιμών των δύο συναρτήσεων (2.24 και 2.26) εξάρτησης της  $j_{H_c}$  με τη θερμοκρασία. Ο υπο μελέτη μαγνήτης είναι ο ND50M

Τέλος, η παραπάνω μελέτη σκοπό είχε την εύρεση ορισμένων διαδικασιών που οδηγούν στον αναλυτικό υπολογισμό της καμπύλης B-H για οποιαδήποτε -εντός κατασκευαστικών ορίων- θερμοκρασία των μαγνητών, σύμφωνα με τις καμπύλες του παρέχει ο κατασκευαστής. Το αποτέλεσμα της μεθόδου σε σύγκριση με της δοσμένες καμπύλες του κατασκευαστή φαίνεται πιο κάτω.

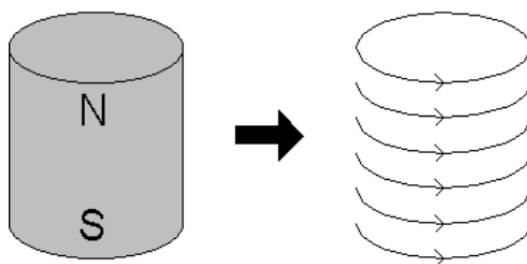


1 kA/m = 12.566 Oe 1 kOe = 79.577 kA/m

Σχ.2.4.1.3 Σύγκριση παραγόμενων καμπυλών της παραπάνω μεθοδολογίας σε σχέση με αυτές του κατασκευαστή. Στο άνω σχέδιο τα σημεία που είναι τονισμένα είναι τα όρια της γραμμικής περιοχής. Η κάτω εικόνα βρέθηκε στην σελίδα "arnoldmagnetics.com" (tinyurl.com/y5j2zbj6).

Περαιτέρω βελτιστοποιήσεις για τον καλύτερο υπολογισμό της συνάρτησης B-H μπορούν να γίνουν τροποποιώντας ακόμα και την μορφή της συνάρτησης. Ωστόσο, δεν είναι αποδοτικό να πραγματοποιηθούν, εφόσον το παρόν μοντέλο έχει την ικανότητα να αποδώσει σημαντική ακρίβεια στην εύρεση του γονάτου και στην εύρεση του σημείου λειτουργίας κάθε σημείου του πλέγματος. Ακόμη, για τη μελέτη φαινομένων που αφορούν μαγνητικά υλικά, απαιτείται η μέτρηση των μαγνητικών δοκιμών που χρησιμοποιούνται, προκειμένου να δημιουργηθούν συναρτήσεις που τα περιγράφουν με μεγάλη ακρίβεια. Συνεπώς, σύνθετες προσθήκες θεωρητικής περιγραφής, προσδίδουν θετικά αποτελέσματα όταν αυτές επαληθεύονται από πειραματικές διατάξεις.

Η αντοχή των μαγνητών στην απομαγνήτιση, μπορεί να διαπιστωθεί από την θέση των σημείων του πλέγματος στην καμπύλη B-H. Η διαδικασία – αλγόριθμοι υπολογισμού του πεδίου στην μηχανή με το πρόγραμμα (Finite element method magnetics (FEMM)) δεν λαμβάνει υπόψη της, την καμπύλη αυτή, ενώ αντικαθιστά τους μαγνήτες με μία ισοδύναμη μορφή τους. Η ισοδύναμη αυτή μορφή υποθέτει πως ο μαγνήτης είναι ένα υλικό με γραμμική διαπερατότητα 'μ' χωρίς μαγνήτιση 'M', που στα άκρα του υπάρχουν επιφανειακά ρεύματα τα οποία δημιουργούν ένταση μαγνητικού πεδίου  $H_c$ . Η τιμή του  $H_c$  είναι αυτή που απαιτείται για να μετατοπιστεί η καμπύλη B-H του μαγνήτη στο μηδέν. Μια εικόνα που δείχνει σχηματικά τα παραπάνω είναι:



Σχ.2.4.1.4 Θεώρηση λειτουργίας μαγνήτη στο πρόγραμμα FEMM. Το σχέδιο εμπεριέχεται στον οδηγό χρήσης του προγράμματος που βρίσκεται στην σελίδα: "femm.info" ([tinyurl.com/ygl7uol](http://tinyurl.com/ygl7uol))

Στην μετά την προσομοίωση ανάλυση (Post Process) θεωρείται απαραίτητος ο έλεγχος των σημείων του πλέγματος του μαγνήτη ως προς την θέση τους στο επίπεδο B-H. Ο προσανατολισμός του μαγνήτη υποδεικνύει θεώρηση αξόνων ανάλυσης, σε άξονα κάθετο στη διεύθυνση του πεδίου του (άξονας y) και σε άξονα παράλληλο και σύμφωνο με τη φορά του πεδίου του (άξονας x). Η θέση λοιπόν των στοιχείων του πλέγματος μαγνήτη στο επίπεδο B – H, αφορά κυρίως το πεδίο που βρίσκεται στον παράλληλο άξονα (άξονας x). Αντίστοιχα, το πεδίο που βρίσκεται στον κάθετο άξονα δύσκολα μπορεί να ξεπεράσει το γόνατο της καμπύλης B-H αφού η μη γνωστή καμπύλη που περιγράφει την συμπεριφορά του μαγνήτη σε αυτόν τον άξονα, διαθέτει υψηλή  $\mu H_c$  εξαιτίας κατασκευαστικής ανομοιομορφίας. Η γωνία που σχηματίζει το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο με τον μαλακό άξονα του μαγνήτη σημαντικό είναι να λαμβάνεται υπόψη.

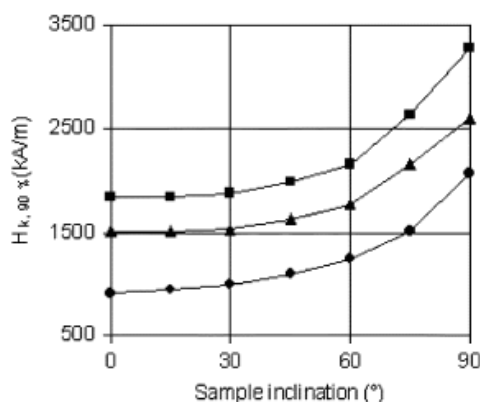
## 2.4.2 ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ: ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΜΑΓΝΗΤΗ ΚΑΙ ΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Στο μικρό-κοσμώ των sintered (πυροσυσσωματωμένων) μαγνητών οι κόκκοι (magnet grains) που υπάρχουν σε αυτούς αρχικά δίνονται ευθυγραμμισμένοι (στατιστικά) με τη διεύθυνση μαγνήτισης και συνάμα με τον εύκολο άξονα μαγνήτισης. Η στατιστική αυτή συμπεριφορά των κόκκων συνθέτει τη διεύθυνση του άξονα που σχηματίζεται η

μαγνήτιση. Η δυνατότητα των κόκκων να ευθυγραμμίζονται στον σκληρό άξονα είναι μειωμένη, συνεπώς η απομαγνήτιση είναι σχετικά εύκολο να γίνει όταν το εξωτερικό πεδίο είναι αντιπαράλληλο στον άξονα της μαγνήτισης.

Σταδιακά, καθώς το επιβαλλόμενο πεδίο σχηματίζει γωνία με τον μαλακό άξονα του μαγνήτη η δυνατότητα να απομαγνητιστεί μειώνεται. Η μαθηματική περιγραφή της εξάρτησης της  $JH_c$  με τη γωνία του μαλακού άξονα σε σχέση με το εξωτερικό πεδίο ( $\theta$ ) δόθηκε αρχικά από το «νόμο του Kondorsky» το 1940 ο οποίος δήλωνε εξάρτηση  $1/\cos\theta$ . Η υπόθεση αυτή δηλώνει και την άπειρη αντοχή απομαγνήτισης σε άπειρη τιμή εξωτερικών πεδίων υπό γωνία 90 μοιρών πράγμα που δεν μοιάζει λογικό.

Για τον λόγο αυτό, διεξήχθησαν περαιτέρω μελέτες όπως η δημοσίευση [13]. Η προαναφερθείσα μελέτη, καταλήγει στο συμπέρασμα, πως για μικρές τιμές της γωνίας του μαλακού άξονα του μαγνήτη σε σχέση με το εξωτερικό πεδίο ( $<45^\circ$ ) δεν υπάρχει ουσιαστική εξάρτηση της γωνίας στην μείωση του αρχικού πεδίου που είχε ο μαγνήτης και συνεπώς το μέτρο του εξωτερικού πεδίου  $B$  καθορίζει την απομαγνήτιση. Αντίθετα για τιμές μεγαλύτερες των  $45^\circ$  υπάρχει εξάρτηση της γωνίας του εξωτερικού πεδίου με τον μαγνήτη και η εξάρτηση αυτή, συνδέεται με τα εν γέννη χαρακτηριστικά του κάθε μαγνήτη, όπως οι προσμίξεις  $Dy$ , την δυνατότητα προσανατολισμού των κόκκων και τις τιμές των  $B_r$  και  $JH_c$ . Στην συνέχεια δίνονται ενδεικτικές καμπύλες που δείχνουν την εξάρτηση της έντασης του εξωτερικού πεδίου, η οποία είναι απαραίτητη για να μεταβάλει το  $B_r$  του ορθού άξονα μαγνήτη κατά 10% με τη γωνία εφαρμογής του πεδίου αυτού σε σχέση πάντα με τον μαλακό άξονα του μαγνήτη.

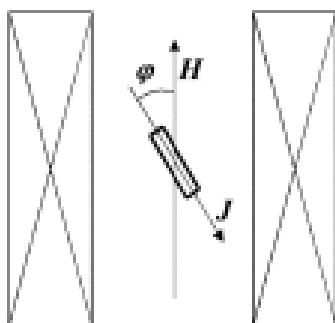


Σχ.2.4.2.1 Ενδεικτική συμπεριφορά εξάρτησης της  $JH_c \sim H_{90}$  με τη γωνία του εξωτερικού πεδίου σε σχέση με τον μαλακό άξονα του μαγνήτη. Η εικόνα αποτελεί μέρος της δημοσίευσης [15].

Επιπλέον, θεωρητικά μαθηματικά μοντέλα εισάγονται για τον τρόπο υπολογισμού της εξάρτησης - γωνίας και  $JH_c$  από την δημοσίευση [14].

Για τον σαφή προσδιορισμό της εξάρτησης της γωνίας με την τιμή του  $JH_c$  μπορούν να δημιουργηθούν συναρτήσεις με βάση τιμές μετρήσεων. Μια τέτοια πειραματική διάταξη περιγράφεται στην δημοσίευση [15]. Στην δημοσίευση αυτή υπάρχει η δυνατότητα στροφής του άξονα του δοκιμίου μαγνήτη σε σχέση με το εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο. Σε κάθε μία τιμή γωνίας ο μαγνήτης είναι πλήρως ορθά μαγνητισμένος, ενώ μετριέται η τιμή του εναπομείναντος μαγνητισμού κάθε φορά μετά από την έκθεσή του σε ορισμένη, από την διάταξη, τιμή του εξωτερικού πεδίου. Η διάταξη αυτή δίνεται παρακάτω:





Σχ.2.4.2.2 Διάταξη πειράματος διεξαγωγής εξάρτησης του  $jH_c$  με τη γωνία που σχηματίζει ο μαλακός άξονας του μαγνήτη με αυτή του εξωτερικού πεδίου. Η εικόνα αποτελεί μέρος της δημοσίευσης [15].

Η διάταξη παρέχει την δυνατότητα εύρεσης μίας ικανοποιητικής συνάρτησης για την περιγραφή αυτής της εξάρτησης. Ενδεικτικά δίνεται η συνάρτηση που εξήχθη στην παραπάνω δημοσίευση.

$$jH_c^{\text{Angle}}(\varphi) = jH_c^{\text{@}\varphi=0} \cdot (1 + \alpha_1\varphi + \alpha_2\varphi^2 + \alpha_3\varphi^3) \quad (2.27)$$

Οι τιμές των παραμέτρων  $\alpha_n$  υπολογίζονται με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων με βάση τις πειραματικές μετρήσεις.

Η χρησιμότητα των συναρτήσεων ίδιου είδους με αυτή της σχέσης (2.27) συντελούν σε συνδυασμό με την μέθοδο υπολογισμού των ΒΗ καμπυλών, στην εύρεση της θέσης του γονάτου κορεσμού για οποιαδήποτε κατεύθυνση του πεδίου στην μηχανή. Σημαντική είναι ακόμα και η παρουσία μεταβολής της διαπερατότητας 'μ' που παρουσιάζεται όσο μεταβάλλεται ο άξονας της μαγνήτισης, πάρα ταύτα η μεταβολή αυτή δεν είναι ιδιαιτέρως μεγάλη.

Σε κάθε περίπτωση η συμπεριφορά της μεταβολής της  $jH_c$  και η ανάλυση του πεδίου στον μαλακό και σκληρό άξονα ( $B_x = B_{\text{tot}} \cdot \cos\theta$ ) έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Η αύξηση της γωνίας οδηγεί στην μείωση της ικανότητας μεταβολής του Βr.
- Η προβολή του πεδίου στον άξονα x είναι ανάλογη του  $\cos\theta$  επί το μέτρο του πεδίου.

Η χρήση λοιπόν, σταθερού σημείου  $jH_c$  και η σύγκριση μόνο της κάθετης στον μαλακό άξονα συνιστώσας, οδηγεί σε όμοια συμπεριφορά με αυτή που θα είχαμε αν λαμβάναμε υπόψιν το μέτρο του εξωτερικού πεδίου και την αύξηση της  $jH_c$ . Η παραπάνω παραδοχή έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε μικρές γωνίες πεδίου με μαλακού άξονα με σημαντική μείωση της επεξεργαστικής ισχύος που απαιτεί η προσομοίωση.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, θεωρήθηκε, ότι η ύπαρξη σαφών μετρήσεων των μαγνητικών δοκιμών για την εξαγωγή καμπύλης εξάρτησης, προσδίδει ακρίβεια και λόγο ύπαρξης της ανάλυση και των δύο συνιστωσών του πεδίου για τον υπολογισμό της απομαγνήτισης. Εξ αιτίας αυτού, η ανάλυση της απομαγνήτισης έγινε με σταθερή  $jH_c$  και τη χρήση μόνο του παράλληλου στον μαλακό άξονα πεδίο.

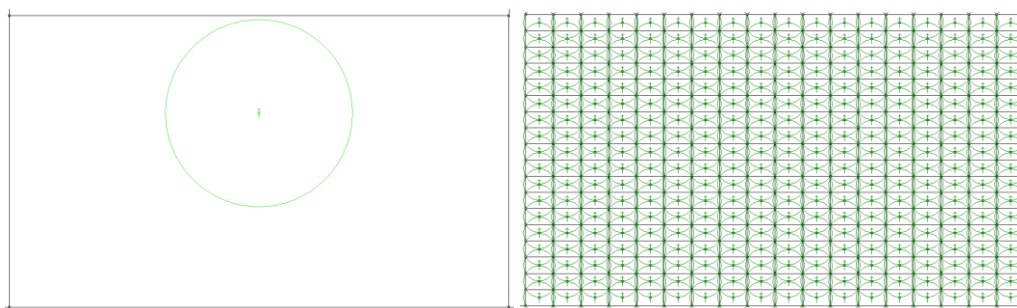
#### 2.4.3 ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ: ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΣΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

Οι προσομοιώσεις της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων μέσω του λογισμικού FEMM, όπως αναφέρθηκε, δεν εξασφαλίζουν την παραμονή των στοιχείων του μαγνήτη εντός της καμπύλης Β-Η.

Οι λόγοι που δεν γίνεται αυτό είναι εξαιτίας της αμφίβολης ύπαρξης αριθμητικής ευστάθειας των υπολογισμών, η οποία είναι απαραίτητη για τη βεβαίωση της περάτωσης του αλγορίθμου σε πεπερασμένο χρόνο. Ωστόσο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μοντέλα λειτουργίας των μαγνητικών υλικών τα οποία δεν επηρεάζουν την αριθμητική ευστάθεια των υπολογισμών του προγράμματος ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων.

Για να γίνει αυτό σε κάθε στοιχείο του πλέγματος του μαγνήτη, απαραίτητο είναι να προσδιορίζεται η τιμή του  $H_c$ , δηλαδή η παραμένουσα μαγνήτιση. Στο πρόγραμμα αυτό υπάρχει και η δυσκολία χωρισμού της τιμής  $H_c$  που αναθέτει το πρόγραμμα σε κάθε στοιχείο του πλέγματος. Αυτό διαπιστώνεται στον πηγαίο κώδικα του προγράμματος, ο οποίος -ελευθέρα παρέχεται στην ιστοσελίδα του- αναθέτει, σε κάθε επανάληψη την τιμή  $H_c$  της κλάσης που ανήκουν τα στοιχεία του πλέγματος, σε αυτή τη περίπτωση της κλάσης του μαγνήτη. Η προσπάθεια να αλλαχθεί ο πηγαίος κώδικας ώστε η τιμή του  $H_c$  να αποτελεί μέρος της κλάσης του πλέγματος, και η εισαγωγή της καμπύλης B-H του μαγνήτη θα ήταν δαιδαλώδης.

Για τον λόγο αυτό απαραίτητος είναι ο έλεγχος στην μετά την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων επεξεργασία (Post Process). Μπορούμε, λοιπόν να κατακερματίσουμε τον μαγνήτη σε επιμέρους μαγνήτες και να μεταβάλουμε εκ του αποτελέσματος την τιμή του  $H_c$  κάθε κομματιού μαγνήτη ώστε όλα τα σημεία του πλέγματος αυτού να βρίσκονται εντός της προ-υπολογισμένης καμπύλης B-H. Ο τρόπος που μεταβάλουμε την τιμή του  $H_c$  σε κάθε επανάληψη συνθέτει τις μεθοδολογίες ανάλυσης της απομαγνήτισης.

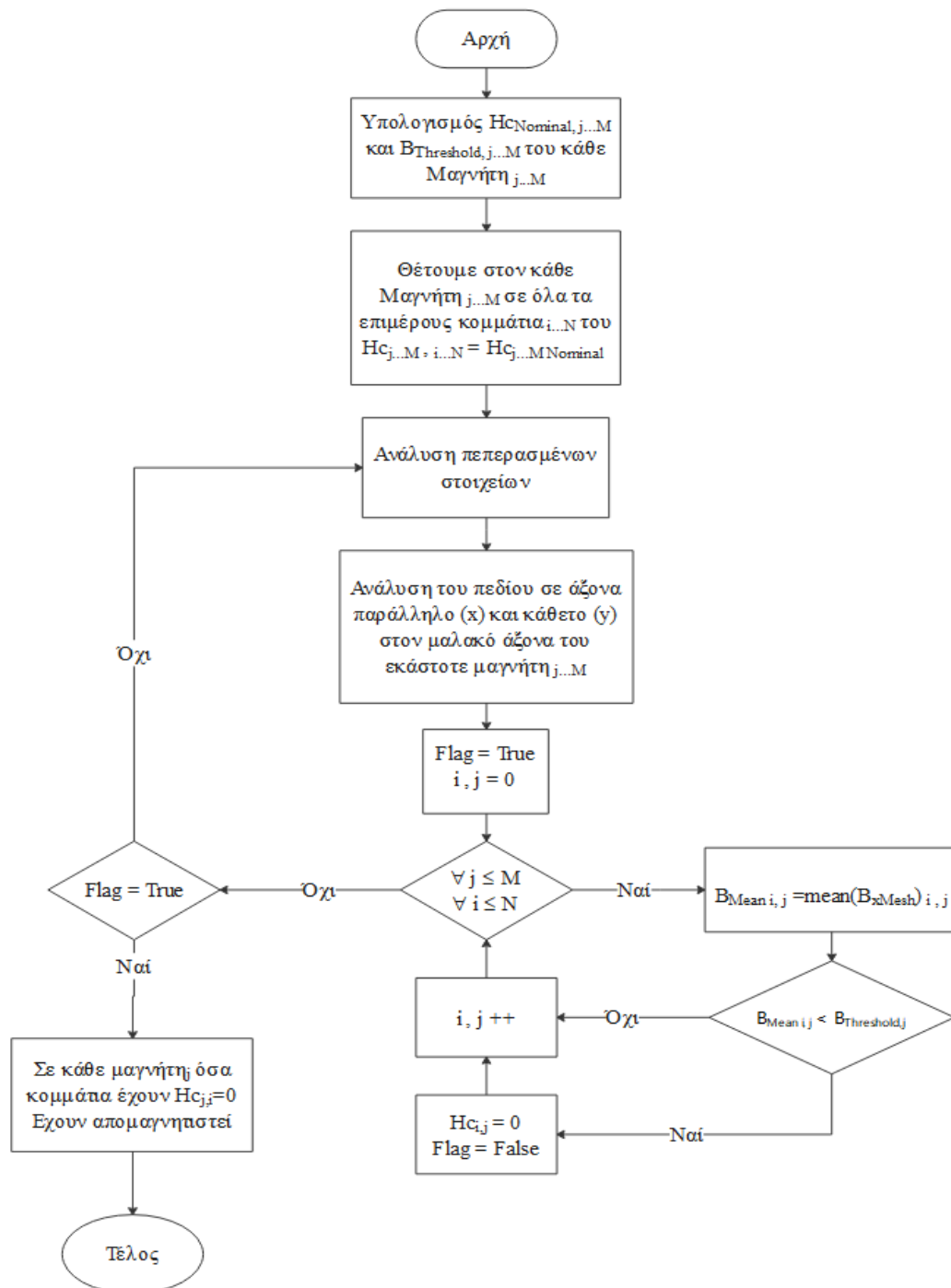


Σχ. 2.4.3.1 Αριστερά είναι η εικόνα μαγνήτη μηχανής στο πρόγραμμα προσομοίωσης FEMM για συνήθη ανάλυση. Δεξιά ο είναι ο ίδιος μαγνήτης της μηχανής στο ίδιο πρόγραμμα προσομοίωσης, για ανάλυση της απομαγνήτισης αποτελούμενος από επιμέρους κομμάτια.

Τα κύρια μοντέλα επαναφοράς των σημείων του πλέγματος μαγνήτη στο εσωτερικό της καμπύλης B-H είναι: Το περιοριστικό μοντέλο, το γραμμικό μοντέλο και το εκθετικό μοντέλο. Τα τρία αυτά μοντέλα διαφέρουν, ως προς την ικανότητα να περιγράψουν τη συμπεριφορά του μαγνήτη και την υπολογιστική ισχύ που απαιτούν.

Το περιοριστικό μοντέλο δίνει μία αρχική και γρήγορη εκτίμηση της απομαγνήτισης των μαγνητών. Το μοντέλο αρχικά θεωρεί μηδενική απομαγνήτιση των μαγνητών και υπολογίζει με βάση αυτό το δεδομένο την τιμή του πεδίου στο πλέγμα. Στη συνέχεια, εκτελεί έλεγχο στο πλέγμα των μαγνητών ως προς τη τιμή του πεδίου B στον μαλακό άξονα του μαγνήτη. Την τιμή αυτή του πεδίου, τη συγκρίνει με βάση την τιμή του γονάτου της καμπύλης B-H ( $B_{Threshold}$ ) του υπό μελέτη μαγνήτη. Σε περίπτωση που τα περισσότερα στοιχεία του πλέγματος μέσα στο εκάστοτε κομμάτι του μαγνήτη είναι εκτός της τιμής γονάτου, το κομμάτι αυτό απομαγνητίζεται πλήρως θέτοντας την τιμή  $H_c$  μηδενική. Στην συνέχεια υπολογίζεται εκ νέου το πεδίο στην μηχανή και

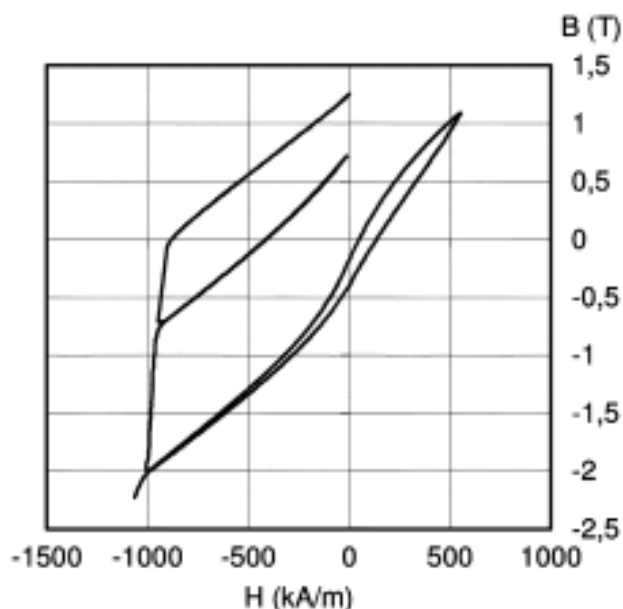
επαναλαμβάνεται ο παραπάνω έλεγχος, έως ότου να βρεθεί επανάληψη η οποία να μην μεταβάλει καμία τιμή  $H_c$ . Το διάγραμμα ροής της παραπάνω μεθόδου είναι:



Σχ.2.4.3.2 Διάγραμμα ροής του περιοριστικού μοντέλου υπολογισμού απομαγνήτισης.

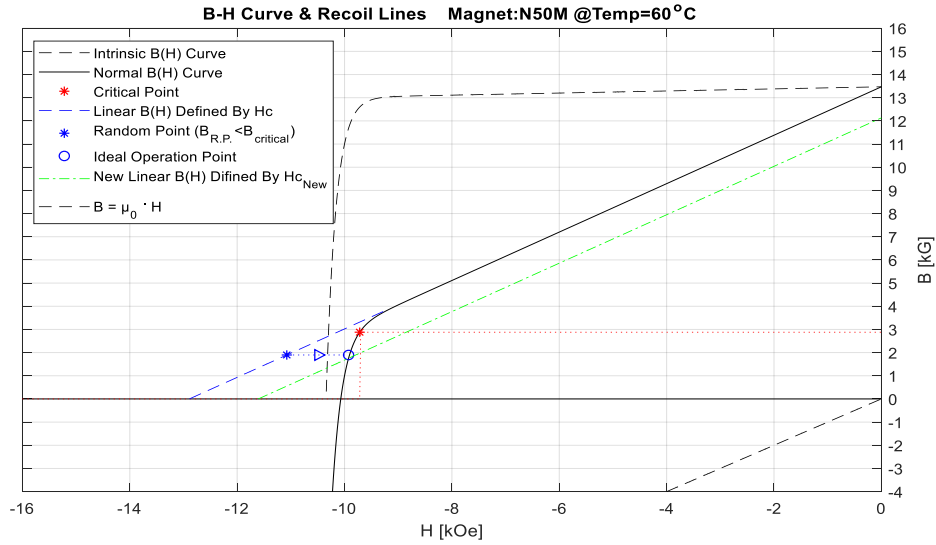
Η μέθοδος αυτή δεν είναι υψηλής ακρίβειας αφού δεν περιγράφει πλήρως τη συμπεριφορά της απομαγνήτισης ούτε ως προς την συμπεριφορά κατά τη διάρκεια που υφίσταται το εξωτερικό πεδίο και ούτε ως προς την επαναφορά των σημείων της καμπύλης όταν αποχωρίσει το πεδίο αυτό. Ωστόσο, δίνει ασφαλή αποτελέσματα ως προς την αντοχή στην απομαγνήτιση. Η πρώτη απόκλιση της μεθόδου στη συμπεριφορά κατά τη διάρκεια του πεδίου είναι εμφανής, επειδή υπάρχει μηδενισμός του  $H_c$  πεδίου του μαγνήτη ενώ στην πράξη το πεδίο  $H$  έχει τιμή κοντά σε αυτή του

γονάτου. Η δεύτερη απόκλιση οφείλεται στην ύπαρξη δευτερευόντων βρόχων (minor loops) στην καμπύλη B-H κατά την εφαρμογή - αποχώρηση του ισχυρού εξωτερικού πεδίου και την ελαφριά μεταβολή στην κλίση που έχει η καμπύλη μερικής απομαγνήτισης B-H όσο πλησιάζει κανείς στον άξονα B. Η κλίση και η ύπαρξη δευτερευόντων βρόχων φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.

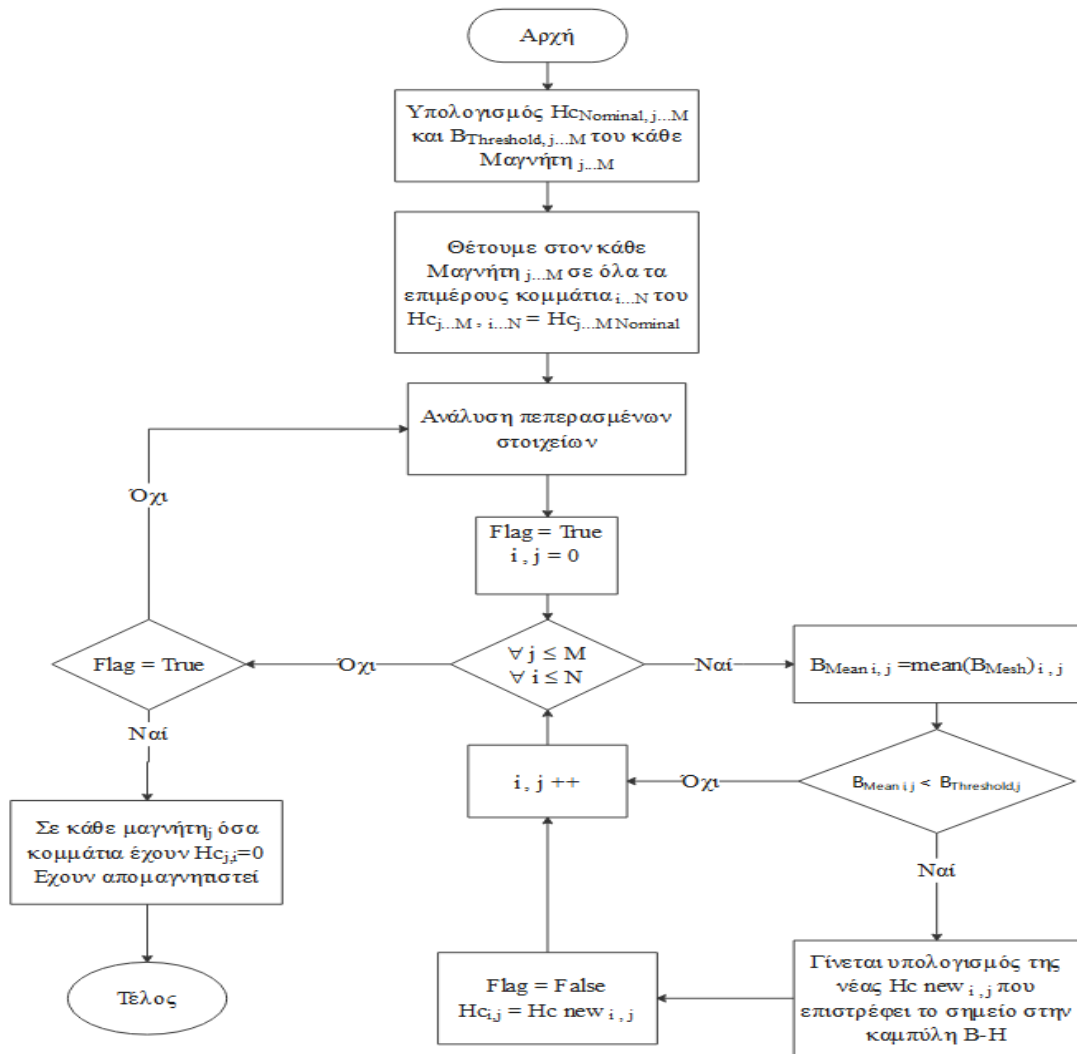


*Σχ.2.4.3.3 Μια τυπική συμπεριφορά απομαγνήτισης για μαγνήτες NdFeB. Φαίνονται τα φαινόμενα των δευτερευόντων βρόχων και της ελαφριάς μεταβλητής κλίσης, κοντά στον B άξονα, που διαθέτει η καμπύλη όταν αποχωρεί το εξωτερικό πεδίο. Η εικόνα αυτή είναι μέρος της δημοσίευσης [12].*

Το γραμμικό μοντέλο αποδίδει πιο ρεαλιστική συμπεριφορά της απομαγνήτισης στην προσομοίωση. Η διαδικασία υλοποίησης της μεθόδου αυτής, είναι ίδια με την περιοριστική μέθοδο, με τη διαφορά ότι η τιμή  $H_c$  του κάθε κομματιού, όταν αυτό είναι εκτός της BH καμπύλης, δεν γίνεται απευθείας μηδέν αλλά λαμβάνει την τιμή  $H_c$  που χρειάζεται ώστε να περιγραφεί η απομαγνητισμένη πλέον καμπύλη B-H. Ωστόσο καταναλώνει μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ στην εύρεση της τελικής τιμής των επιμέρους τιμών  $H_c$  σε κάθε κομμάτι του μαγνήτη, συγκριτικά πάντα με την περιοριστική μέθοδο. Όταν μειώνεται το εξωτερικό πεδίο και τα σημεία του μαγνήτη βρίσκονται σε λειτουργικές καταστάσεις κοντά στον άξονα B, η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να μεταβάλει την τιμή του 'μ' και συνεπώς δημιουργούνται ανακρίβειες υπολογισμών. Ακόμη, προβλήματα σχετικά με την ακρίβεια δημιουργεί και η χρήση της μεθόδου όταν το εξωτερικό πεδίο είναι ήδη μεγάλο. Το γεγονός του μεγάλου πεδίου επηρεάζει την μέθοδο, καθώς σημεία του μαγνήτη εξαρχής μειώνουν πολύ την  $H_c$  τους, στην πρώτη επανάληψη, ενώ δεν θα έπρεπε, συνεπώς η επαναφορά όλων των σημείων στην καμπύλη γίνεται φαινομενικά. Λίγα δηλαδή σημεία του μαγνήτη απομαγνητίζονται έντονα, επειδή μειώνουν απότομα την τιμή του  $H_c$  τους, ενώ στην πραγματικότητα πολλά σημεία μειώνουν από λίγο την τιμή της εκάστοτε  $H_c$  τους. Για να αποφευχθεί το φαινόμενο αυτό, αναγκαίο είναι να υπάρχει σταδιακή αύξηση του εξωτερικού πεδίου προσομοίωσης. Η μέθοδος αυτή λαμβάνει υπόψιν της, τις κύριες ιδιότητες μαγνητικών υλικών και συνεπώς δίνει τη δυνατότητα να προσδιορίζει κανείς την αντοχή που διαθέτει η προς σχεδίαση μηχανή στο φαινόμενο της απομαγνήτισης. Μία εικόνα που περιγράφει τον υπολογισμό αυτής της νέας τιμής  $H_c$  δίνεται παρακάτω.

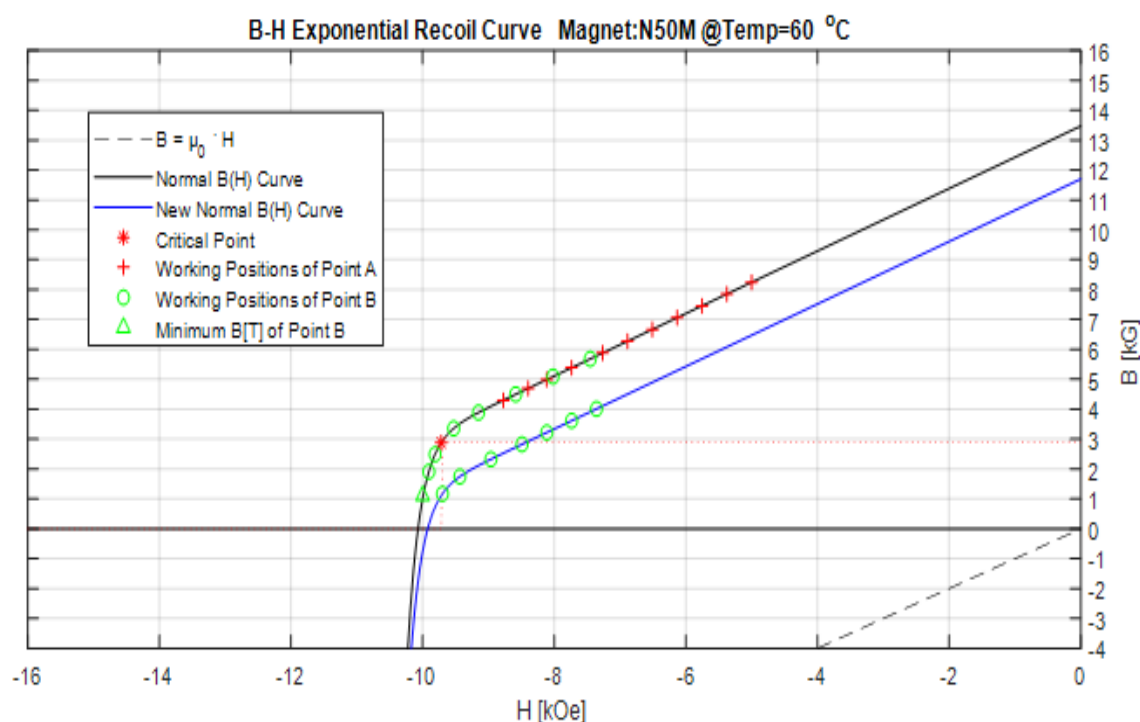


Σχ.2.4.3.4 Η γραμμική μέθοδος επαναφοράς σημείων στην καμπύλη B-H. Η παραπάνω καμπύλη είναι από τον μαγνήτη Νεοδυμίου Ν50Μ σε θερμοκρασίες 60°C. Το τυχαίο σημείο βρίσκεται εκτός της καμπύλης B-H ενώ μετακινώντας την γραμμή λειτουργίας B-H βρίσκεται και πάλι στην καμπύλη B-H. Με αυτή τη μέθοδο η λειτουργική του καμπύλη έχει μόνιμα αλλάξει.



Σχ.2.4.3.5 Διάγραμμα ροής του γραμμικού μοντέλου υπολογισμού απομαγνήτισης.

Το εκθετικό μοντέλο διαφέρει σε σχέση με τα άλλα δύο, εφόσον η συνάρτηση η οποία περιγράφει την συμπεριφορά της απομαγνήτισης είναι εκθετική. Το μοντέλο αυτό δεν μπορεί με ευκολία να ενταχθεί στο FEMM όμως μπορεί να γίνει αριθμητικός υπολογισμός μέσω άλλων προγραμμάτων ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (πχ. το 'Crank-Nicholson time-stepping analysis'). Η πολυπλοκότητα της μεθόδου την καθιστά την πιο αργή στην σύγκλιση και συνάμα την πιο ακριβείας επειδή τα αποτελέσματα υπολογίζονται εξ αρχής με βάση το εκθετικό μοντέλο που περιγράψαμε παραπάνω, (2.21) μεταβάλλοντας σε κάθε σημείο την  $B_r$  ανάλογα με το πόσο βρέθηκε το εκάστοτε σημείο στον κορεσμό. Η ακρίβεια αυτή ωστόσο δεν διαφέρει πολύ από την ακρίβεια που προσδίδει το γραμμικό μοντέλο. Σε αυτή τη περίπτωση η μετατόπιση της εκθετικής καμπύλης γίνεται με βάση την θέση που βρέθηκε το κάθε σημείο στον κορεσμό όπως και στο γραμμικό μοντέλο. Τέλος, το εκθετικό μοντέλο έχει γραμμική συμπεριφορά μακριά από τον κορεσμό. Συνεπώς, τα οφέλη είναι σχεδόν ίδια με αυτά του γραμμικού μοντέλου. Γενικά, σ' αυτή τη μέθοδο τα σημεία δεν χρειάζονται επαναφορά στην καμπύλη B-H αφού η επαναληπτική μέθοδος λειτουργεί με βάση την εκθετική καμπύλη. Παρακάτω δίνεται η συμπεριφορά δύο σημείων μαγνήτη πάνω στο επίπεδο B-H σε κατάσταση υψηλής φόρτισης και αποφόρτισης. Οι καμπύλες B-H των σημείων περιγράφονται σύμφωνα με τις εκθετικές καμπύλες.



Σχ.2.4.3.6 Καμπύλες B-H εκθετικού μοντέλου που περιγράφουν την συμπεριφορά δύο σημείων του μαγνήτη όταν το εξωτερικό αντιπαράλληλο πεδίο μεγαλώνει και στην συνέχεια μικραίνει.

Τα παραπάνω μοντέλα συμπληρώνονται με άλλα μοντέλα υστέρησης με ή χωρίς εξάρτηση από προηγούμενες φορτίσεις. Μια συγκριτική ανάλυση των μεθόδων - μοντέλων απομαγνήτισης φαίνεται και στη δημοσίευση [12].

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται με αλγοριθμικό τρόπο το περιοριστικό μοντέλο απομαγνήτισης επειδή δίνει μια γρήγορη και ασφαλή από πλευράς κινδύνου απομαγνήτισης ανάλυση.

## 2.5 Η ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΜΗΧΑΝΗ ΜΟΝΙΜΩΝ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΣΕ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ

Η λειτουργία του κινητήρα μονίμων μαγνητών γίνεται από αντιστροφέα ο οποίος χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά ισχύος για την παραγωγή της κατάλληλης τάσης τροφοδοσίας.

Τα σφάλματα ελέγχου του αντιστροφέα είναι σημαντικά και μπορούν να προκαλέσουν ρεύματα που προκαλούν αντιπαράλληλο πεδίο στους μαγνήτες. Τα ρεύματα αυτά δεν είναι ιδιαίτερα ισχυρά όπως αυτά των βραχυκυκλωμάτων στην μηχανή αφού τα ηλεκτρονικά ισχύος είναι πολύ ευαίσθητα και προφυλάσσονται άμεσα από ειδικές ασφάλειες. Ο μεγάλος κίνδυνος λοιπόν βρίσκεται στα σφάλματα που συμβαίνουν μετά τον αντιστροφέα και κυρίως στους ακροδέκτες της μηχανής. Το πιο ισχυρό από αυτά είναι το τριφασικό βραχυκύκλωμα δηλαδή όταν οι τρεις φάσεις ενωθούν μεταξύ τους. Στην περίπτωση αυτή, ο αντιστροφέας σταματά άμεσα να τροφοδοτεί την μηχανή με ρεύμα ενώ η μηχανή ακαριαία μετατρέπεται σε γεννήτρια και τροφοδοτεί το σημείο του σφάλματος με ενέργεια η οποία είναι συσσωρευμένη στην αδράνεια της κίνησης του αυτοκινήτου και του δρομέα. Η κατανάλωση της ενέργειας αυτής, γίνεται σε τριβές και ωμικές απώλειες που αυξάνουν έντονα την θερμοκρασία του κινητήρα.

Σημαντικό είναι συνεπώς, σε μία μηχανή να γίνεται ανάλυση της αντοχής της σε φαινόμενα απομαγνήτισης για μία μικρή τιμή του πεδίου (αντιπροσωπευτική του σφάλματος αντιστροφέα) και για μία μεγάλη τιμή του πεδίου (αντιπροσωπευτική του τριφασικού βραχυκυκλώματος) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας που ενδέχεται να βρίσκονται οι μαγνήτες.

Η ανάλυση των μεγεθών της μηχανής στο τριφασικό βραχυκύκλωμα γίνεται με τις σχέσεις (2.2),(2.3),(2.4) και (2.5). Στην συνέχεια, οι σχέσεις (2.6) και (2.7) υποθέτουν ανεξαρτησία των μεγεθών  $L_d$  και  $L_q$  με τον χρόνο και συνεπώς δεν μπορούν να γραφούν με την ίδια μορφή.

$$u_d = R i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_r \lambda_q \quad (2.2)$$

$$u_q = R i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_r \lambda_d \quad (2.3)$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{Mag} \quad (2.4)$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (2.5)$$

Οι τελικές σχέσεις δίνονται από τον συνδυασμό των παραπάνω:

$$u_d = R i_d + (i_d \cdot \frac{dL_d}{di_d} + L_d) \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \quad (2.28)$$

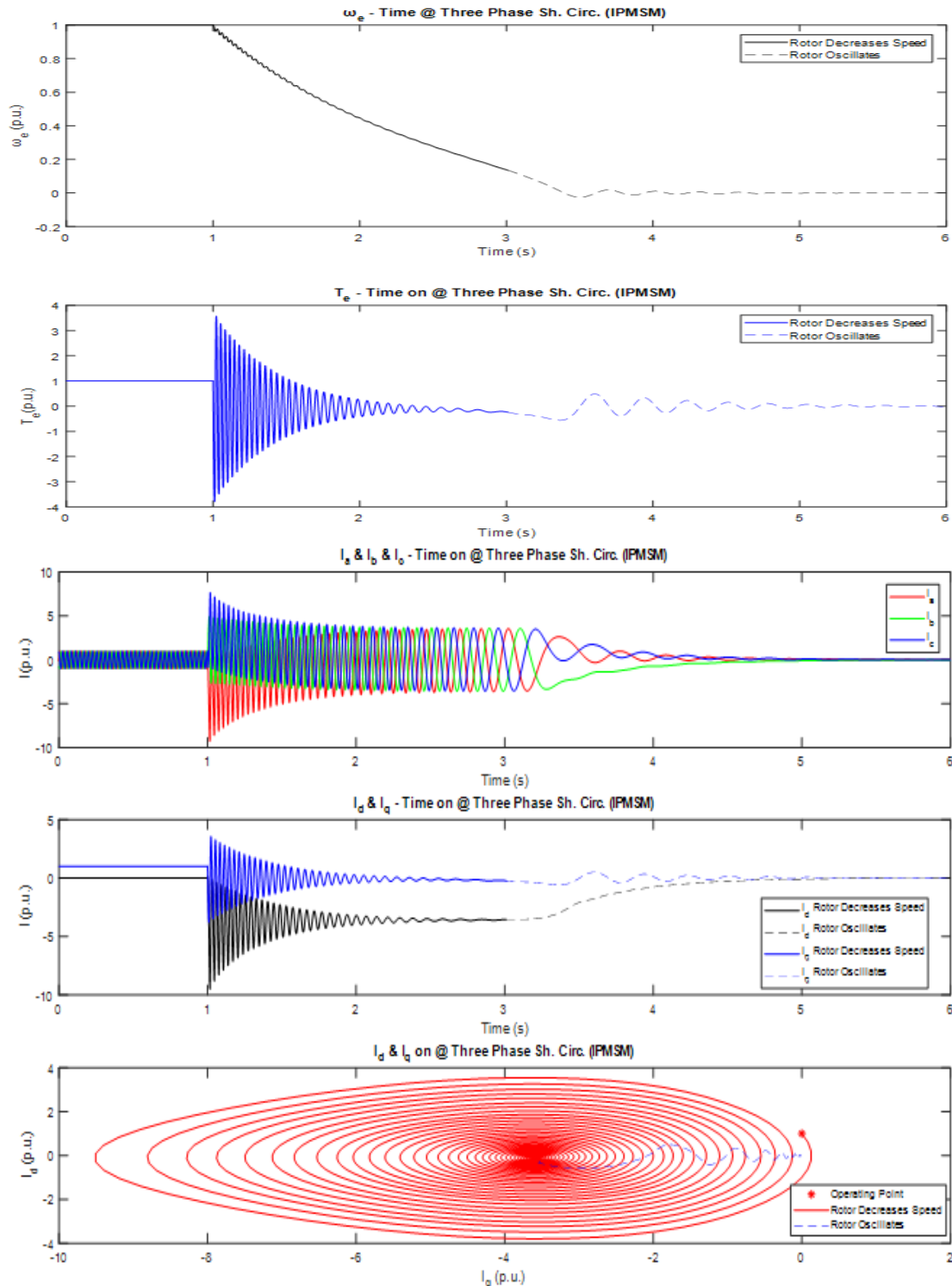
$$u_q - \omega_r \lambda_{Mag} = R i_q + (i_q \cdot \frac{dL_q}{di_q} + L_q) \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d \quad (2.29)$$

Ακόμα η σύνδεση των σχέσεων με τα μηχανικά χαρακτηριστικά γίνεται με τις παρακάτω σχέσεις:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} [(L_d - L_q) \cdot i_d i_q + \lambda_{Mag} i_q] \quad (2.8)$$

$$T_e - T_L = J \cdot \frac{2}{P} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} + B \frac{2}{P} \omega_r \quad (2.30)$$

Οι εξαρτήσεις των  $L_d$  και  $L_q$  με τα ρεύματα  $i_d$  και  $i_q$  μπορούν να βρεθούν με προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων. Το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων (2.28), (2.29) (2.30) που συνδέονται με τη βοήθεια της (2.8) συνθέτουν την λειτουργία της μηχανής σε συνθήκες τριφασικού βραχυκυκλώματος όταν το  $U_d=U_q=0$ . Πιο κάτω λύνεται το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων που σχηματίστηκε για μηχανή εσωτερικών μαγνητών.



Σχ.2.5.1 Ανάλυση ρευμάτων στο πλαίσιο  $d-q$  κατά τη διάρκεια βραχυκυκλώματος τριών φάσεων στους ακροδέκτες της μηχανής, όταν αρχικά η γωνία ρευμάτων ήταν  $90^\circ$  ηλ. Μοίρες ( $I_q=I_N$ ,  $I_d=0$ ). Πληροφορίες σχετικές με αυτές τις γραφικές παραστάσεις δίνονται σε παράρτημα στο τέλος της εργασίας.



Παρατηρούμε λοιπόν πως η γωνία του ρεύματος στο επίπεδο d q που έχει αρχικά η μηχανή, μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος, ενώ ταυτόχρονα το ρεύμα στον άξονα d λαμβάνει πολύ αρνητικές τιμές, με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος ανάπτυξης έντονου πεδίου αντιπαράλληλο στον μαγνήτη που οδηγεί στην απομαγνήτιση.

Η ανάλυση του τριφασικού βραχυκυκλώματος για την εύρεση προσεγγιστικών ενδεικτικών τιμών, που δεν απαιτούν την πλήρη επίλυση των συστημάτων συνήθη διαφορικών εξισώσεων, μπορεί να γίνει και αναλυτικά. Πιο κάτω δίνονται οι αντίστοιχοι τύποι που υπολογίζουν ελάχιστο ρεύμα d και q άξονα, την επιβραδύνουσα ροπή, την μέγιστη τιμή της ροπής, καθώς και η ταχύτητα που αυτή επιτυγχάνεται.

$$I_{d,shc} = -\frac{\omega^2 \cdot L_q \cdot \lambda_{Mag}}{R^2 + \omega^2 \cdot L_d \cdot L_q} \quad (2.31)$$

$$I_{q,shc} = -\frac{\omega \cdot \lambda_{Mag} \cdot R}{R^2 + \omega^2 \cdot L_d \cdot L_q} \quad (2.32)$$

$$I_{d,min} = -\frac{\lambda_{Mag}}{L_d} - \sqrt{\left(I_{d0} + \frac{\lambda_{Mag}}{L_d}\right)^2 + \left(\frac{L_q}{L_d} \cdot I_{q0}\right)^2} \quad (2.33)$$

$$T_{Brk} = -\frac{3}{2} \cdot p \cdot R \cdot \lambda_{Mag}^2 \cdot \omega \cdot \frac{R^2 + \omega^2 \cdot L_q^2}{(R^2 + \omega^2 \cdot L_d \cdot L_q)^2} \quad (2.34)$$

$$I_{shc} = \frac{\sqrt{(\omega^2 \cdot L_q \cdot \lambda_{Mag})^2 + (\omega \cdot R \cdot \lambda_{Mag})^2}}{R^2 + \omega^2 \cdot L_d \cdot L_q} \quad (2.35)$$

$$\xi = \frac{L_q}{L_d} \quad (2.36)$$

$$\chi = \frac{1}{2} \cdot \left[3 \cdot (\xi - 1) + \sqrt{9 \cdot (\xi - 1)^2 + 4 \cdot \xi}\right] \quad (2.37)$$

$$f(\xi) = \sqrt{\chi} \cdot \frac{1 + \chi}{\left(1 + \frac{\chi}{\xi}\right)^2} \quad (2.38)$$

$$\omega^* = \frac{R}{L_q} \cdot \sqrt{\chi} \quad (2.39)$$

$$T^*_{Brk} = -\frac{3}{2} \cdot p \cdot \frac{\lambda_{Mag}^2}{L_q} \cdot f(\xi) \quad (2.40)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να δώσουν μία γρήγορη εικόνα σχετικά με τη συμπεριφορά της μηχανής σε τριφασικό βραχυκύκλωμα, στην περίπτωση που τα βασικά μεγέθη της, όπως οι ονομαστικές της τιμές, οι αυτεπαγωγές και οι αντιστάσεις είναι γνωστά. Συνήθως, αυτό στην πράξη γίνεται ανάστροφα, δηλαδή οι ανάγκες για μείωση του ρεύματος βραχυκύκλωσης ή η οριοθέτηση της μέγιστης επιβραδύνουσας ροπής, παρέχουν στην σχεδίαση των μηχανών, όρια που αφορούν κυρίως την μαγνητική ροή μαγνήτη ( $\lambda_{Mag}$ ) και τον λόγο εκτυπότητας ( $\xi$ ).

Η σημαντικότητα της επιβραδύνουσας ροπής έγκειται, στη δημιουργία κοπτοτικών φορτίσεων στον άξονα του δρομέα της μηχανής, εξαιτίας της ταλαντωτικής της συμπεριφοράς. Συνεπώς, στην επιλογή του άξονα αναγκαίο είναι να λαμβάνεται υπόψιν.

Σε γενικές γραμμές κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος τριών φάσεων η μέγιστη τιμή ρεύματος μίας μηχανής δεν ξεπερνά την δεκαπλάσια τιμή του ονομαστικού. Για το λόγω αυτό θεωρήθηκε για την παρούσα διπλωματική εργασία, ο έλεγχος της απομαγνήτισης να γίνεται με μία μικρή και μία μεγάλη τιμή ρεύματος. Ως μικρή τιμή ρεύματος, σύμφωνα με τα ευαίσθητα ηλεκτρονικά ισχύος, επιλέγεται η 1.5 φορές της ονομαστικής τιμής ρεύματος της μηχανής. Αντίστοιχα ως μεγάλη τιμή ρεύματος επιλέγεται η 7 φορές της ονομαστικής τιμής ρεύματος της μηχανής.

Η χρονική ανάλυση των βραχυκυκλωμάτων της μηχανής μπορεί και αυτή να γίνει με αναλυτικά εργαλεία υπολογίζοντας υπομεταβατικές και μεταβατικές αντιδράσεις και χρόνους σύμφωνα με την κλασική μέθοδο ανάλυσης. Γενικά, η μέθοδος αυτή δίνει και τη δυνατότητα ανάλυσης μηχανών με τυλίγματα απόσβεσης στους πόλους. Οι μαθηματικοί τύποι της μεθόδου ως εξάρτηση του χρόνου δίνονται παρακάτω:

$$i_d(t) = -\omega\lambda_{Mag} \left[ \frac{1}{X_d} + \left( \frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left( \frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] + \frac{\omega\lambda_{Mag}}{X''_d} e^{-a \cdot t} \cos(\omega t) \quad (2.41)$$

$$i_q(t) = \frac{\omega\lambda_{Mag}}{X''_q} e^{-a \cdot t} \sin(\omega t) \quad (2.42)$$

Η ανάλυση της επίδρασης των βραχυκυκλωμάτων αποτελεί βασικό μέλημα για την οριστικοποίηση της σχεδίασης των μηχανών. Μάλιστα, η θέση που διακατέχει ο υπό μελέτη κινητήρας στην εφαρμογή που χρησιμοποιείται, καθορίζει την σημαντικότητα της εύρωστης λειτουργίας του. Για παράδειγμα, κινητήρες καιρίων υποσυστημάτων αεροπορικής τεχνολογίας δεν μπορούν να εκλείψουν λόγω σφάλματος. Μια τέτοια ανάλυση για κινητήρα υποβοήθησης ηλεκτρικού τιμονιού γίνεται στην δημοσίευση [16].

## 2.6 ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

Η ηλεκτρομαγνητική ανάλυση της μηχανής είναι το κύριο πρόβλημα που ο εκάστοτε σχεδιαστής έχει να επιλύσει με σκοπό να πετύχει την ικανότητα ροπής στην ταχύτητα που την επιθυμεί. Μέσω της ηλεκτρομαγνητικής σχεδίασης ακόμα μπορεί να γνωρίζει και την ακριβή μορφή της πίσω ηλεκτρεγερτικής δύναμης (Back EMF), το αρμονικό περιεχόμενο της ροπής, τη μορφή του πεδίου στο διάκενο, τις απώλειες ηλεκτρικής φύσεως ακόμα και την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα της μηχανής. Ωστόσο, δεν μπορεί να γνωρίζει αν η μηχανή που σχεδιάζει μπορεί να αντέξει της μηχανικές φορτίσεις και αν μπορεί να διαχειρίζεται την αύξηση της θερμοκρασίας της. Για τον λόγο αυτό η θερμική και η μηχανική ανάλυση είναι καθοριστικής σημασίας και όταν τουλάχιστον μια εκ των δύο αποτυγχάνει, η μηχανή δεν μπορεί να κατασκευαστεί.

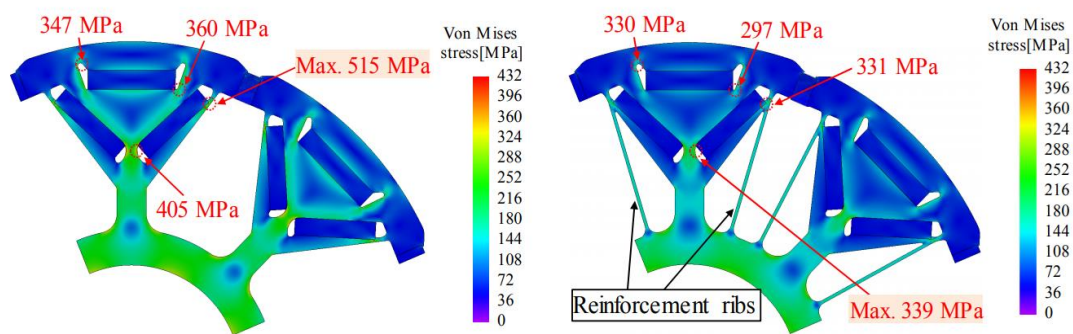
Η μηχανική ανάλυση γίνεται όπως και η ηλεκτρομαγνητική μέσω της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων, μιας και οι χρησιμοποιούμενες γεωμετρίες είναι πολύσύνθετες. Στην μηχανική ανάλυση της μηχανής, επιτυγχάνεται ανάλυση των καταπονήσεων της σε κάθε σημείο της και για κάθε σημείο λειτουργίας της. Στη συνέχεια ελέγχεται αν οι καταπονήσεις αυτές είναι εντός των ορίων αντοχής των υλικών και εάν είναι απαραίτητη η ύπαρξη περαιτέρω στηρικτικών βοηθημάτων (ribs). Όταν η μηχανική ανάλυση τελειώσει και η μηχανή δεν κινδυνεύει να καταστραφεί, ελέγχεται και η θερμική της ανάλυση.

Η Θερμική ανάλυση συνήθως πραγματοποιείται από ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα (TLCM) πολύ λεπτομερή που δίνουν μια εξέχουσα υπολογιστική ταχύτητα, ενώ δεν υστερούν πολύ σε ακρίβεια σε σχέση με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEA).

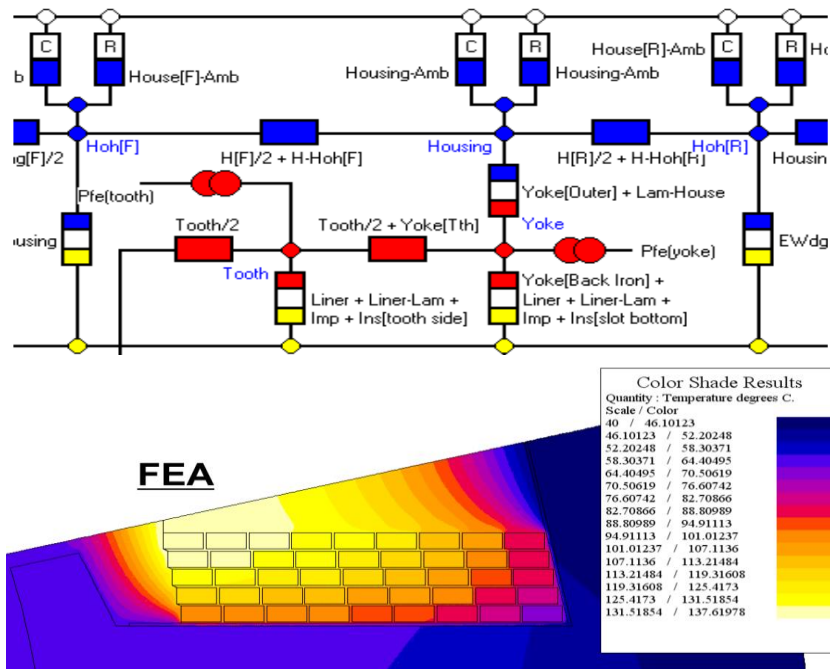
Ωστόσο για να γίνει μια ολοκληρωτική θερμική ανάλυση και η μηχανή να μπορέσει να κατασκευαστεί, δεν είναι περιττό να γίνει μια τρισδιάστατη ανάλυση των θερμικών φαινομένων συμπεριλαμβάνοντας το σύστημα ψύξης (CFD), δηλαδή επιλύοντας και τις εξισώσεις των ρευστών. Τα συστήματα ψύξης που χρησιμοποιούνται στις ηλεκτρικές μηχανές ποικίλουν και επιλέγονται κυρίως με βάση την πυκνότητα ρεύματος που επικρατεί στο τύλιγμα της μηχανής. Μερικές τεχνολογίες ψύξης είναι: μη εξαναγκασμένου αέρα, εξαναγκασμένου αέρα, τεχνολογίες υδρόψυξης πχ. νερού, γλυκόζης, υγρού υδρογόνου κλπ.

Τέλος, όταν η μηχανική και η θερμική ανάλυση δώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, μια τελική ηλεκτρομαγνητική ανάλυση δίνει τα χαρακτηριστικά που η μηχανή αυτή έχει.

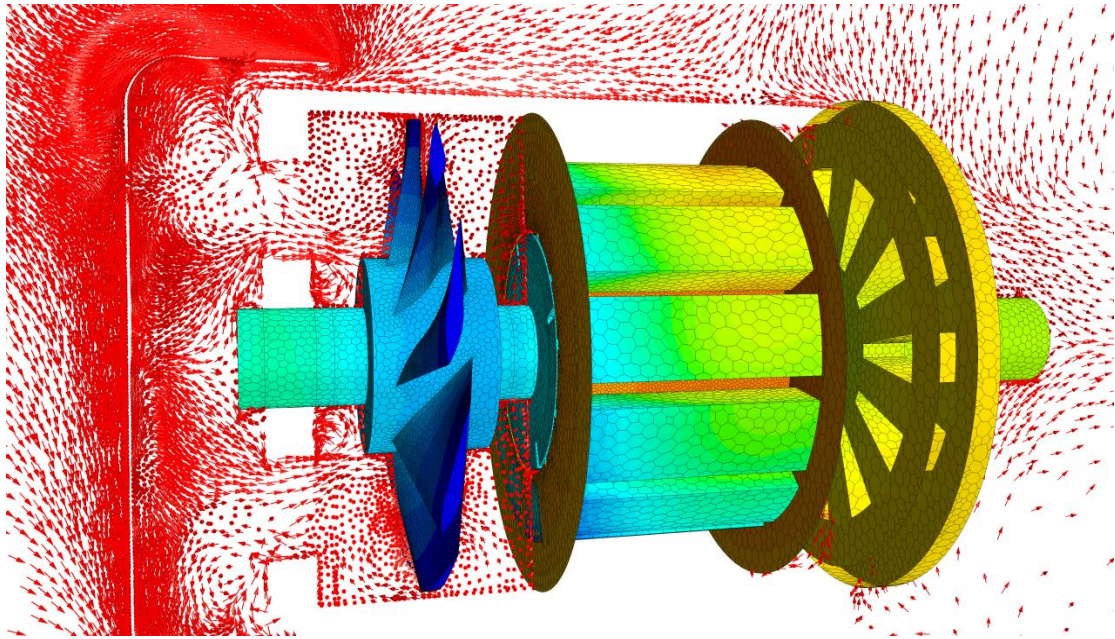
Παρακάτω δίνονται εικόνες πεπερασμένων στοιχείων για μηχανική ανάλυση, ισοδύναμων κυκλωμάτων για θερμική ανάλυση ενώ δίνεται και μια ανάλυση της ροής του συστήματος ψύξης.



Σχ.2.6.1 Μηχανική ανάλυση μηχανής πριν και μετά τη δημιουργία νέων προσθετων στηριγμάτων. Η εικόνα είναι μέρος της δημοσίευσης [18].



Σχ.2.6.2 Θερμική ανάλυση στην περιοχή του στάτη μηχανής. Στην πάνω εικόνα γίνεται μέσω των ισοδύναμων κυκλωμάτων (TLCM) ενώ κάτω μέσω πεπερασμένων στοιχείων (FEA). Οι εικόνες αποτελούν μέρος παρουσίασης του συνεδρίου ICEM σε διάλεξη του κ. David Staton [17].



Σχ.2.6.3 Ανάλυση ροής (CFD) του συστήματος ψύξης μιας ηλεκτρικής μηχανής. Η εικόνα αυτή βρέθηκε στην ιστοσελίδα: "siemens.com" (tinyurl.com/y4ug8pl8)

Η ανάγκη για τη συστηματική ανάλυση ηλεκτρομαγνητικών, μηχανικών, θερμικών φαινομένων στην σχεδίαση των κινητήρων γίνεται πλέον με συστηματικό τρόπο μέσω προγραμμάτων όπου με την σχεδίαση της γεωμετρίας εκτελείται οποιαδήποτε εκ των τριών ανάλυση επιλεγεί. Ακόμη, τέτοια προγράμματα παρέχουν και μεθόδους βελτιστοποίησης χαρακτηριστικών μέσω της ύπαρξης γενετικών αλγορίθμων. Η ανάπτυξη αυτή γίνεται συστηματικά από εταιρίες λογισμικών σύμφωνα με τις εξελίξεις αυτού του επιστημονικού τομέα. Τα μειονεκτήματα που δημιουργεί η χρήση τέτοιων προγραμμάτων, είναι πρωτίστως η μειωμένη ικανότητα τροποποίησης των μεθόδων που ήδη χρησιμοποιεί το εκάστοτε λογισμικό. Επιπλέον, η παραλληλοποίηση αλγορίθμων σε επεξεργαστικούς πυρήνες, είναι προκαθορισμένη και το πεδίο των μεταβλητών δεν σαρώνεται ολόκληρο (grid search) με ενδεχόμενες αποκλίσεις στην εύρεση του ολικού μεγίστου των αλγορίθμων βελτιστοποίησης.

Σε κάθε περίπτωση είναι αρκετά αξιόπιστη η μελέτη που παρέχεται από τέτοιου είδους προγράμματα. Η ανάλυση των μηχανών ωστόσο, οφείλει να γίνεται χωρίς τον περιορισμό δυνατοτήτων που οι ήδη υπάρχουσες υπηρεσίες προσφέρουν.

Η εξέλιξη των ήδη υπαρκτών αλγορίθμων ανάλυσης μηχανών και η προσθήκη νέων είναι πλέον καθημερινό φαινόμενο. Ο κυρίαρχος στόχος είναι να υπάρχει ολοένα και μικρότερη απόκλιση της προσομοίωσης και την πραγματικότητας, με όσο το δυνατόν μικρότερο χρόνο υπολογισμού και λιγότερη περιπλοκότητα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

#### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ:

Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται αναλυτικά ο σχεδιασμός του κινητήρα λαμβάνοντας υπόψη την εφαρμογή που πρόκειται να υλοποιηθεί. Η προκαταρκτική σχεδίαση του κινητήρα και οι σχεδιαστικές επιλογές που γίνονται για την ανάκληση αρχικών τιμών των βασικών διαστάσεων που θα έχει ο κινητήρας προσδιορίζονται στο κεφάλαιο αυτό. Ακόμη, παρατίθενται και οι περιορισμοί οι οποίοι θεωρήθηκαν απαραίτητοι, στον σκοπό της περαιτέρω εξέλιξης αυτής της διπλωματικής εργασίας κυρίως σε πρακτικό-πειραματικό επίπεδο.

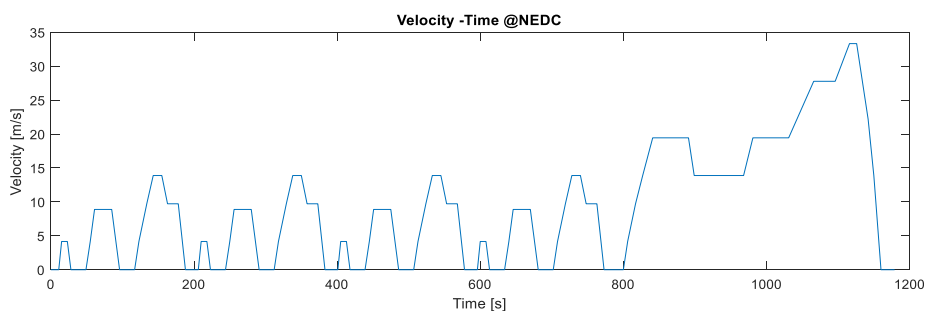
#### 3.2 ΜΕΛΕΤΗ ΚΥΚΛΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Η αρχή της μελέτης έγινε με βάση την χρήση του κινητήρα σε εφαρμογή ηλεκτροκίνησης. Για το λόγο, αυτό βρέθηκαν αρχικά οι οδηγικοί κύκλοι των οχημάτων σε ευρωπαϊκή κλίμακα στην κατηγορία Urban. Η μελέτη οδηγικών κύκλων, συνήθως γίνεται για τον υπολογισμό ρύπων πχ. διοξειδίου του άνθρακα. Πάρα ταύτα η χρησιμότητα τους στην διπλωματική αυτή εργασία, γίνεται για τον υπολογισμό των ονομαστικών μεγεθών του κινητήρα τα οποία είναι απαραίτητα να έχει, ώστε να μπορεί να ανταπεξέρχεται το όχημα στις περισσότερες περιστάσεις.

Ακόμη, με τον οδηγικό κύκλο μπορούμε να υπολογίσουμε την ολική απόδοση του οχήματος και την σημασία που έχει σε αυτή, η μορφή του χάρτη απόδοσης μιας μηχανής. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, στο πεδίο ροπής ( $T$ ) - γωνιακής ταχύτητας ( $\omega_r$ ) που έχει κάθε οδηγικός κύκλος δηλώνει την πιθανότητα που έχει η μηχανή να λειτουργεί στην εκάστοτε λειτουργική κατάσταση ( $T, \omega$ ). Αντίστοιχα ο χάρτης απόδοσης της μηχανής δίνει την απόδοση που έχει η μηχανή όταν λειτουργεί στην κατάσταση ( $T, \omega$ ). Συνδυάζοντας τα παραπάνω, έχουμε την ολική απόδοση του κινητήρα στον δοσμένο οδηγικό κύκλο. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, πως δεν είναι ικανοποιητικό να επιτυγχάνεται πολύ υψηλή απόδοση σε μικρή περιοχή λειτουργικών καταστάσεων, αλλά το ουσιαστικό είναι να υπάρχει όσο το δυνατόν υψηλότερη απόδοση στις πιο πιθανές λειτουργικές καταστάσεις.

Οι μηχανές μονίμων μαγνητών συνήθως επιτυγχάνουν πολύ υψηλές αποδόσεις σε σχετικά μικρή περιοχή λειτουργικών καταστάσεων. Αποτέλεσμα είναι ο αριθμός των πόλων της μηχανής και η σταθερή σχέση του κιβωτίου ταχυτήτων του οχήματος συχνά να αναλύονται μαζί με σκοπό την διεύρυνση της περιοχής αυτής.

Παρακάτω δίνεται ο οδηγικός κύκλος NEDC που ακολουθεί το όχημα σε μια μέση κατάσταση οδήγησης.



Σχ.3.2.1 Οδηγικός κύκλος NEDC

Οι οδηγικοί κύκλοι περιγράφουν την συμπεριφορά του αυτοκινήτου. Συνεπώς για να υπολογιστεί η ροπή του κινητήρα και η ταχύτητα του δρομέα σε κάθε μια από τις στιγμές που περιγράφει ο οδηγικός κύκλος, αναγκαίο είναι να αναλογιστούμε τις δυνάμεις που ασκούνται στο όχημα μέσω των τροχών, συνυπολογίζοντας τον λόγο μετάδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων.

Αρχικά η γωνιακή ταχύτητα των τροχών υπολογίζεται διαιρώντας την ταχύτητα του αυτοκινήτου με την ακτίνα τους. Εν συνεχεία για την ταχύτητα του δρομέα λαμβάνουμε υπόψιν τη σχέση του κιβωτίου.

$$\omega_{\text{Τροχών}} = \frac{v_{\text{Οχήματος}}}{R_{\text{Τροχών}}} \quad (3.1)$$

$$\omega_{\text{Δρομέα}} = \frac{\omega_{\text{Τροχών}}}{\lambda_{\text{GearRatio}}} \quad (3.2)$$

Η δύναμη που ασκούν οι τροχοί στο έδαφος δίνεται από τη σχέση:

$$F_{\text{Τροχών}} = m_{\text{Οχήματος}} \frac{dv_{\text{Οχήματος}}}{dt} + Bv_{\text{Οχήματος}} + \{F_{\text{Τριβών}}\} + \{F_{\text{Κλίσης Οδοστρώματος}}\} \quad (3.3)$$

Η δύναμη που επιφέρει το οδόστρωμα στο όχημα εξαιτίας της κλίσης του δεν εφαρμόζεται πάντα.

Η δύναμη που έχει γίνει προσπάθεια να περιγραφεί μέσω του  $B \cdot v$  εμπεριέχει και τετραγωνικές ή ακόμα και κυβικές εξαρτήσεις της ταχύτητας. Όμως και σε αυτή τη περίπτωση που η δύναμη αυτή έχει όντως γραμμική εξάρτηση με την ταχύτητα, η τιμή του  $B$  είναι άμεσα εξαρτώμενη από την αεροδυναμική και τον προσανατολισμό του οχήματος.

Η δύναμη των τριβών δεν είναι απόλυτα σταθερή. Για παράδειγμα οι τριβές των εδράσεων εμπεριέχουν εξάρτηση ακόμα και από το επίπεδο λίπανσης, και το Slip Ratio των ελαστικών με το έδαφος συνεχώς μεταβάλλεται επηρεάζοντας άμεσα την θερμοκρασία τους και κατά συνέπεια την επίδραση που έχουν στην δύναμη της τριβής.

Η τελική σχέση που δίνει την ροπή του κινητήρα είναι:

$$T_{\text{Κινητήρα}} = R_{\text{Τροχών}} \cdot F_{\text{Τροχών}} \cdot \lambda_{\text{GearRatio}} \quad (3.4)$$

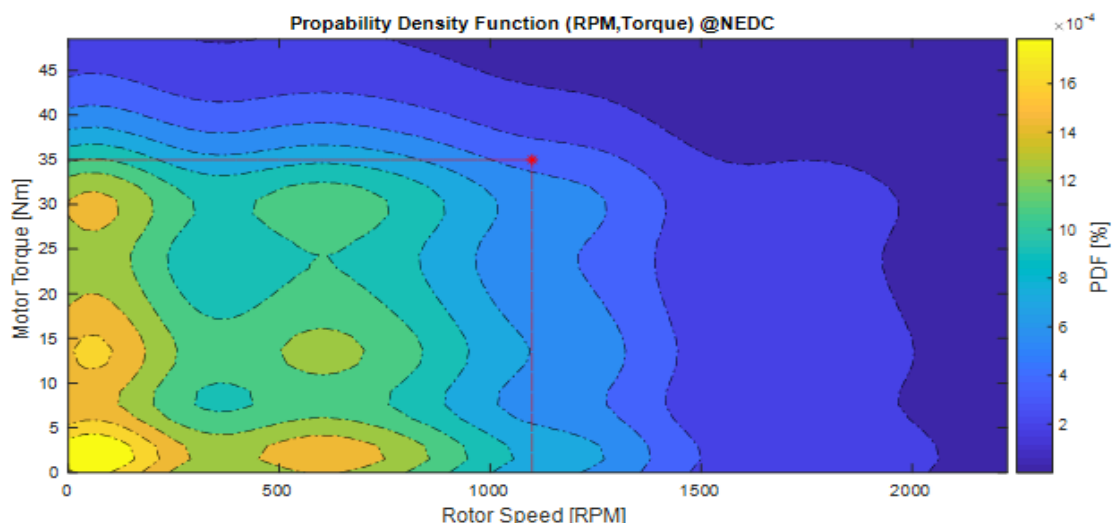
Παρατηρούμε πως όλα τα μεγέθη της (3.3) είναι στοχαστικά. Όμως, για να γίνει μια αρχική ανάλυση θεωρούμε ότι η τιμή της τριβής (= 20 N) είναι σταθερή όπως και η τιμή του  $B$  (= 10 N·s/m) ενώ για την κλίση του οδοστρώματος υποθέτουμε ότι κάθε στιγμή υπάρχει 10% πιθανότητα το όχημα να βρίσκεται σε ανηφόρα κλίσης 5%. Η μάζα του οχήματος μαζί με τη μάζα του οδηγού είναι 300 kg, συνήθη κιλά για αυτή τη κατηγορία οχημάτων, ενώ η τιμή του  $\lambda_{\text{GearRatio}}$  την θέτουμε στο 10:12. Παρακάτω δίνεται ο πίνακας παραδοχών που έχουν γίνει με σκοπό να εξαχθεί η απεικόνιση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας του NEDC.

Παραδοχές εξαγωγής Σ.Π.Π Οδηγικού κύκλου			
Οδηγικός κύκλος	NEDC	Μέση τιμή Τριβών	15 N
Ολικό βάρος οχήματος	300 kg	Ενδεικτική Τιμή του B	8 Ns/m
Ακτίνα Τροχού	18 cm	Μέση Κλίση οδοστρώματος	5%
Λόγος Κιβωτίου	10:12	Πιθανότητα Ύπαρξης κλίσης	10%

Σχ.3.2.2 Πίνακας παραδοχών εξαγωγής ΣΠΠ οδηγικού κύκλου.



Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του NEDC στο επίπεδο (T,ω) έχει την παρακάτω μορφή:



Σχ.3.2.3 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του ηλεκτρικού κινητήρα για όχημα που εκτελεί τον οδηγικό κύκλο NEDC. Ακόμη σημειώνονται τα ονομαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα με κόκκινο άστρο. Δίνεται ο κώδικας MATLAB σε παράρτημα στο τέλος της εργασίας.

Εν κατακλείδι, παρατηρούμε πως για το παραπάνω όχημα η μέγιστη απαίτηση ροπής είναι τα 55 N·m. Ενώ η μέση τιμή της ισχύος που παρέχει είναι στο σημείο (1100RPM, 35Nm) δηλαδή 4kW. Η ισχύς του κινητήρα δεν είναι απαραίτητο να επισκιάζει όλες τις δυνατές καταστάσεις που δίνει ο οδηγικός κύκλος αλλά να μπορεί να μην υπερφορτίζεται στις περισσότερες καταστάσεις. Για τον λόγο αυτό, στο όχημα των 300kg για μια τυπική χρήση σύμφωνα με τον NEDC επιλέγουμε κινητήρα 4kW με ονομαστική ροπή 35Nm.

### 3.3 ΘΕΩΡΙΑ ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

Με τον όρο προκαταρκτική σχεδίαση, εννοούμε την διαστασιολόγηση των βασικών μεγεθών της μηχανής ώστε να μπορεί ο σχεδιαστής να έχει μια αρχική ιδέα για την τάξη μεγέθους των διαστάσεων του κινητήρα. Η ακρίβεια των αναλυτικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τον σκοπό αυτό, προκύπτει από την διάθεση του σχεδιαστή να προσθέτει ολοένα και πιο σύνθετα μοντέλα ικανά να περιγράφουν τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του κινητήρα. Η εξέλιξη των αναλυτικών μεθόδων, έγινε κυρίως στον περασμένο αιώνα, όταν η λεπτομερής εξέταση μέσω αναλυτικών μεθόδων αποτελούσε και την οριστική σχεδίαση των κινητήρων. Σε κάθε περίπτωση οι αναλυτικές μέθοδοι έφθαναν αναπόφευκτα σε πάρα πολύ σύνθετα μοντέλα τα οποία εμπεριείχαν ακόμα και πειραματικές σταθερές, χωρίς να βελτιώνουν ιδιαίτερα την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Πλέον, η λεπτομερής διερεύνηση γίνεται από τον υπολογιστή με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων ενώ η αναλυτική μέθοδος χρησιμοποιείται στην απλή της μορφή για την πρόχειρη διαστασιολόγηση.

#### 3.3.1 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

Πρώτιστα, περιγράφονται οι τρόποι μαθηματικής περιγραφής των κυρίαρχων φαινομένων μιας ηλεκτρικής μηχανής. Με αυτό το τρόπο γίνεται ένας απλός αλλά πολύ ουσιαστικής σημασίας προσδιορισμός των αριθμητικών τιμών των μεγεθών πεδίου, διαστάσεων, ροής, τάσης. Οι μέθοδοι αυτοί θέτουν τη βάση της έννοιας των «αναμενόμενων αποτελεσμάτων». Συνεπώς, όταν τα αποτελέσματα άλλων μεθόδων είναι πολύ διαφορετικά από αυτά των αναλυτικών μεθόδων θεωρούνται λανθασμένα.

### 3.3.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ, ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ, ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

Η έννοια της ηλεκτρικής φόρτισης αναφέρεται κυρίως στον στάτη. Η ηλεκτρική φόρτιση προκαλείται από την παρουσία ρευμάτων στα τυλίγματα του στάτη. Τα ρεύματα αυτά συνθέτουν την ένταση του μαγνητικού πεδίου  $H$ . Η αναγωγή του πεδίου αυτού, από την παρουσία ρεύματος στις αύλακες του στάτη, στο διάκενο, μας δίνουν την ηλεκτρική φόρτιση της μηχανής ( $a_c$ ). Οι τυπικές τιμές της ηλεκτρικής φόρτισης στους ηλεκτροκινητήρες είναι από 15.000 ΑΕ/μ έως και 45.000 ΑΕ/μ.

$$a_c = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_\phi \cdot I_{rms}}{\pi \cdot D} \quad (3.5)$$

Με τον όρο μαγνητική φόρτιση της μηχανής εννοούμε κυρίως την μέση πυκνότητα μαγνητικής ροής του πεδίου  $B$  στο διάκενο της μηχανής εξαιτίας κυρίως της διέγερσης του δρομέα αλλά και της ηλεκτρικής φόρτισης. Η μαγνητική φόρτιση δηλώνει κυρίως την μέση ροή της μηχανής ανά μονάδα επιφάνειας στο διάκενο. Συνήθως η τιμή αυτή για ηλεκτρικές μηχανές κυμαίνεται από 0.6T έως 0.8T ενώ μπορεί σε εξελιγμένα υλικά να φθάσει ακόμα και τα 1T.

$$\bar{B} = \frac{P \cdot \Phi}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (3.6)$$

Ως μηχανική φόρτιση ορίζεται η έννοια των τάσεων που υπάρχουν στο διάκενο. Συχνά αναφέρεται και ως «Οριακή Τάση Διακένου» Δίνει μια αρχική εκτίμηση της μηχανικής καταπόνησης, λόγω φυγόκεντρων δυνάμεων, που δέχονται τα υλικά στήριξης της μηχανής. Ένα τυπικό όριο αυτής της τιμής είναι να μην ξεπερνά τους 10 tn/cm<sup>2</sup>.

$$\sigma_{max} = \frac{m \cdot \omega_r}{2 \cdot \pi \cdot L} \quad (3.7)$$

Στις παραπάνω σχέσεις τα μεγέθη συμβολίζουν:

$I_{rms}$ :	Ενεργός τιμή ρεύματος μηχανής	$D, L$ :	Διαστάσεις διακένου
$N_\phi$ :	Αριθμός εν σειρά ελιγμάτων ανά φάση	$P$ :	Αριθμός πόλων μηχανής
$\Phi$ :	Μαγνητική ροή ανά πόλο	$\omega_r, m$ :	Γωνιακή ταχύτητα και μάζα δρομέα

### 3.3.3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΑΥΛΑΚΑΣ ΚΑΙ ΟΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΑ ΘΕΡΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

Η ηλεκτρική φόρτιση συνδέεται άμεσα με τη τιμή των ρευμάτων στις αύλακες του στάτη. Η ύπαρξη αυτών των ρευμάτων προκαλεί την κύρια πηγή απωλειών της μηχανής, τις ωμικές απώλειες. Έτσι συντίθεται μια σύγκρουση ανάμεσα στην ενίσχυση της ηλεκτρικής φόρτισης ανά μονάδα εμβαδού και στην διατήρηση της χαμηλής θερμοκρασίας.

Στην εκάστοτε αύλακα του στάτη δεν μπορεί να υπάρχει εξολοκλήρου χαλκός αφού οι αγωγοί αναγκαίο είναι να είναι μονωμένοι. Ακόμη η τοποθέτηση των συνήθως κυλινδρικών αγωγών στο ιδιότροπο σχήμα του αυλακιού δεν μπορεί να γίνει με πολύ μεγάλη πληρότητα. Για το λόγο αυτό στην πιο απλή μορφή τοποθετείται ο δείκτης της πληρότητας αύλακας (Fill Factor) “ff”.

$$ff = \frac{A_{cu}}{A_{slot}} \quad (3.8)$$

Ακόμη το συνολικό ρεύμα αύλακας προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του ρεύματος του ενός αγωγού επί τον αριθμό των αγωγών που υπάρχουν σε αυτή. Έτσι ορίζεται η πυκνότητα ρεύματος χαλκού και πυκνότητα ρεύματος αύλακας.



$$J_{cu} = \frac{N_{slot} I_{rms|cable}}{A_{cu}} \quad \text{καί} \quad J_{slot} = \frac{N_{slot} I_{rms|cable}}{A_{slot}} \quad (3.9)$$

Η τιμή των συνολικά εν σειρά ελιγμάτων στην μηχανή εξαρτάται άμεσα από την τιμή των τυλιγμάτων στην αύλακα και την σύνδεση αυτών μεταξύ τους. Οι τρόποι σύνδεσης των τυλιγμάτων σε κάθε ζεύγος πόλων γίνεται κυρίως σε σειρά ενώ αποτελεί σχεδιαστική επιλογή ο τρόπος σύνδεσης των ελιγμάτων από ζεύγος πόλων σε άλλο ζεύγος πόλων (παράλληλη ή σε σειρά). Τα συνολικά εν σειρά ελίγματα ανά φάση σε συνάρτηση των ελιγμάτων της αύλακας:

$$\text{Σε σειρά:} \quad N_{\phi} = \frac{P}{2} \cdot q \cdot N_{slot} \quad (3.10)$$

$$\text{Παράλληλα:} \quad N_{\phi} = q \cdot N_{slot} \quad (3.11)$$

Στην περίπτωση της ύπαρξης διπλής (ν-οστής) στρώσης το «Slot» αφορά τα μεγέθη της στρώσης στην επιφάνεια της αύλακας. Συνήθως, οι αύλακες είναι διαχωρισμένες στην μέση και συνεπώς ο αριθμός των αγωγών ( $N_{slot}$ ) είναι σχεδόν ο μισός από αυτόν της ύπαρξης μίας στρώσης.

Οι σχέσεις τότε οφείλουν να πολλαπλασιαστούν με τον αριθμό των στρώσεων (layers):

$$\text{Σε σειρά:} \quad N_{\phi} = \frac{P}{2} \cdot q \cdot N_{slot} \cdot \text{Layers} \quad (3.12)$$

$$\text{Παράλληλα:} \quad N_{\phi} = q \cdot N_{slot} \cdot \text{Layers} \quad (3.13)$$

Στις παραπάνω σχέσεις το  $q$  είναι ο αριθμός των αυλάκων ανά πόλο. Αν  $Q$  τα συνολικά αυλάκια της μηχανής τότε:

$$q = \frac{Q}{m \cdot P} \quad (3.14)$$

$m$ : αριθμός φάσεων μηχανής

$P$ : αριθμός πόλων μηχανής

### 3.3.4 ΕΠΑΓΟΜΕΝΗ ΤΑΣΗ, ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΡΟΠΗ

Η κίνηση του δρομέα στο χρόνο προκαλεί μεταβολή ροής στα τυλίγματα του στάτη. Η ροή στον δρομέα εξαιτίας της ύπαρξης των μαγνητών είναι σταθερή για έναν παρατηρητή στον δρομέα της μηχανής. Για το λόγο αυτό το σημείο λειτουργίας στην καμπύλη  $B-H$  του σιδήρου του δρομέα δεν μετακινείται σύμφωνα με την θεμελιώδη συχνότητα λειτουργίας αλλά μόνο από αρμονικές πεδίου. Από την άλλη πλευρά ένας παρατηρητής στον στάτη, παρατηρεί την ροή του δρομέα να μεταβάλλεται με βάση τη συχνότητα περιστροφής του. Τα τυλίγματα του στάτη, υποβάλλονται σε αυτή την ημιτονική μεταβολή της ροής, όμως η συγκέντρωσή τους στις αύλακες και η γεωμετρία του δρομέα προκαλούν και επιπρόσθετες αρμονικές ροής. Η επίδραση στην ημιτονικότητα της ροής που προκαλεί το τύλιγμα του στάτη συνήθως περιγράφεται από τον συντελεστή τυλίγματος  $K_w$ . Η ροή στα τυλίγματα του στάτη δίνεται παρακάτω:

$$\Phi(t, \theta) = \sum_{\text{Harmonics}} [\Phi_{PM}(\theta) \cdot K_{w, Harm} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_{e, Harm} \cdot t)] \quad (3.15)$$

$$\Phi(t) \approx \Phi \cdot K_w \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_e) \quad (3.16)$$

Η  $\theta$  είναι μεταβλητή που δηλώνει τη κατανομή της μαγνητικής ροής του μαγνήτη στο χώρο.

Η πεπλεγμένη ροή και η RMS τιμή της επαγόμενης τάσης:

$$\lambda(t) = N_{\varphi} \cdot \Phi(t) \quad (3.17)$$

$$E_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{(T)} \left( -\frac{d\lambda(\tau)}{d\tau} \right)^2 dt} \quad (3.18)$$

$$E_{\text{rms}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot K_w \cdot \Phi \cdot f_e \cdot N_{\varphi} \quad (3.19)$$

Η φαινόμενη ηλεκτρική ισχύς που εισέρχεται σε μία μηχανή είναι το γινόμενο της τάσης του τυλίγματος κάθε φάσης επί το ρεύμα του τυλίγματος κάθε φάσης επί τον αριθμό των φάσεων. Συνεπώς,

$$S = 3 \cdot E_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}} \quad (3.20)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (3.6) στην (3.19) και τροποποιώντας κατάλληλα τη σχέση (3.5). Προκύπτει:

$$E_{\text{rms}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot K_w \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot \frac{\bar{B}}{P} \cdot f_e \cdot N_{\varphi} \quad (3.21)$$

$$I_{\text{rms}} = \frac{\pi \cdot D}{3 \cdot 2 \cdot N_{\varphi}} \cdot ac \quad (3.22)$$

Με τις σχέσεις (3.21) και (3.22) στην (3.20) έχουμε πως η ισχύς δίνεται με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ως εξής:

$$S = \left( \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\pi}{4 \cdot 2} \right) \cdot K_w \cdot D^2 \cdot L \cdot \bar{B} \cdot ac \cdot \left( 2\pi \cdot \frac{f_e}{P/2} \right) \quad (3.23)$$

$$S = \left( \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \cdot K_w \cdot D^2 \cdot L \cdot \bar{B} \cdot ac \cdot \omega_m \quad (3.24)$$

Σημαντικό είναι να σχολιαστεί πως η ηλεκτρική ισχύς μιας μηχανής ακτινικής ροής εξαρτάται από το τετράγωνο της διαμέτρου επί το μήκος της. Ακόμη, η ισχύς της μηχανής εξαρτάται άμεσα από την ηλεκτρική και μαγνητική φόρτιση που επιτυγχάνεται σε αυτή και από το είδος του τυλίγματος σύμφωνα με το  $K_w$ . Ωστόσο δεν διαθέτει εξάρτηση από το είδος της συνδεσμολογίας των τυλιγμάτων μεταξύ ζευγών πόλων, όμως, η συνδεσμολογία αυτή, πρακτικά καθορίζει το αν η μηχανή θα λειτουργεί με υψηλό ρεύμα και μικρή τάση ή το ανάστροφο. Τέλος, η ονομαστική ηλεκτρική ισχύς που σχεδιάζεται η μηχανή να αποδίδει, είναι γραμμική σε σχέση με την ονομαστική μηχανική ταχύτητα της.

Η ροπή που η μηχανή αποδίδει σύμφωνα με την σχέση (3.24) και την υπόθεση ύπαρξης απωλειών είναι:

$$T_{\text{em}} = \left( \pi \cdot \frac{D}{2} \right) \cdot \left( \eta \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot K_w \right) \cdot D \cdot L \cdot \bar{B} \cdot ac \quad (3.25)$$

Η δύναμη στο διάκενο συνεπώς είναι:

$$F_g = \left( \eta \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot K_w \right) \cdot \frac{1}{\mu_0} \cdot D \cdot L \cdot \bar{B} \cdot (\mu_0 \cdot ac) \quad (3.26)$$

Η σχέση (3.26) περιέχει κάποιες σταθερές οι οποίες συνολικά αποδίδουν συνήθως τιμή κοντά στην μονάδα. Για παράδειγμα αν απόδοση “ $\eta$ ” είναι 0.95 και ο συντελεστής τυλίγματος “ $K_w$ ” είναι 0.95 τότε έχουμε:  $0.95 \cdot 0.95 \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,0024$ .

Τελικά η δύναμη στο διάκενο μπορεί να γραφεί:

$$F_g = \frac{1}{\mu_0} \cdot D \cdot L \cdot \bar{B} \cdot (\mu_0 \cdot ac) \quad (3.27)$$

Η σχέση αυτή μπορεί να εξαχθεί και με βάση τον τανυστή του Maxwell. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιούμε την επιφάνεια του διακένου. Η επιφάνεια αυτή  $S_g$  είναι μια κυλινδρική επιφάνεια παράλληλη στο άξονα της μηχανής με ακτίνα  $D/2$ . Η ηλεκτρομαγνητική ροπή στη μηχανή δίνεται:

$$T_{em} = \oint_S \mathbf{r} \times \vec{\sigma} \cdot d\mathbf{S} = \iint_S \mathbf{r} \times \left\{ \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{B} \cdot \hat{\mathbf{n}}) \mathbf{B} - \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \mathbf{B}^2 \hat{\mathbf{n}} \right\} d\mathbf{S} \quad (3.28)$$

$$T_{em} = \iint_{S_g} \mathbf{r} \left\{ \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B}_n \cdot \mathbf{B}_t \right\} d\mathbf{S} \quad (3.29)$$

$$\frac{dT_{em}}{dLength} = \oint_{c_g} \left[ r \left\{ \frac{1}{\mu_0} \bar{B}_n \cdot \bar{B}_t \right\} \right]_{r=D/2} dl \quad (3.30)$$

$$\frac{dT_{em}}{dLength} = \pi D \cdot \frac{D}{2} \cdot \left\{ \frac{1}{\mu_0} \bar{B}_n \cdot \bar{B}_t \right\} \quad (3.31)$$

$$T_{em} = L \cdot \left( \pi \frac{D}{2} \right) \cdot D \cdot \frac{1}{\mu_0} \bar{B}_n \cdot \bar{B}_t \quad (3.32)$$

$$F_g = \frac{1}{\mu_0} \cdot D \cdot L \cdot \bar{B}_n \cdot \bar{B}_t \quad (3.33)$$

Η τιμή του  $B_n$  μπορεί να θεωρηθεί ως το πεδίο  $B$  λόγω μαγνητικής φόρτισης ενώ το  $B_t$  μπορεί να θεωρηθεί το πεδίο που δημιουργείται εξαιτίας της της ηλεκτρικής φόρτισης «ac», και συνεπώς η τιμή του είναι «ac» επί τη διαπερατότητα « $\mu_0$ ». Σε αυτή τη περίπτωση λαμβάνουμε την (3.27). Συνεπώς, αυτοί οι μέθοδοι είναι ισοδύναμοι.

Γενικότερα το συνολικό πεδίο διακένου δεν απαρτίζεται από ίσα πεδία στάτη δρομέα. Για παράδειγμα στην μηχανή συνεχούς ρεύματος κατά τον έλεγχο της από ηλεκτρονικά ισχύος, γίνεται προσπάθεια, σε δεύτερη μοίρα, τα πεδία διέγερσης και τυμπάνου να γίνουν σχεδόν ίσα μεταξύ τους. Ο λόγος που εφαρμόζεται αυτή η τεχνική είναι η μείωση των ολικών απωλειών χαλκού αλλά και του πυρήνα, διότι στα μαγνητικά κυκλώματα ο κορεσμός επέρχεται ομοιόμορφα.

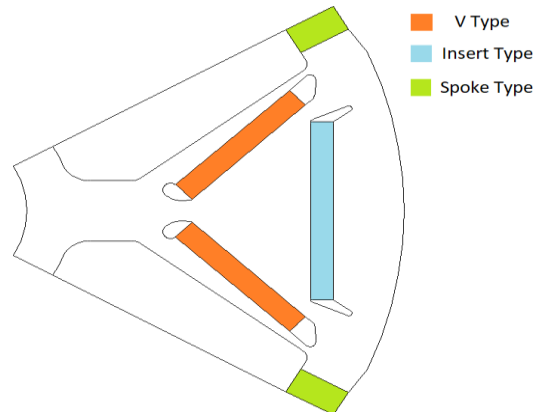
### 3.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΗΧΑΝΗΣ

#### 3.4.1 ΟΡΙΟΘΕΤΗΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΗΣ

Πρώτιστα για να γίνει η προκαταρκτική σχεδίαση απαραίτητη είναι η επιλογή των χαρακτηριστικών που επιθυμούμε να έχει η μηχανή. Σύμφωνα με την παραπάνω ενότητα (3.1) καταλήγουμε πως είναι εφικτό να λειτουργεί ένα όχημα 300kg με κινητήρα 4kW. Η επιλογή των 300kg και η επιλογή του λόγου μετάδοσης του κιβωτίου ταχυτήτων έγινε σκόπιμα έτσι ώστε το όχημα να μπορεί να λειτουργεί με 4kW κινητήρα με ονομαστική ταχύτητα κοντά στα 1000 RPM. Αυτή, η ανάστροφη σκέψη έγινε καθώς ο εργαστηριακός έλεγχος της μηχανής στο εργαστήριο ηλεκτρικών μηχανών, σε περίπτωση της κατασκευής της, μπορεί να είναι εφικτός μόνο όταν η μηχανή είναι μικρότερη από 4kW. Η επιλογή του μέγιστου αυτού ορίου έγινε με το σκεπτικό πως οι μαγνήτες Νεοδυμίου είναι αρκετά δύσκολο να απομαγνητιστούν και συνεπώς η δημιουργία ενός τέτοιου πεδίου σε μικρή μηχανή θα ήταν αρκετά πιο επικίνδυνη όσον αφορά τη θερμική διαχείριση. Επιπλέον, η επιλογή της ονομαστικής ταχύτητας των 1100 RPM έγινε με σκοπό τη χρήση μηχανής έξι πόλων που λειτουργεί στα 50 Ηλ. Ηz. Η λειτουργία της μηχανής στην συχνότητα δικτύου διευκολύνει την εύρεση σιδήρου

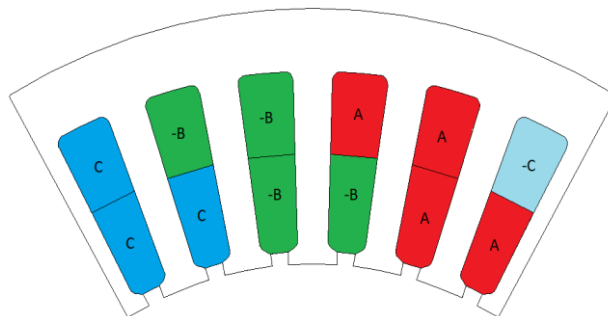
που θα χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή της μηχανής ενώ παρέχει και μία αυξημένη ακρίβεια υπολογισμών των απωλειών του.

Η εξαπολική μηχανή επιλέχθηκε και αυτή με βάση την δυνατότητα κατασκευής της. Η επιθυμία των έξι πόλων μειώνει την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας σε σχέση με αυτή των τεσσάρων πόλων και συνεπώς οι φυγόκεντρες δυνάμεις μειώνονται και αυτές και έχουν ως συνέπεια την μείωση της ανάγκης προσθήκης επιπλέον στηρικτικών ράβδων (Ribs). Η επιλεγείσα γεωμετρία, που παρουσιάζεται παρακάτω (Σχ.3.3.1), δημιουργεί δυσκολίες όσον αφορά το μέγεθος των μαγνητών, διότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των πόλων οι διαστάσεις τους μικραίνουν ιδιαίτερα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον αποκλεισμό περισσότερων από έξι πόλους μηχανών.



Σχ.3.4.1.1 Η προς μελέτη γεωμετρία του δρομέα της μηχανής που χρησιμοποιείται στην παρούσα Διπλωματική Εργασία.

Τέλος, η επιλογή του είδους του τυλίγματος ορίστηκε με βάση την παροχή μέγιστης τιμής του πεδίου χωρίς να υπάρχουν πολύ μεγάλες αποκλίσεις από την ημιτονικότητα. Σύμφωνα με τους παραπάνω λόγους και για λόγους απλότητας, η κάθε φάση διέρχεται από δύο αυλάκια ανά πόλο ενώ η κάθε αυλάκα έχει δύο στρώσεις με κλασματικό βήμα 5/6. Για την ομοιόμορφη κατανομή ρευμάτων η συνδεσμολογία των τυλιγμάτων επιλέγεται να είναι παράλληλη ανά πόλο. Παρακάτω δίνεται μία εικόνα του στάτη.



Σχ.3.4.1.2 Μορφή τυλίγματος στάτη που χρησιμοποιείται στην παρούσα Διπλωματική Εργασία. Η εικόνα δείχνει το τύλιγμα του 1/6 της μηχανής.

Επιπρόσθετα, η μηχανή δεν προβλέπει την ύπαρξη εξαναγκασμένης ψύξης ή κυκλώματος υδρόψυξης. Για το λόγο αυτό η πυκνότητα ρεύματος στους αγωγούς του τυλίγματος της δεν μπορεί να είναι πολύ υψηλή. Η υψηλή θερμοκρασία διαβάλλει την αντοχή στην μόνωση του ειδικού βερνικιού ανάμεσα στους αγωγούς των πηνίων. Ενώ όπως ήδη αναφέρθηκε μεταβάλλει και έντονα την αντοχή των μαγνητών στην απομαγνήτιση. Συνεπώς η ονομαστική πυκνότητα ρεύματος τίθεται στα 4 A/mm<sup>2</sup>.

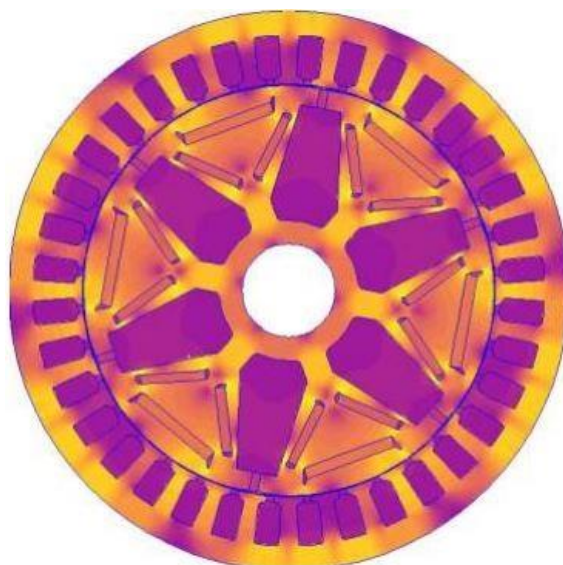
Ένα τελευταίο κατασκευαστικό χαρακτηριστικό, είναι το πάχος του διακένου. Η επίδοση των ηλεκτρικών μηχανών εξαρτάται άμεσα από το μήκος του διακένου που υπάρχει ανάμεσα στον στάτη και στον δρομέα, διότι όλη η μετατρεπόμενη ισχύς μεταφέρεται μέσω του διακένου. Στο εργαστήριο χρησιμοποιούνται κλασικές μέθοδοι «συναρμολόγησης» των μηχανών ενώ οι εδράσεις που πιθανότατα να χρησιμοποιηθούν, δεν ενδέχεται να είναι προηγμένης τεχνολογίας (πχ ηλεκτρομαγνητικές, κεραμικές κλπ.). Για τους λόγους αυτούς, το διάκενο δεν μπορούμε να το θεωρήσουμε μικρότερο των 0.7mm ενώ παράλληλα γίνεται η προσπάθεια να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο, συνεπώς το θεωρούμε ακριβώς 0.7mm.

Παρακάτω δίνεται και ο πίνακας των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών της μηχανής:

Χαρακτηριστικά Μηχανής			
Ισχύς	4 kW	Είδος τυλίγματος	Κατανεμημένο
Ροπή	35 Nm	Στρώσεις	2
Ταχύτητα	1100 RPM	Συνολικές Αύλακες Στάτη (Q)	36
Αριθμός Φάσεων	3	Κλασματικό Βήμα (R)	5 / 6
Πόλοι	6	Συνδεσμολογία Πηνίων	παράλληλη
Μήκος Διακένου	0,7mm	Πυκνότητα Ρεύματος ( $J_{Nom}$ )	4 A/mm <sup>2</sup>

Σχ.3.4.1.3 Γενικά χαρακτηριστικά της μηχανής.

Μια ολοκληρωτική εικόνα της γεωμετρίας της μηχανής που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα Διπλωματική Εργασία δίνεται παρακάτω. Διακρίνονται οι αύλακες του στάτη, η τοπολογία του δρομέα με όλους τους μαγνήτες και τα φράγματα ροής.



Σχ.3.4.1.4 Μια ενδεικτική εικόνα της συνολικής γεωμετρίας της μηχανής που χρησιμοποιείται στην παρούσα Διπλωματική Εργασία. Η γεωμετρία αυτή αποτέλεσε το βασικό μέρος μελέτης της δημοσίευσης [18]

### 3.4.2 ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Η προηγούμενη ενότητα ορίζει κάποια βασικά χαρακτηριστικά της μηχανής που αυτή οφείλει να διαθέτει ώστε να μπορεί να κατασκευαστεί, σύμφωνα με τις προαναφερθείσες συνθήκες (όρια εργαστηρίου, μηχανικές και θερμικές καταπονήσεις κλπ.). Με βάση τα χαρακτηριστικά αυτά μπορεί να ξεκινήσει μια διαστατική ανάλυση.

Όπως προκύπτει και από τη θεωρία της ενότητας 3.2 οι βασικές διαστάσεις της μηχανής ακτινικής ροής είναι το ενεργό μήκος της μηχανής (L) και η διάμετρος του διακένου της (D).

Ο υπολογισμός αυτών των μεγεθών γίνεται με βάση την μέγιστη ροπή που μπορεί να παράγει ο κινητήρας. Στο συγκεκριμένο κινητήρα σύμφωνα με το σχήμα της ΣΠΠ οδηγικού κύκλου (Σχ.3.1.3) η μέγιστη ροπή είναι τα 55 Nm. Με ένα συντελεστή ασφαλείας 1.4 προκύπτει πως η κατάλληλη τιμή της μέγιστης ροπής που οφείλει να παρέχει ο κινητήρας είναι τα 77 Nm.

Επιπλέον, η μαγνητική φόρτιση μπορεί να υποθεθεί με σχετικά καλή ακρίβεια εφόσον τα όρια της είναι άμεσα εξαρτώμενα από τον κορεσμό του υλικού πυρήνα. Μια καλή τιμή για την μαγνητική φόρτιση λοιπόν είναι τα 0.6T. Στην ονομαστική λειτουργία τα πεδία του στάτη και του δρομέα είναι σχεδόν ίσα και συνεπώς η τιμή του  $B_n$  και  $B_t$  είναι ίσες. Συνεπώς οι τιμές των  $B_n$ ,  $B_t$  δίνονται από τους τύπους:

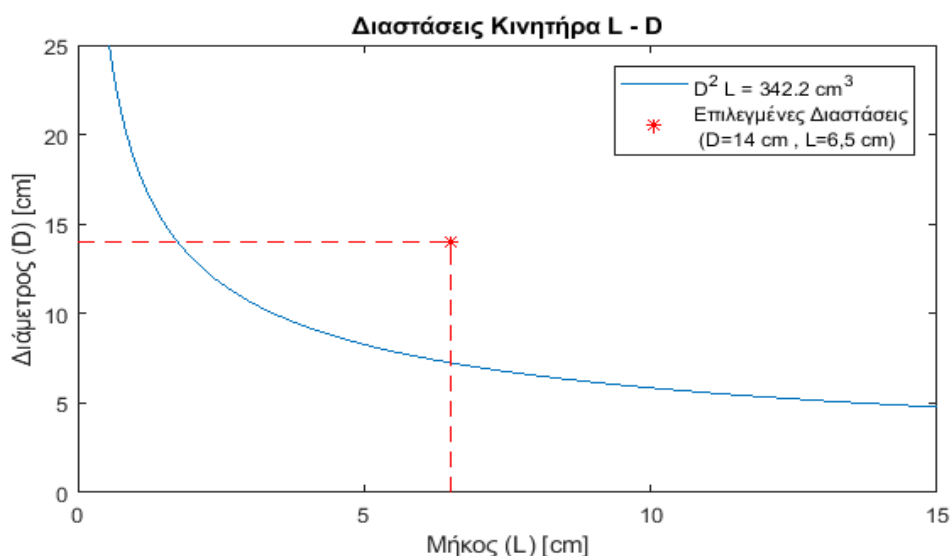
$$\begin{pmatrix} B_n^2 + B_t^2 = 0.6^2 \\ B_n = B_t \end{pmatrix} \quad (3.34)$$

$$B_n = B_t = 0.424T \quad (3.35)$$

Σύμφωνα με τη σχέση (3.32) μπορούμε να υπολογίσουμε μια σχέση ανάμεσα στις διαστάσεις της διαμέτρου της μηχανής και του μήκους της.

$$L \cdot D^2 = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot T_{\max}}{\pi \cdot \bar{B}_n \cdot \bar{B}_t} = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot 77 \cdot N \cdot m}{\pi \cdot 0,424^2 T^2} = 342,2 \text{ cm}^3 \quad (3.36)$$

Η ύπαρξη αυτής της συνάρτησης μας δίνει τη δυνατότητα να επιλέξουμε τις διαστάσεις και τη σχέση μήκους και διαμέτρου που τελικά θα έχει η μηχανή. Πιο κάτω δίνεται η γραφική παράσταση της συνάρτησης αυτής:



Σχ.3.4.2.1 Γραφική παράσταση διαστάσεων μηχανών που αποδίδουν 77 Nm. Στο σχήμα φαίνεται και οι διαστάσεις που τελικά επιλέχθηκαν.

Σύμφωνα με την επιλογή που κάναμε στις διαστάσεις της μηχανής (D=14cm,L=8cm) η ροή ανά πόλο υπολογίζεται με βάση τη σχέση (3.6)

$$\Phi = \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot \bar{B}}{P} = \frac{\pi \cdot 14\text{cm} \cdot 6,5\text{cm} \cdot 0.6T}{6} = 2,859\text{mWb} \quad (3.37)$$

Περαιτέρω υποθέσεις για την κατασκευή της μηχανής είναι αναγκαίο να γίνουν όσον αφορά την μέγιστή τάση που μπορεί η πηγή (Μπαταρία) να αποδώσει. Σε αυτή τη κατηγορία οχήματος η τάση συνήθως κυμαίνεται από 12V έως και 300V. Συνεπώς μια καλή υπόθεση επιπέδου τάσης είναι τα 120V.

Το επίπεδο τάσης της μπαταρίας, συνδέεται με την ενεργό τιμή της τάσης, που μπορεί να αποδώσει στα τυλίγματα της μηχανής ο αντιστροφέας. Η σύνδεση αυτή πραγματοποιείται μέσω του συντελεστή διαμόρφωσης  $m_a$  όπως φαίνεται παρακάτω:

$$E_{rms} \approx \frac{m_a \frac{V_{dc}}{2}}{\sqrt{2}} = \frac{0,75 \frac{120V}{2}}{\sqrt{2}} = 31,82V \quad (3.38)$$

Η ροή της μηχανής ήδη έχει υπολογιστεί, καθώς επίσης και η τάση λειτουργίας της. Το ερώτημα που τίθεται είναι το εξής: πόσα εν σειρά ελίγματα δοσμένης της ροής και της ταχύτητας περιστροφής αυτής παράγουν την ονομαστική ενεργό τιμή της τάσης; Στο ερώτημα αυτό απαντά η σχέση (3.19).

$$f_e = n_{r,RPM} \cdot \frac{1}{60} \cdot \frac{P}{2} = 1100RPM \cdot \frac{1}{60} \cdot \frac{6}{2} = 55Hz \quad (3.39)$$

$$N_\phi = \frac{\sqrt{2} \cdot E_{rms}}{2\pi \cdot K_w \cdot \Phi \cdot f_e} = \left[ \frac{\sqrt{2} \cdot 31,82 V}{2\pi \cdot 0,95 \cdot 2,859 \text{ mWb} \cdot 55\text{hz}} \right] = 48 \quad (3.40)$$

Μπορούμε ακόμα να υπολογίσουμε την ονομαστική ηλεκτρική φόρτιση της μηχανής:

$$I_{rms} = \frac{S}{3 \cdot E_{rms}} = \frac{4,032 \text{ kW}}{3 \cdot 31,82 V} = 42,24A \quad (3.41)$$

$$ac = \frac{3 \cdot 2 \cdot N_\phi \cdot I_{rms}}{\pi \cdot D} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 48 \cdot 42,24A}{\pi \cdot 14\text{cm}} = 27,66 \frac{\text{kA}}{\text{m}} \quad (3.42)$$

Σύμφωνα με τη τιμή του  $N_\phi$ , της ονομαστικής τιμής ρεύματος και με βάση την παράλληλη σύνδεση των αγωγών μεταξύ των πόλων μπορούμε να υπολογίσουμε τους αγωγούς σε κάθε στρώση αυλακιού σύμφωνα με τη σχέση (3.13)

$$N_{slot} = \frac{N_\phi}{q \cdot \text{Layers}} = \left[ \frac{48}{2 \cdot 2} \right] = 12 \quad (3.43)$$

Ακόμη μπορούμε να υπολογίσουμε και το εμβαδό χαλκού που χρειάζεται η στρώση της αύλακας ώστε να επιτυγχάνεται η ονομαστική πυκνότητα ρεύματος χαλκού που υποθέσαμε (3.9).

$$A_{cu} = \frac{N_{slot} I_{rms|cable}}{J_{cu}} = \frac{N_{slot} I_{rms} \frac{2}{p}}{J_{cu}} = \frac{12 \cdot 42,24 \cdot A \cdot \frac{2}{6}}{4 \frac{A}{\text{mm}^2}} = 42,24 \text{ mm}^2 \quad (3.44)$$

Η εύρεση της επιφάνειας χαλκού συνδέεται άμεσα και με το ολικό εμβαδό της στρώσης στην αύλακα σύμφωνα με τη σχέση (3.8). Εδώ υποθέτουμε πως ο συντελεστής πληρότητας (fill factor) "ff" είναι κοντά στο 60%.

$$A_{slot} = \frac{A_{cu}}{ff} = \frac{42,24 \text{ mm}^2}{0,6} = 70,4 \text{ mm}^2 \quad (3.45)$$

Συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηριστικών της μηχανής σύμφωνα με την προκαταρκτική σχεδίαση:

Χαρακτηριστικά Μηχανής			
Αριθμός Φάσεων (m)	3	Είδος Τυλίγματος	Κατανεμημένο
Πόλοι (P)	6	Συνδεσμολογία Πηνίων	Παράλληλη
Ισχύς ( $P_N$ )	4,032 kW	Συντελεστής Τυλίγματος (Kw)	0,95
Ταχύτητα ( $n_{mech}$ )	1100 RPM	Συνολικές Αύλακες Στάτη (Q)	36
Ροπή ( $T_N$ )	35 Nm	Στρώσεις (Layers)	2
Μέγιστη Ροπή ( $T_{max}$ )	77 Nm	Αύλακες ανά Πόλο (q)	2
Ηλεκτρική Συχνότητα ( $f_e$ )	55 Hz	Κλασματικό Βήμα (R)	5 / 6
Μέγιστη Τάση ( $E_{rms}$ )	31,82 V	Ροή ανά Πόλο ( $\Phi$ )	2,859 mWb
Ονομαστικό Ρεύμα ( $I_N$ )	42,24 A	Πυκνότητα Ρεύματος ( $J_{Nom}$ )	4 A/mm <sup>2</sup>
Μήκος Διακένου ( $L_g$ )	0,7 mm	Fill Factor (ff)	60%
Μήκος Μηχανής (L)	6,5 cm	Τυλίγματα Φάσης Κάθε Πόλου ( $N_\phi$ )	48
Διάμετρος Μηχανής (D)	14 cm	Τυλίγματα Στρώσης Αύλακας ( $N_{slot}$ )	12
Μαγνητική Φόρτιση (B)	0,6 T	Εμβαδό Στρώσης Αύλακας ( $A_{slot}$ )	70,4 mm <sup>2</sup>
Ηλεκτρική Φόρτιση (ac)	27,66 kA/m	Εμβαδό Χαλκού Στρώσης Αύλακας ( $A_{cu}$ )	42,24 mm <sup>2</sup>

Σχ.3.4.2.2 Πίνακας συγκεντρωτικών αποτελεσμάτων προκαταρκτικής σχεδίασης.

### 3.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Η αναλυτική μέθοδος εφαρμόζεται με μεγάλη ευκολία και συνεπώς η παραμετροποίηση της σε μορφή κώδικα δεν είναι αναγκαία επειδή μπορεί ακόμη και με μια απλή αριθμητική μηχανή να αποδώσει ποιοτικά την τάξη μεγέθους των χαρακτηριστικών σχεδίασης. Στην πράξη οι αποκλίσεις της μεθόδου, εξαιτίας των φαινομένων που αγνοούμε, είναι πολύ μεγαλύτερες από την αγνόηση δεκαδικών ψηφίων στους υπολογισμούς της. Όμως στην εργασία αυτή, η αριθμητική ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μεθόδου διατηρήθηκε για λόγους πληρότητας της.

Οι τιμές του πίνακα (3.3.6) αποτελούν την βάση για περαιτέρω σχεδίαση του κινητήρα. Με τις τιμές αυτές γνωρίζουμε πλέον την μορφή που θα έχει η μηχανή από πλευράς διαστάσεων, είδος τυλίγματος, μέγεθος αυλάκων αλλά και από πλευράς των ειδικών φορτίσεων της ώστε να μπορεί να αποδίδει τις τιμές που οριοθετήσαμε στον πίνακα (3.3.3).

Προτέρημα της μεθόδου αυτής θεωρείται, ο γρήγορος επανυπολογισμός όλων των χαρακτηριστικών τιμών της μηχανής σε περίπτωση που διαφοροποιηθεί κάποια υπόθεση που έχει γίνει. Η άμεση και γραφική απεικόνιση μαθηματικών σχέσεων με μεγάλη ευκολία υπολογισμού μπορεί να γίνει και μέσω του προγράμματος MathCAD v14.

Μελετώντας τις αναλυτικές μεθόδους εξάγουμε ακόμη το συμπέρασμα, πως η μηχανή δεν λαμβάνει λεπτομέρεια κατασκευαστική π.χ. εξωτερική ακτίνα στάτη ή εσωτερική ακτίνα δρομέα. Παρέχει όμως μια εικόνα για τις διαστάσεις του διακένου της μηχανής. Με τη γνώση του διακένου και μία αίσθηση του εμβαδού των αυλάκων, μπορούν να υπολογιστούν ακόμη περισσότερα χαρακτηριστικά της μηχανής, με γνώμονα την διατήρηση του πεδίου στα σιδηρομαγνητικά υλικά της, σε ικανοποιητικό σημείο λειτουργίας στην καμπύλη B-H ώστε να μην υπάρχει έντονος κορεσμός.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ (2D-FEA) ΜΕ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥΣ ΣΥΣΤΗΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ (PRE & POST PROCESS & PARALLEL PROCESS)

#### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ:

Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφονται τρόποι και μέθοδοι υπολογισμού ορισμένων φαινομένων που συναντώνται στις ηλεκτρικές μηχανές με βάση τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε δύο διαστάσεις (2D). Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται:

- Ο συστημικός ορισμός του προβλήματος που επιλύει η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA Pre Process).
- Η εξαγωγή και η ανάλυση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (FEA Post Process).
- Η δυνατότητα παραλληλοποίησης της ανάλυσης μηχανών, με σκοπό τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα επιλογής της προκύπτουσας βέλτιστης ανάμεσα σε πολλές παρόμοιες μηχανές.

Οι διαδικασίες αυτές γίνονται με σκοπό την ανάλυση του πεδίου ορισμού των σχεδιαστικών μεταβλητών (Grid Search). Οι διαδικασίες ανάλυσης πριν και μετά την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων γίνεται με τη βοήθεια του λογισμικού MATLAB. Για την εκτέλεση προγραμμάτων παράλληλης επεξεργασίας χρησιμοποιήθηκαν οι υπηρεσίες σύννεφου (Clouding Services) του Azure Microsoft ενοικιάζοντας επεξεργαστή με 72vCPUs.

#### 4.2 ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ

Η μηχανή αποτελεί μια κατασκευαστική ολότητα. Αυτό σημαίνει πως αποτελείται από βασικά και επιμέρους στοιχεία, αλλά ταυτόχρονα εξαρτάται από πολλούς ακόμη ουσιαστικούς παράγοντες, οι οποίοι επιδρούν εσωτερικά και εξωτερικά σε αυτή, για να φτάσει στην τελική επίδοση της κατά τη λειτουργία της. Όταν η μηχανή μάλιστα δεν είναι υπαρκτό αντικείμενο, αναγκαίο είναι και οι υπολογιστικές παραδοχές να θεωρούνται μέρος της ολότητας της μηχανής. Πιο κάτω δίνεται ένας ενδεικτικός πίνακας με τα χαρακτηριστικά μίας μηχανής προσομοίωσης.

<b>Ολότητα Μηχανής</b>					
<i>Υπολογιστικά Χαρακτηριστικά</i>					
Πυκνότητα Πλέγματος (Mesh Size)	Λειτουργικές Παραμέτρους (π.χ. Συχνότητα, Βάθος)	Είδος Ανάλυσης (π.χ. 2D,3D, CFD)	Όριο Σύγκλισης (π.χ. Min Error)	Υπολογιστική Μέθοδος (π.χ Gauss Seidel , Newton Raphson)	Είδος Προβλήματος (π.χ. Ηλεκτροστατικό, Μαγνητικό)

*Σχ.4.2.1 Ενδεικτικός πίνακας χαρακτηριστικών Ηλεκτρικής Μηχανής. Το πρώτο μέρος του πίνακα δίνει χαρακτηριστικά της μηχανής με βάση τις ρυθμίσεις ανάλυσης του προγράμματος FEA.*

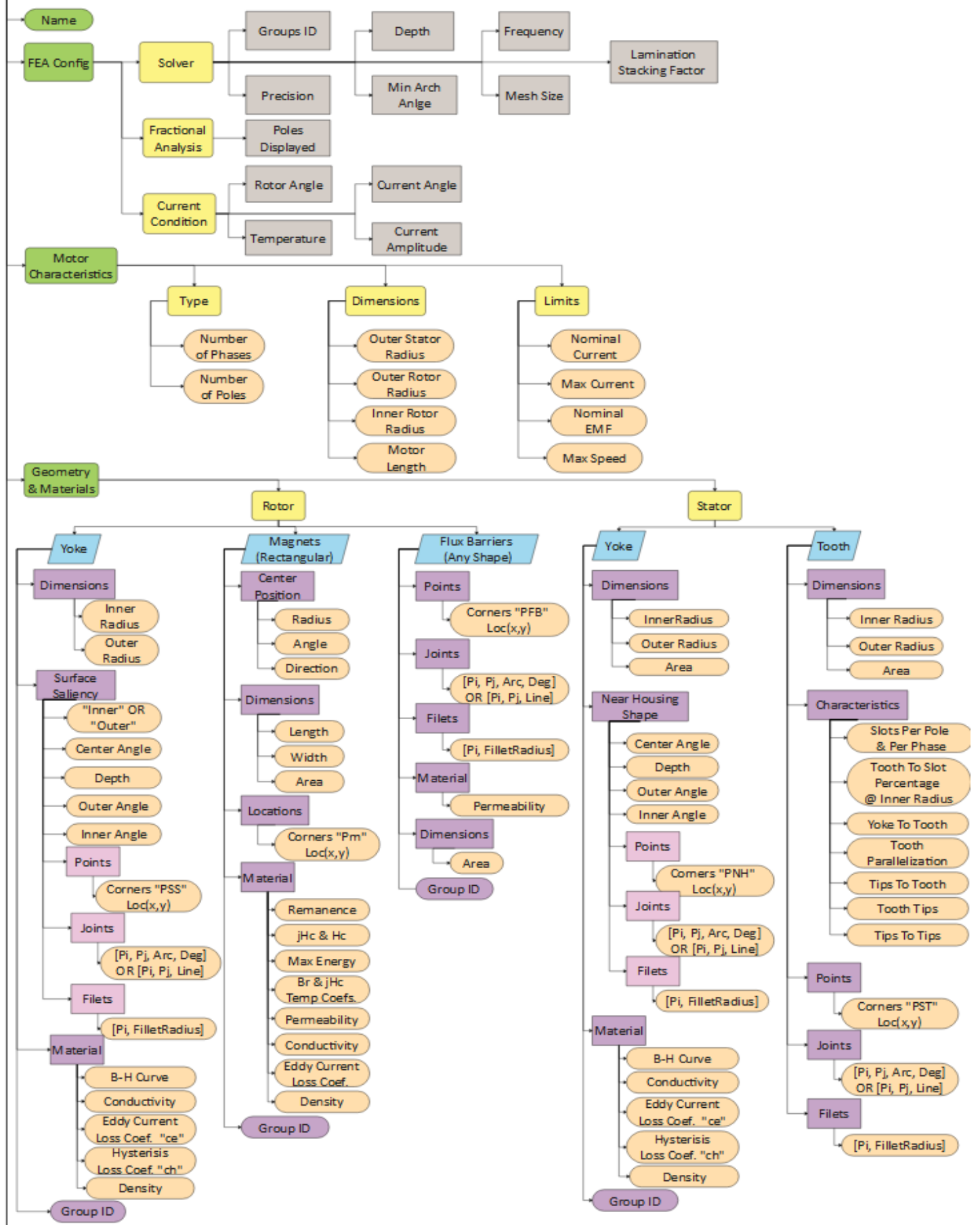
<i>Γεωμετρία &amp; Υλικά</i>						
Συστήμα Ψύξης	Βάση	Κέλυφος	Άξονας	Στάτη	Δρομέα	Τύλιγμα
Θέση Αγωγών Ψύξης	Σχήμα	Σχήμα	Πάχος	Σχήμα	Θέση & Σχήμα Μαγνητών	Γεωμετρία Άκρων
Σχήμα Αγωγών Ψύξης	Μέγεθος	Υλικό	Υλικό	Υλικό	Θέση & Σχήμα Φραγμάτων	Υλικό
Υλικό Αγωγών	Υλικό Στήριξης	Θέση & Σχήμα Εγκοπών	Κόμπλερ	Είδος οδοντώσεων	Υλικό Μαγνητών & Πυρήνα	Θέση Αγωγών στις Αύλακες
Υλικό Κυκλώματος	Τυχών Συνεμπλόκ	Ολικό Εμβαδό Επιφάνειας	Ρουλεμάν	Σχήμα Στηρίξεων	Σχήμα Εκτυπότητας	Κυτίο Ακροδεκτών
<i>Ηλεκτρομαγνητικά</i>						
Ρεύμα	Τάση	Ροπή	Ταχύτητα	Απόδοση	Μαγνήτες	Τύλιγμα
Συχνότητα	Συχνότητα	Μέση Τιμή	Συχνότητα Δρομέα	Χαρτης Απόδοσης	Remanence (Br)	Δινορεύματα
Γωνία	Γωνία	Αρμονικές	Εξασθένιση Πεδίου	Απώλειες Χαλκού	Θερμοκρασία	Θερμοκρασία
Πλάτος	Πλάτος	Είδος Αντιροπής	Ροή Αέρα	Απώλειες Πυρήνα	Πίεση	Μόνωση
Αρμονικές	Αρμονικές	Τιμή Αντιροπής		Απώλειες Ανεμισμού	Οξειδωση	
<i>Μηχανικά</i>						
Φυγόκεντρες Δυνάμεις	Κοποτικές Φορτίσεις	Θλιπτική Αντοχή	Παραμορφώσεις	Ροές	Θερμική	Διάφορα
Δρομέα	Άξονας	Κέλυφος	Δρομέας - Φυγόκεντρες	Αέρα Διάκενου	Διαστολές Υλικών	Δονήσεις
Μαγνητών	Βάσης Μηχανής	Άκρο Άξονα	Άξονα-Στρεπτικές	Αέρα Κελύφους	Θερμοκρασίες	Ήχος
Ρουλεμάν				Ρευστού Κυκλώματος Ψύξης		
<i>Θερμικά</i>						
Επαγωγή Θερμότητας	Πηγές Απωλειών	Θερμοχωρητικότητες Υλικών	Θερμικές Αγωγιμότητες	Θερμική Ακτινοβολία	Θερμική Διάχυση	

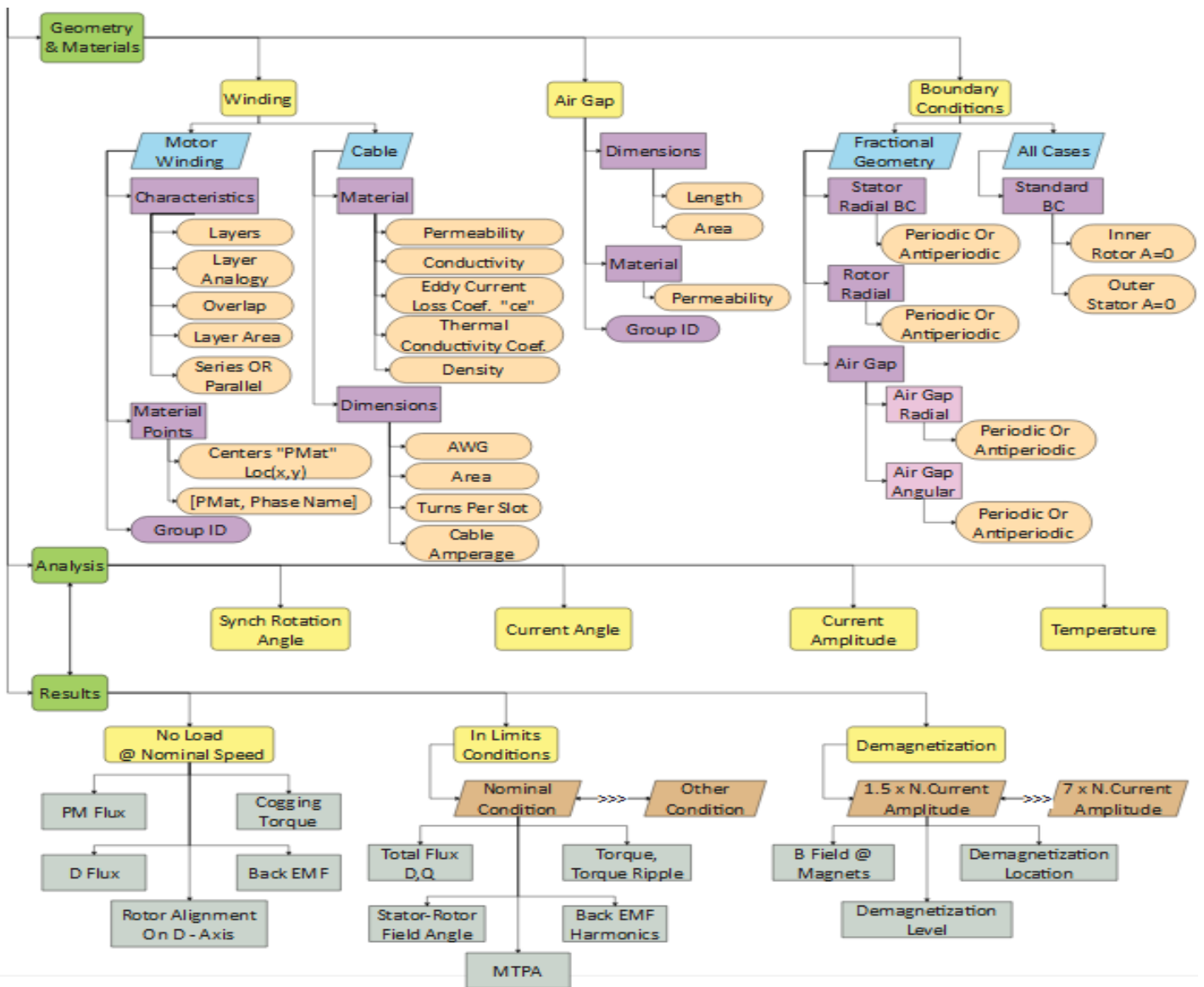
*Σχ.4.2.2 Ενδεικτικός πίνακας χαρακτηριστικών Ηλεκτρικής Μηχανής. Το δεύτερο μέρος του πίνακα δίνει χαρακτηριστικά της μηχανής με τη γεωμετρία της και τις επιδόσεις στις αναλύσεις Ηλεκτρομαγνητικών, Μηχανικών, Θερμικών φαινομένων.*

Καταλήγουμε, λοιπόν, στο συμπέρασμα πώς η μηχανή είναι μια πολυσύνθετη οντότητα με πολλές πτυχές «χαρακτήρα» σε αναλύσεις ηλεκτρομαγνητικές, μηχανικές, θερμικές. Η Ανάγκη οργάνωσης αυτών των χαρακτηριστικών είναι πρώτιστης σημασίας για την κατασκευή της μηχανής τόσο σε εικονικό όσο και σε πραγματικό-ρεαλιστικό επίπεδο.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία δημιουργήθηκε μια υπολογιστική οντότητα της μηχανής «ΔΟΜΗΣ» (Structure) στο περιβάλλον του MATLAB. Οι ενότητες «FIELDS» αυτής της Δομής δίνονται παρακάτω σχηματικά.

Motor Entity  
"AF\_IPMSM"





4.2.3 Εικονική αναπαράσταση της δομής της μηχανής στο MATLAB. Η εικόνα αυτή είναι πιστή αναπαράσταση της λειτουργίας του κώδικα MATLAB. Η εικόνα δημιουργήθηκε με το λογισμικό Edraw Max 9.2.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αναλύεται πως ακριβώς υπολογίζονται οι τιμές αυτών των πεδίων. Γενικότερα η μηχανή, όταν συμπληρωθούν τα παραπάνω πεδία, μπορεί να γίνει η εξαγωγή όλων των χαρακτηριστικών που διαθέτει και μελετώνται στην εργασία. Τονίζεται πως για τη γεωμετρική απεικόνιση δεν γίνεται απευθείας με τις μεταβλητές που δίνονται και στην παραπάνω δομή, αλλά με βάση άλλες ορισμένες μεταβλητές που εμπεριέχουν και μια πιο φυσική σημασία. Για παράδειγμα το να πούμε πως οι εσωτερικοί μαγνήτες έχουν μήκος 1cm δεν δίνει σαφή διαισθητική ερμηνεία, και συνεπώς κρίθηκε προτιμότερο να δίνουμε αναλογικές τιμές πχ. το μήκος του I type μαγνήτη καλύπτει το 1/3 του πόλου.

Εκτός από αυτή τη διαισθητική βοήθεια, μια σωστή περιγραφή των γεωμετρικών μεταβλητών δημιουργεί ένα καλό χάρτη αντιστοίχισης της μεταβολής που προκαλεί σε ένα χαρακτηριστικό εισόδου (γεωμετρική παράμετρος) σε κάποιο χαρακτηριστικό εξόδου (επίδοση, απόδοση, ροπή, Back EMF, THDs κλπ.). Με την έννοια «καλό χάρτη αντιστοίχισης μεταβολής» εννοούμε την όσο γίνεται απεξάρτηση μεταξύ τους (πχ. Να υπήρχε μία μεταβλητή που όσο αυξανόταν θα αυξανόταν και η ροή στον D άξονα χωρίς να επηρεαζόταν ιδιαίτερα καμία άλλη συμπεριφορά της).

#### 4.3 ΠΡΟ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΑΤΗ

Αρχικά, για να μπορούμε μέσω του MATLAB να επιδρούμε στο πρόγραμμα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων FEMM αναγκαίο είναι να συμπεριλάβουμε τις απαραίτητες βιβλιοθήκες προγραμματισμού. Στην συνέχεια, για λόγους μείωσης πολυπλοκότητας γίνεται μια μετατροπή σε αυτές ώστε να λειτουργούν με μιγαδική μορφή και όχι με καρτεσιανή. Ακόμη γίνονται και τροποποιήσεις ώστε με την τοποθέτηση στοιχείων στο FEMM να γίνεται και η ομαδοποίηση σε “Groups” αλλά και η εναπόθεση αυτών στη δομή “Motor Entity”.

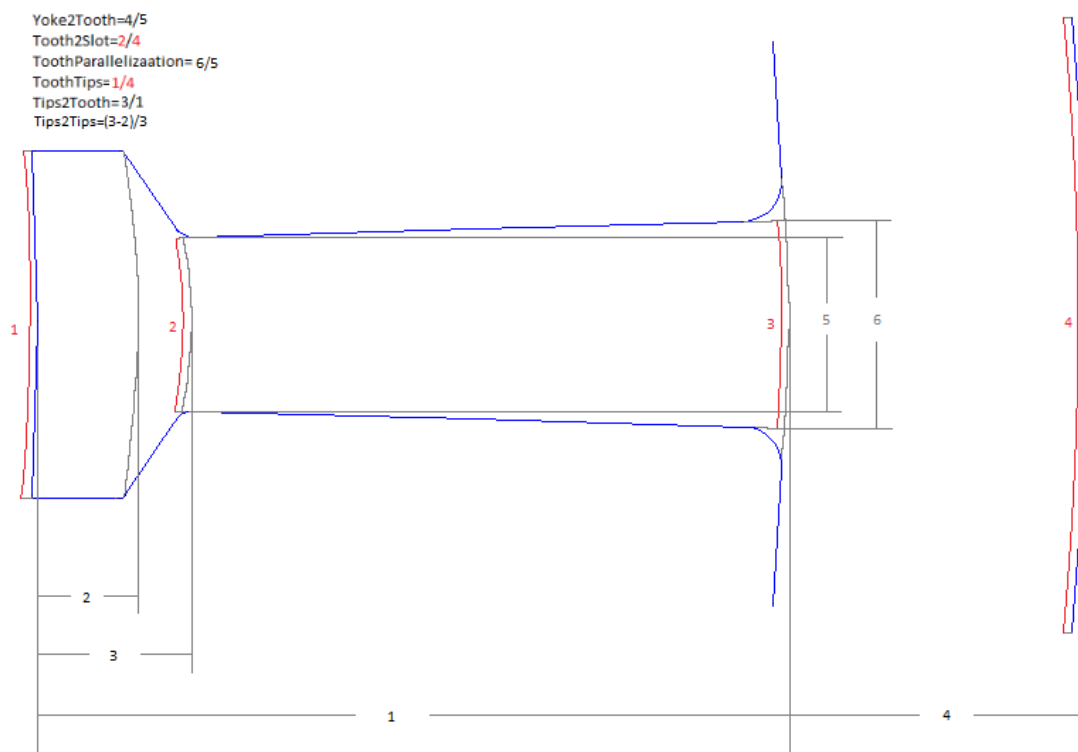
Πρωτίστως δίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά του κινητήρα. Η εναπόθεση των χαρακτηριστικών αυτών γίνεται με τη χρήση των παρακάτω μεταβλητών.

Motor General Characteristics	Poles	Phases	Nominal Current Density (Jnom)[A/mm <sup>2</sup> ]	Max Back EMF (Eemf)[V]	Lamination Factor (cs)[%]	Fill Factor (ff)[%]
	Air Gap Length (Lg)[mm]	Rotor Inner Radius (Rri)[mm]	Rotor Outer Radius (Rro)[mm]	Outer Radius (Rso)[mm]	Motor Active Length (L)[mm]	

Για την πλήρη περιγραφή του δοντιού απαιτείται η γνώση των παρακάτω μεταβλητών:

Stator General Characteristics	Slots per Pole per Phase (Spp)[Num]	Yoke2Tooth Normalized [%]	Tooth Parallelization [%]	ToothTips [%]	Tooth2Slot [%]
	Tips2Tooth [%]	Tips2Tips [%]	Inner Fillet (mm)	Outer Fillet (mm)	

Πιο κάτω δίνεται μια κατατοπιστική εικόνα της τοπολογίας του δοντιού στάτη:



Σχ. 4.3.1 Εικόνα γεωμετρίας δοντιού στάτη. Στο σχήμα απεικονίζονται και οι απαραίτητες μεταβλητές για την δημιουργία του από το MATLAB στο FEMM. Οι κόκκινες τοξοτές γραμμές συμβολίζουν γωνίες στο κέντρο της μηχανής. Οι γκριζες γραμμές δηλώνουν αποστάσεις.

Η αναπαράσταση αυτή (Σχ 4.2.1) δημιουργείται στο FEMM αρχικά βρίσκοντας τα σημεία των γωνιών και στην συνέχεια με την ένωσή τους με τμήματα και τόξα. Το ολικό σχήμα του στάτη δημιουργείται από την αντιγραφή και τοποθέτηση του πρώτου

δοντιού όσες φορές είναι οι αύλακες. Για την λεπτομερή σχεδίαση απαραίτητες είναι και οι πληροφορίες των ακτινών των fillets στο εσωτερικό μέρος των αυλάκων.

Η τοποθέτηση των fillets είναι αρκετά επώδυνη διαδικασία επειδή σε περίπτωση που η εναποτεθείσα τιμή ακτίνας του fillet είναι μεγαλύτερη από όσο μπορεί να γίνει, το πρόγραμμα σταματά βίαια τη λειτουργία του. Σε μια γεωμετρία που συχνά τοποθετούνται fillets ο συστημικός τρόπος αποφυγής προβλημάτων είναι σταδιακή η μείωση της ακτίνας του fillet έως ότου αυτή γίνει δεκτή. Η διαδικασία αυτή γίνεται μέσω της εντολής Try-Catch.

Μερικοί ενδεικτικοί υπολογισμοί για την εύρεση της θέσεις των σημείων του δοντιού του στάτη δίνονται παρακάτω:

$$\begin{aligned} \text{SlotAngle} &= \frac{2 \cdot \pi}{m \cdot p \cdot \text{SlotsPerPole}} \quad \text{ex.} \left[ \text{SlotAngle} = \frac{360^\circ}{3 \cdot 2 \cdot 2} = 10^\circ \right] \\ \text{TipAngle} &= \text{SlotAngle} \cdot \frac{\text{ToothTips}(\%)}{100\%} \\ \text{ToothAngle} &= \text{SlotAngle} \cdot \frac{\text{Tooth2Slot}(\%)}{100\%} \\ \text{ToothInnerRadius} &= (\text{RotorOuterRadius} + L_g) \\ \text{YokeOuterRadius} &= \text{StatorOuterRadius} \\ \text{ToothWidth@ToothInnerRadius} &= 2 \cdot \text{ToothInnerRadius} \cdot \sin\left(\frac{\text{ToothAngle}}{2}\right) \\ \text{YokeWidth} &= \frac{\text{Yoke2Tooth}(\%)}{100\%} \cdot \text{ToothWidth} \\ \text{YokeInnerRadius} &= \text{YokeOuterRadius} - \text{YokeWidth} \\ \text{ToothOuterRadius} &= \text{YokeInnerRadius} \\ \text{ToothLength} &= \text{ToothOuterRadius} - \text{ToothInnerRadius} \\ \text{TipLength} &= \frac{\text{Tips2Tooth}(\%)}{100\%} \cdot \text{ToothLength} \\ \text{ParallelTipLength} &= \left[ 1 - \frac{\text{Tips2Tips}(\%)}{100\%} \right] \cdot \text{TipLength} \\ \text{SlopeTipLength} &= \left[ \frac{\text{Tips2Tips}(\%)}{100\%} \right] \cdot \text{TipLength} \\ \text{ToothWidth@ToothOuterRadius} &= \text{ToothWidth@ToothInnerRadius} \cdot \frac{\text{ToothParallelization}(\%)}{100\%} \\ \text{PST}(1) &= \text{ToothInnerRadius} \\ \text{PST}(2) &= \text{PST}(1) \cdot \exp\left(i \cdot \frac{\text{TipAngle}}{2}\right) \\ \text{PST}(3) &= \text{PST}(2) + \text{ParallelTipLength} \\ \text{PST}(4) &= \text{Re}(\text{PST}(3)) + \text{SlopeTipLength} + i \cdot \frac{\text{ToothWidth@ToothInnerRadius}}{2} \\ \text{PST}(5) &= \text{YokeInnerRadius} \cdot \exp\left[i \cdot \sin^{-1}\left(\frac{\text{ToothWidth@ToothOuterRadius}}{2 \cdot \text{YokeInnerRadius}}\right)\right] \\ \text{PST}(6) &= \text{YokeInnerRadius} \cdot \exp\left(i \cdot \frac{\text{SlotAngle}}{2}\right) \end{aligned}$$

Σχ. 4.3.2. Ενδεικτικοί υπολογισμοί για την δημιουργία γεωμετρίας δοντιού στάτη.

#### 4.4 ΠΡΟ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΥΛΙΓΜΑΤΟΣ

Η τοποθέτηση του τυλίγματος στον στάτη γίνεται τοποθετώντας το υλικό του χαλκού στην κατάλληλη αύλακα και βάζοντας ως τιμή πυκνότητας ρεύματος την τιμή της πυκνότητας ρεύματος της εκάστοτε φάσης επί τον συντελεστή πληρότητας (Fill Factor). Στις αύλακες τοποθετούνται ομαδοποιημένες οι φάσεις της μηχανής με τα ονόματα τους (A, B, C, NA, NB, NC) ώστε να μπορούν να αλλάζουν την τιμή του ρεύματος τους μεταθέτοντας έτσι την γωνία ρεύματος στο πλαίσιο dq ή και το ολικό

πλάτος του ρεύματος. Η αλλαγή αυτή γίνεται μέσω ξεχωριστής συνάρτησης στην οποία ως είσοδος τοποθετείται το πλάτος και η γωνία στο πλαίσιο  $d\alpha$  του ρεύματος.

Γνωρίζοντας την τιμή του εμβαδού της αύλακας (Aslot) μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε την επιφάνεια του αγωγού χαλκού. Αυτό γίνεται βρίσκοντας την ολική επιφάνεια του χαλκού ( $Aslot * ff$ ) και διαιρώντας δια το πλήθος των αγωγών που υπάρχουν στο slot. Προφανώς, η ονομαστική τιμή ρεύματος του αγωγού υπολογίζεται από τον πολλαπλασιασμό της επιφάνειας του με την ονομαστική πυκνότητα ρεύματος του ( $4A/mm^2$  βλ.Κεφ. 3). Η ονομαστική τιμή της φάσης της μηχανής δεδομένου ότι τα τυλίγματα των ζευγών πόλων συνδέονται παράλληλα, μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας την τιμή ρεύματος του αγωγού επί του πλήθους των ζευγών πόλων.

Παρακάτω δίνονται και οι μεταβλητές που αφορούν το τύλιγμα της μηχανής καθώς επίσης και τα υλικά που χρησιμοποιούνται για το τύλιγμα και για τον πυρήνα.

Winding / Core Materials	Conductivity ( $\sigma$ )[ $S*10^6/m$ ]	Density ( $\rho$ )[ $g/cm^3$ ]	Eddy Current Coef. (ce)[ $Watt/(lb*T^2 *Hz^2)$ ]	Hysteresis Coefficient (ch)[ $Watt/(lb*T^2*Hz)$ ]	Temperature Coef. (a)[ $K^{-1}$ ]
Copper					
Iron					
Winding General	Pole Turns	Parallel Or Series	Layers	Layers Analogy	Overlap

Η τοποθέτηση του τυλίγματος στις αύλακες του στάτη γίνεται από ξεχωριστή συνάρτηση η οποία δημιουργεί το κατανεμημένο τύλιγμα διπλής στρώσης. Για να γίνει αυτό το εμβαδό της αύλακας διαιρείται κατάλληλα σύμφωνα με δοσμένη αναλογία. Για τη διαίρεση αυτή υπάρχει και καλείται, από τη συνάρτηση της δημιουργίας τυλίγματος, άλλη συνάρτηση διαίρεσης αύλακας.

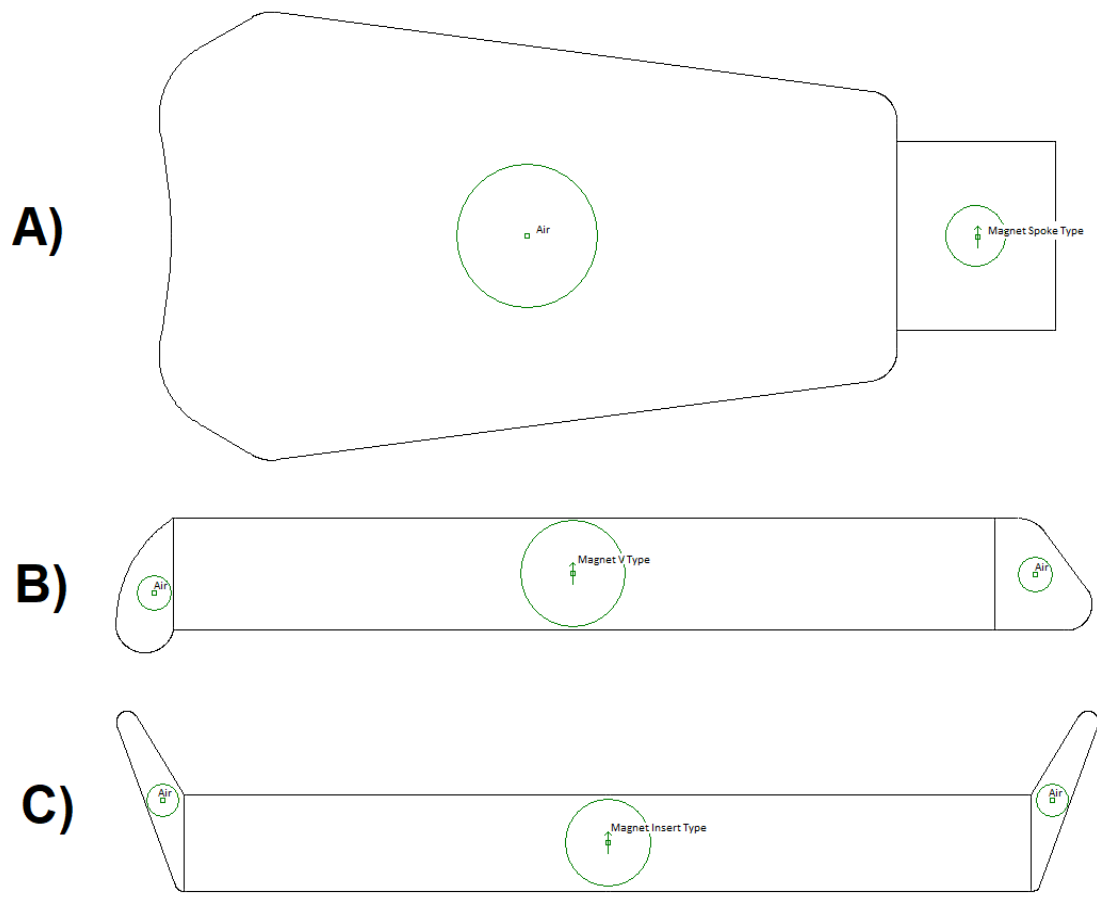
#### 4.5 ΠΡΟ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΔΡΟΜΕΑ

Η κατασκευή της γεωμετρίας δρομέα αποτελεί ένα σύνθετο εγχείρημα. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη πολλών στοιχείων μαγνητών και την ύπαρξη φραγμάτων ροής σε αυτούς, όπως δύο φράγματα ροής ανά εσωτερικό μαγνήτη τύπου “V-Type” και τύπου “Insert-Type” και ένα φράγμα ροής ανά μαγνήτη τύπου “Spoke-Type”. Ακόμη στον δρομέα υπάρχει και η «επιφανειακή» εκτυπότητα του, στο διάκενο.

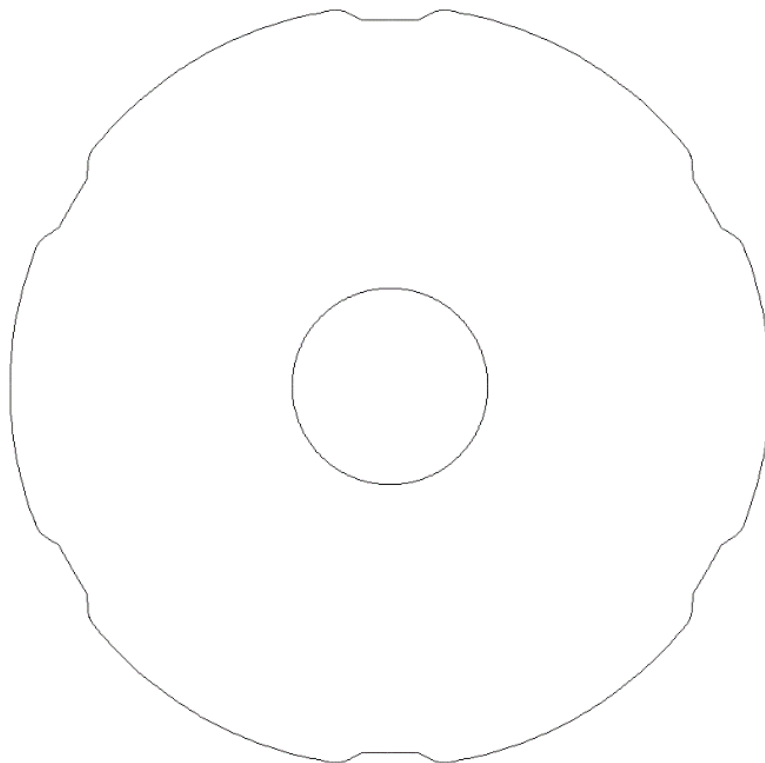
Τα μαγνητικά υλικά μπορούν να δοθούν από τις παρακάτω μεταβλητές στο πρόγραμμα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Οι εν λόγω μεταβλητές συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα:

Magnetic Materials (A)	Remanence (Br)[T] (20°C)	Coercivity (Hcb)[kA/m] (20°C)	Intrinsic Coercivity (Hci)[kA/m] (20°C)	Energy (BHmax)[MGOe] (20°C)	Permeability ( $\mu_r$ )
Spoke Type Magnet					
Insert Type Magnet					
V Type Magnet					
Magnetic Materials (B)	Rev. Temp. Coef. Of Induction (a)[%/C]	Rev. Temp. Coef. Of Intrinsic Coercivity (b)[%/C]	Max. Working Temperature (Tmax)[C]	Conductivity ( $\sigma$ )[ $S*10^6/m$ ]	Density ( $\rho$ )[ $g/cm^3$ ]
Spoke Type Magnet					
Insert Type Magnet					
V Type Magnet					

Αρχικά, η ολική κατασκευή του δρομέα αποτελείται από τη διαδοχική επανάληψη του ενός πόλου. Για να γίνει εύκολη η κατασκευή του πόλου αυτού κατασκευάζουμε τους μαγνήτες σε μια περιοχή του επιπέδου σχεδίασης και στην συνέχεια τους τοποθετούμε στην σωστή θέση στρέφοντας και μετακινώντας τους κατάλληλα. Παρακάτω φαίνονται τα δομικά στοιχεία της γεωμετρίας όσον αφορά τον δρομέα:



Σχ. 4.5.1. Δομικά Block Μαγνητών δρομέα. Α. Μαγνήτης Spoke Type με το φράγμα ροής Β. Μαγνήτης V Type με τα φράγματα ροής του. C. Μαγνήτης Insert Type με τα φράγματα ροής του.



Σχ. 4.5.2. Γεωμετρία του σιδήρου δρομέα χωρίς τους μαγνήτες "Rotor Yoke".



Όπως φαίνεται και στην δομή της ολότητας της μηχανής:

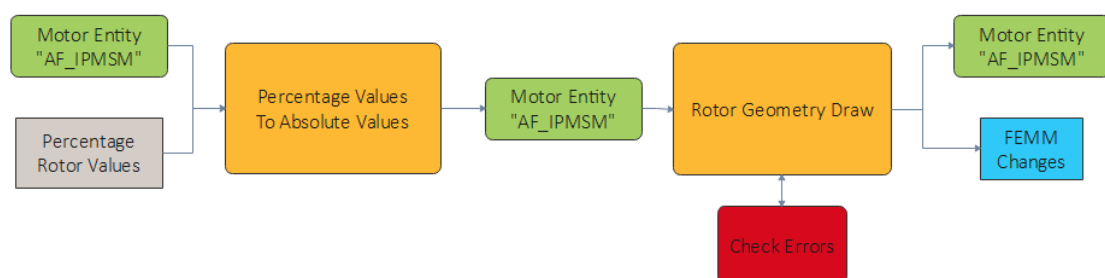
- Τα φράγματα ροής για να δημιουργηθούν απαιτούν την θέση των σημείων που ορίζουν το χωρίο τους μαζί με το τρόπο που αυτά ενώνονται μεταξύ τους (τόξα ή γραμμές).
- Οι μαγνήτες απαιτούν το εμβαδό τους και το μήκος τους καθώς επίσης την θέση και το προσανατολισμό του κέντρου τους.
- Ο δρομέας χρειάζεται το κέντρο, το εύρος (εσωτερικά και εξωτερικά) και το βάθος που έχει η κάθε επιφανειακή εκτυπότητα στο εσωτερικό ή στο εξωτερικό μέρος του.

Υπάρχει λοιπόν μια συνάρτηση κατασκευαστική η οποία όταν υπολογιστούν οι παραπάνω τιμές μπορεί να κατασκευάσει τους μαγνήτες και τα φράγματα ροής και να τα τοποθετήσει κατάλληλα αφού πρώτα δημιουργήσει την γεωμετρία του σώματος δρομέα. Χωρίς αυτό να είναι ιδιαίτερος πολύπλοκο.

Στο δρομέα ωστόσο οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν είναι κυρίως ποσοστιαίες και δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

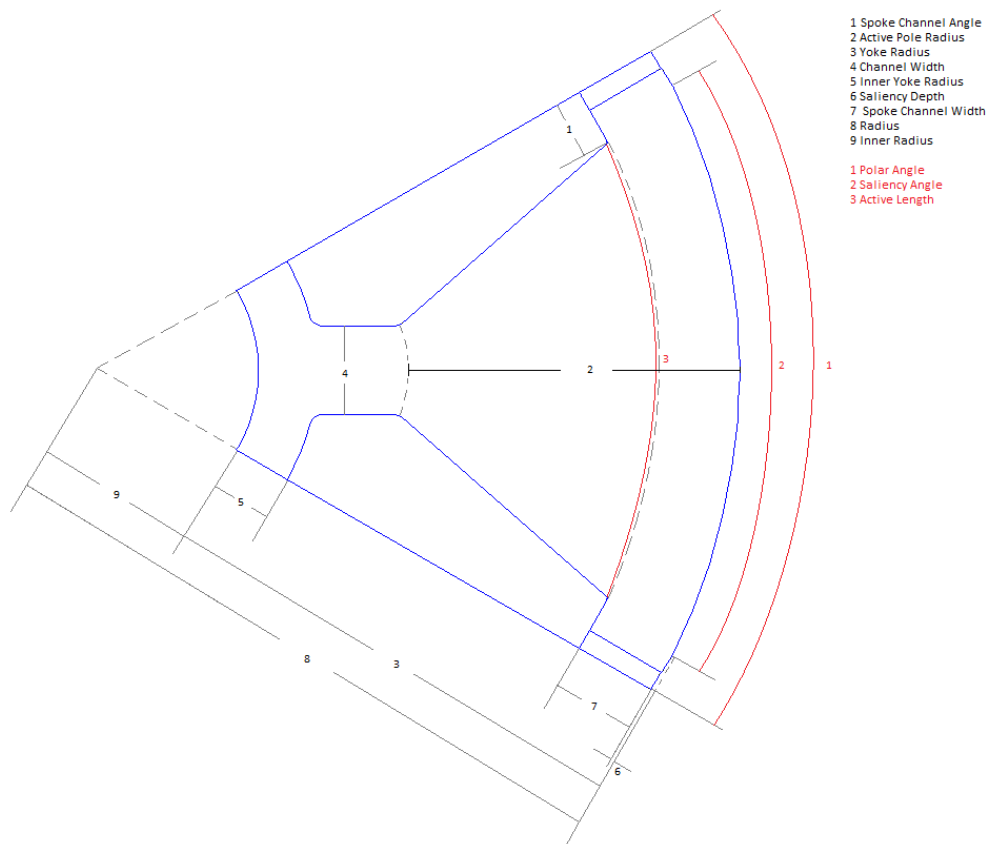
Rotor General Characteristics	Spoke Channel		Saliency			
	Spoke Channel Angle 2 Polar Angle [%]	Spoke Channel Depth 2 Active Pole Radius [%]	Saliency [%]	Saliency Depth 2 Air Gap [%]		
	Yoke & Pole Channel					
	Inner Yoke Radius 2 Channel Width [%]	Active Pole Radius 2 Yoke Radius [%]	Channel Width 2 Active Length [%]			
Magnet Characteristics	Insert Magnet			Spoke Magnet		
	Insert PM Depth 2 Active Pole Radius [%]	Insert PM Length 2 Possible Length [%]	Insert PM Area per Pole [mm <sup>2</sup> ]	Spoke Area per Pole [mm <sup>2</sup> ]	Spoke Magnet Direction [deg]	
	V Type Magnet					
	V Type PM Angle On Top 2 Possible Angle [%]	V Type PM Top Depth 2 Active Pole Radius [%]	V Type PM Angle On Bottom 2 Possible Angle [%]	V Type PM Bottom Depth 2 Active Pole Radius [%]	V Type PM Area per Pole [mm <sup>2</sup> ]	
Flux Barriers Characteristics	Insert PM			V Magnet		
	Insert PM FB Width 2 Insert PM Width [%]	Insert PM FB Length 2 Insert PM Length [%]	V Type PM Top FB Left 2 Right Length [%]	V Type PM Top FB Right Length 2 V Type PM Length [%]	V Type PM Bottom FB Length 2 V Type PM Length [%]	V Type PM Bottom FB Arc Angle Bottom [deg]
Rotor Fillets	Saliency	Main Flux Barrier (Rotor Yoke) Fillets				
	Fillet [mm]	Main FB inner Fillet [mm]	Main FB Middle Fillet [mm]	Main FB Outer Fillet [mm]		
	Insert Flux Barrier			V Type PM		
	Insert PM Top Fillet [mm]	Insert PM Bottom Fillet [mm]	V Type PM Top & Left Fillet [mm]	V Type PM Top & Right Fillet [mm]		

Οι μεταβλητές (αυτές) που επιλέχθηκαν για το σκοπό της περιγραφής της γεωμετρίας του δρομέα δεν είναι οι μεταβλητές που τοποθετούνται απευθείας στην κλάση της μηχανής (MotorEntity Struct). Για το λόγο αυτό κατασκευάζεται μια νέα συνάρτηση στο MATLAB που λαμβάνει τις παραπάνω μεταβλητές ποσοστών και τις μετασχηματίζει στις απόλυτες μεταβλητές της κλάσης.

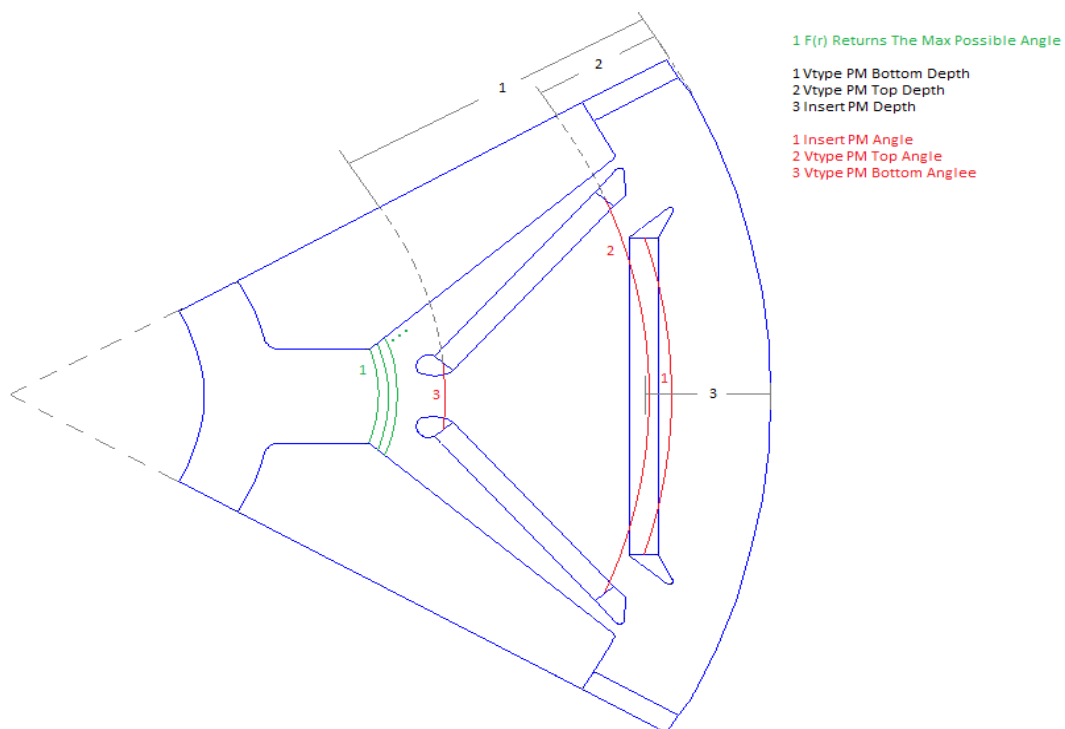


Σχ. 4.5.3. Σχηματική απεικόνιση της κατασκευής του δρομέα μέσω συναρτήσεων.

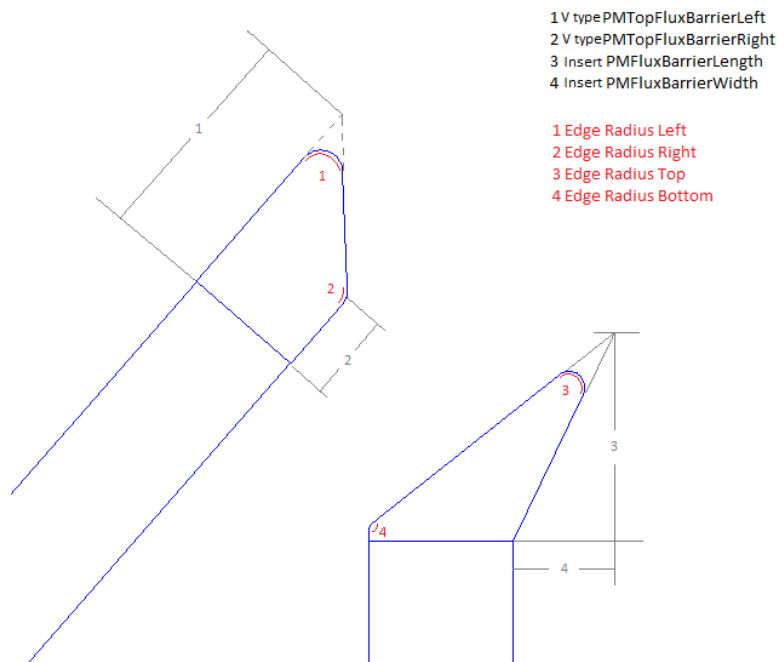
Για την αποτύπωση της γεωμετρικής σημασίας των ποσοσטיαίων μεταβλητών δίνονται τα παρακάτω σχήματα:



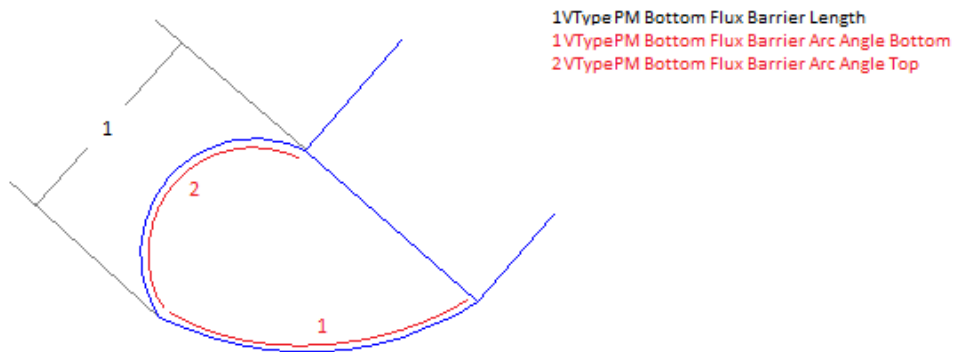
Σχ. 4.5.4. Σχήμα δόμησης της βασικής γεωμετρίας του δρομέα με βάση τις ποσοστικίες μεταβλητές.



Σχ. 4.5.5. Σχήμα δόμησης της θέσης και προσανατολισμού των μαγνητών Insert type και V type με βάση τις ποσοστικίες μεταβλητές.



Σχ. 4.5.6. Σχήμα απεικόνισης των φραγμάτων ροής με βάση τις ποσοστιαίες μεταβλητές. Για το πρώτο φράγμα ροής των τύπου V και τύπου Insert μαγνητών.



Σχ. 4.5.7. Σχήμα απεικόνισης του δεύτερου φράγματος ροής των μαγνητών τύπου V με βάση τις ποσοστιαίες μεταβλητές.

Οι συναρτήσεις που υλοποιούν την μετατροπή των σχετικών (ποσοστιαίων) μεταβλητών σε απόλυτες και στην συνέχεια με βάση αυτές υλοποιούν χωρίς λειτουργικά σφάλματα την γεωμετρία του δρομέα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων είναι αρκετά σύνθετες χωρίς ωστόσο μεγάλο ενδιαφέρον σε επίπεδο ανάλυσης μηχανών. Λόγο της πολυπλοκότητας, λοιπόν δεν παρέχονται στο κείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

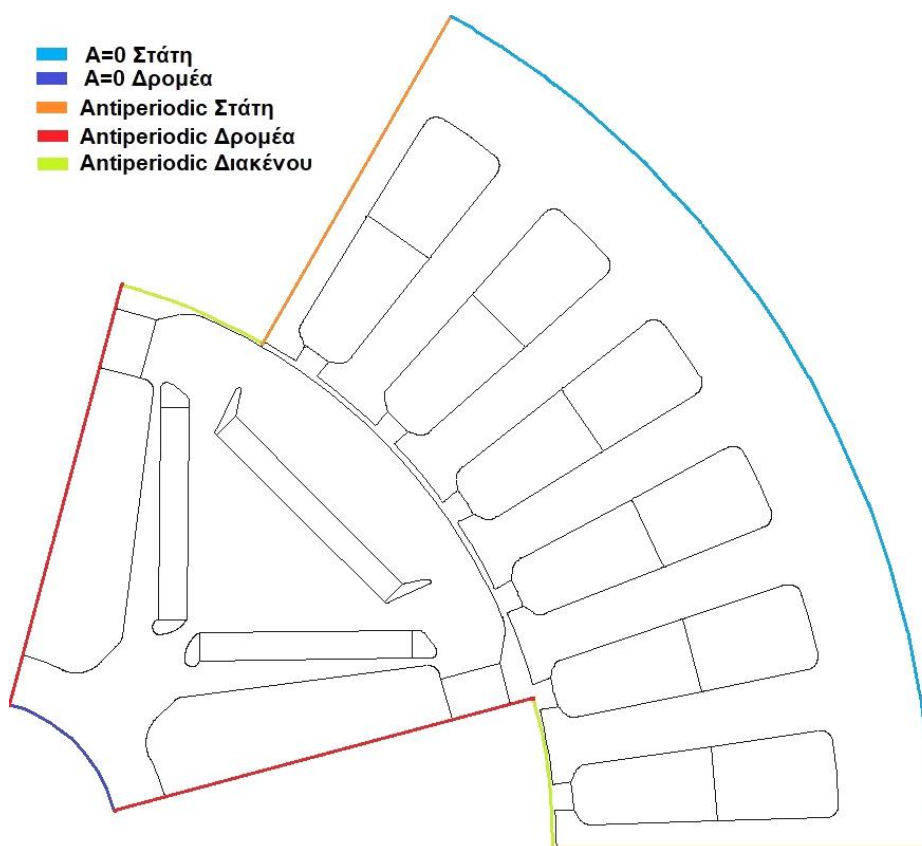
Η επιλογή των μεταβλητών σχεδίασης του δρομέα καθ' αυτόν τον τρόπο έγινε συνειδητά με απώτερο στόχο την σύνδεση μεγεθών ηλεκτρομαγνητισμού με τα μεγέθη της γεωμετρίας. Για παράδειγμα η συνολική ροή του δρομέα συντίθεται από δύο επιμέρους ροές, την ροή από τους μαγνήτες τύπου Insert και τύπου V, και τη ροή από τους μαγνήτες τύπου Spoke. Οι γεωμετρικές μεταβλητές "Active Length" και "Spoke Channel Width" είναι οι μεταβλητές που κατά κύριο λόγο μεταβάλλουν την επίδραση που έχουν οι επιμέρους, αυτές ροές, στην συνολική ροή του δρομέα.

#### 4.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΣΤΗΝ ΠΡΑΞΗ

Στο πρόγραμμα FEMM αφού τοποθετηθεί η γεωμετρία του στάτη, η τοποθέτηση των τυλιγμάτων, η γεωμετρία του δρομέα και η τοποθέτηση των μαγνητών, απαραίτητο είναι να ορισθούν οι οριακές συνθήκες του προβλήματος.

Όταν στο πρόγραμμα αναπαρίσταται ολόκληρη η γεωμετρία της μηχανής τότε οι οριακές συνθήκες είναι λίγες και τοποθετούνται κυρίως στο εσωτερικό του δρομέα (συνθήκη  $A=0$ ) και στο εξωτερικό του στάτη (συνθήκη  $A=0$ ).

Σε περίπτωση που επιθυμούμε να εκμεταλλευτούμε κάποια συμμετρία του προβλήματος απαραίτητο είναι να τοποθετηθούν και οι οριακές συνθήκες που το καθιστούν εφικτό. Τέτοιες συνθήκες είναι οι περιοδικές και οι αντιπεριοδικές ανάλογα με την φύση της συμμετρίας. Οι συνθήκες αυτές στην συγκεκριμένη μηχανή τοποθετούνται στα άκρα της γεωμετρίας του ενός πόλου ώστε να μην είναι απαραίτητο να επιλύσουμε ολόκληρη τη γεωμετρία.

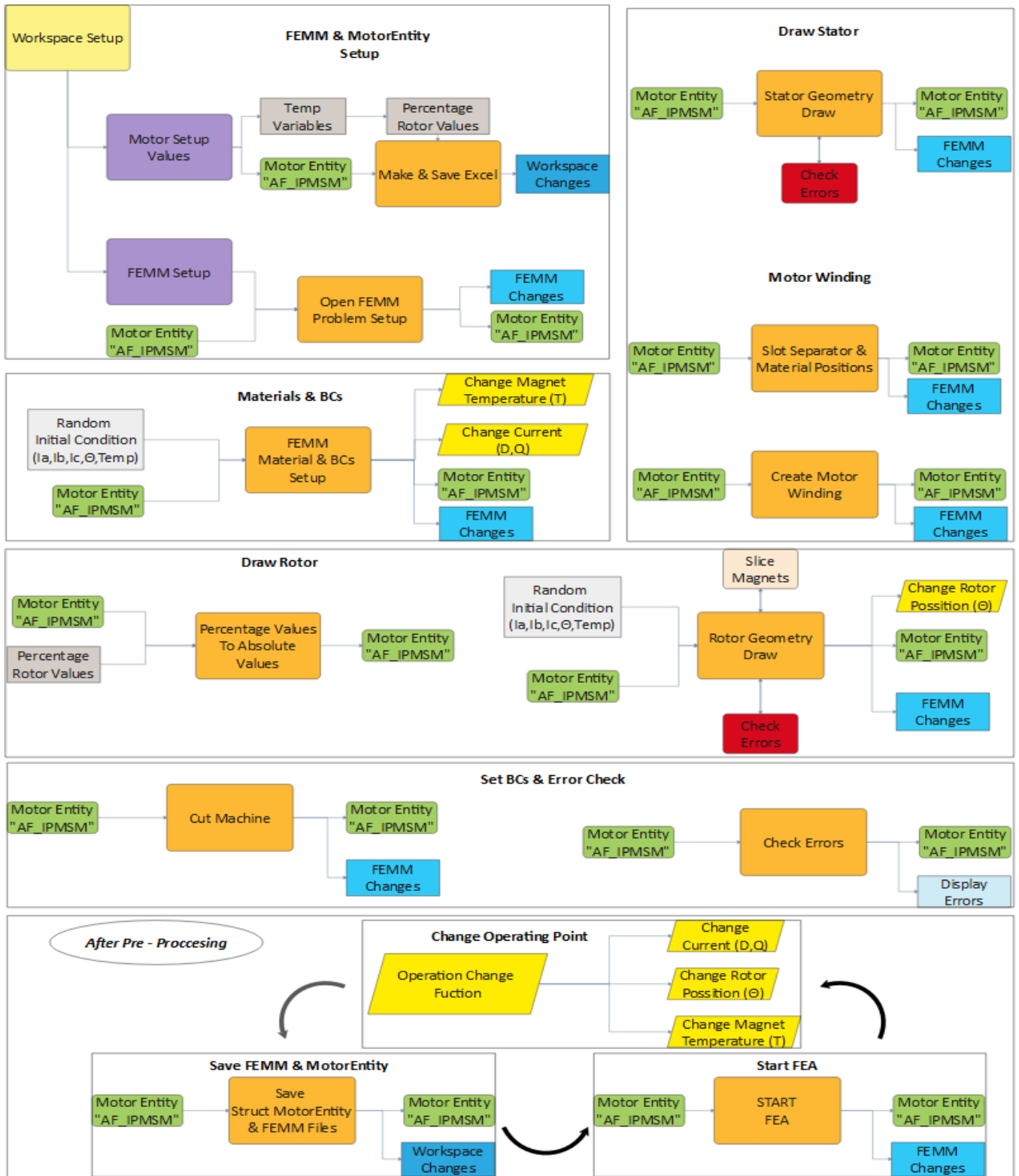


Σχ.4.6.1 Οριακές συνθήκες στο πρόγραμμα FEMM για το 1/6 της συνολικής γεωμετρίας της μηχανής.

Ο χρόνος υπολογισμού στην περίπτωση που δεν εκμεταλλευόμαστε τη συμμετρία αυξάνεται σχεδόν ανάλογα με το πλήθος των πόλων της μηχανής. Αυτό συμβαίνει διότι η εξάρτηση του πεδίου των κόμβων του ενός πόλου από το πεδίο στο πλέγμα ενός άλλου πόλου είναι ελάχιστη και συνεπώς οι πίνακες της Newton Raphson είναι αραιοί. Οι αραιοί πίνακες σπάζουν εν τέλει το πρόβλημα σε επιμέρους προβλήματα (όσοι οι πόλοι της μηχανής) ίδιας πολυπλοκότητας και για το λόγο αυτό η εξάρτηση του χρόνου εκτέλεσης είναι γραμμική.

Στον κώδικα MATLAB η συνάρτηση “Cut Machine” φροντίζει να τοποθετηθούν σωστά οι οριακές αυτές συνθήκες αφού πρώτα ελέγξει αν η γεωμετρία αναπαριστά ακριβώς έναν πόλο. Στην συνέχεια, η γεωμετρία αποθηκεύεται μαζί με την δομή MotorEntity.

Συνολικά η προ - επεξεργασία της μηχανής δίνεται σε Μπλοκ διάγραμμα.



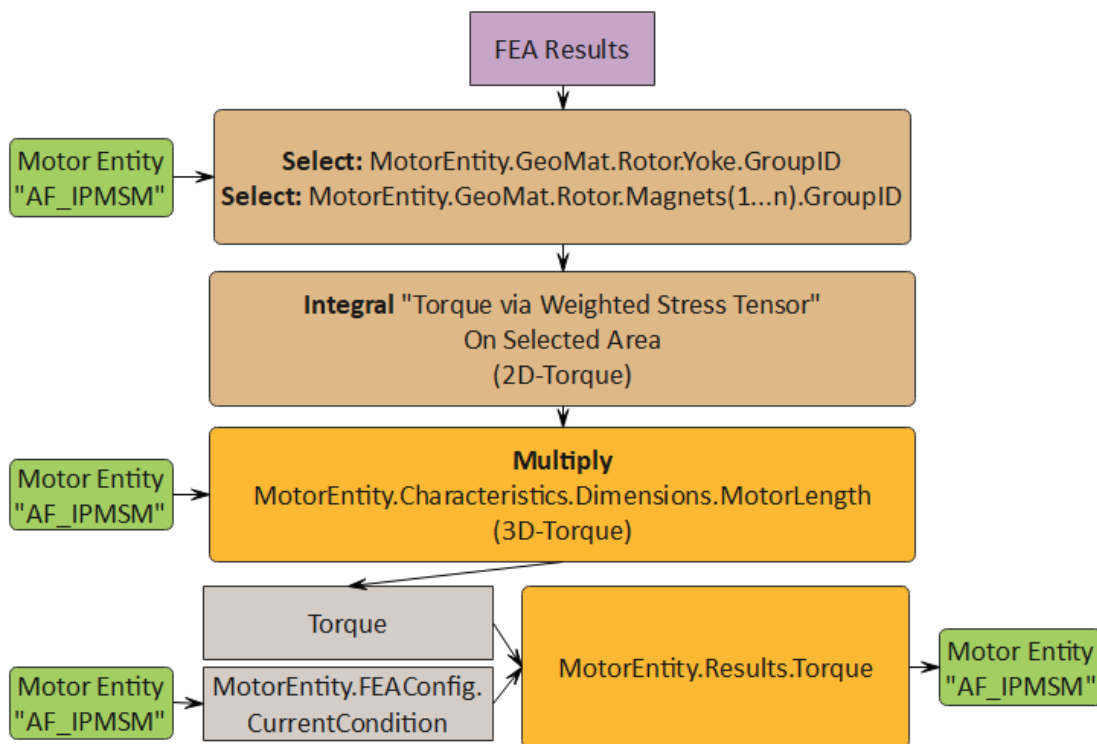
Σχ.4.6.2 Σχηματική αναπαράσταση αλγορίθμων προ επεξεργασίας. Το πορτοκαλί (και κόκκινο και μπλέ) συμβολίζουν συναρτήσεις, το μπλέ εξόδους- αλλαγές, το κίτρινο εισόδους, το πράσινο είναι η δομή MotorEntity ενώ το κίτρινο λοξό κωδικό είναι ετικέτες - δηλαδή συναρτήσεις που άμεσα τροποποιούν κάποιο χαρακτηριστικό.

## 4.7 ΜΕΤΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

### 4.7.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

Η επεξεργασία της μηχανής μέχρι την έναρξη της διαδικασίας υπολογισμού του διανυσματικού δυναμικού αφορά κυρίως τον ορισμό του μαγνητοστατικού προβλήματος. Η επίλυση ωστόσο του μαγνητοστατικού προβλήματος είναι σύνθετο πρόβλημα όπως περιγράφεται και στο κομμάτι θεωρίας του κεφαλαίου 2. Το αποτέλεσμα της λύσης του μαγνητοστατικού προβλήματος αποδίδει μια περιγραφή του πεδίου στην μηχανή. Αυτή η μικροσκοπική περιγραφή του πεδίου της μηχανής καθορίζει και την συνολική μακροσκοπική συμπεριφορά της. Η μετάβαση από τη γνώση του πεδίου της μηχανής στις επιδόσεις της μηχανής είναι μια διεργασία που απαραίτητο είναι να γίνει.

Η ροπή που η μηχανή αποδίδει στον άξονα της, όταν γνωρίζουμε το πεδίο στο εσωτερικό της, μπορεί να υπολογιστεί μέσω του πίνακα του MAXWELL. Στην πράξη για τον υπολογισμό της ροπής δεν είναι απαραίτητο να δημιουργήσουμε πολύπλοκους αλγόριθμους αφού δίνεται η δυνατότητα να μας την επιστρέφει το ίδιο το πρόγραμμα FEMM, όταν επιλέγουμε την περιοχή που υπάρχει η συνέργεια που αποδίδει ωφέλιμη ροπή (περιοχή του δρομέα).



Σχ.4.7.1.1 Βασικό διάγραμμα αλγορίθμου υπολογισμού ροπής. Με το καφέ χρώμα συμβολίζονται οι έτοιμες συναρτήσεις του FEMM ενώ με πορτοκαλί αυτές που αφορούν το MATLAB. Με πράσινο χρώμα δίνεται η δομή MotorEntity, με γκρι τα αριθμητικά στοιχεία και μωβ το περιβάλλον μετεπεξεργασίας του FEMM.

Η ροή στο τύλιγμα του δρομέα μπορεί να υπολογιστεί και αυτή σχετικά άμεσα. Στο πρόγραμμα FEMM ένα ακόμη άμεσα υπολογίσιμο ολοκλήρωμα είναι και η μέση τιμή του διανυσματικού πεδίου A. Η μέση τιμή του διανυσματικού πεδίου στο τύλιγμα επί το μήκος της μηχανής δίνει την μέση ροή που δέχεται κάθε αγωγός του τυλίγματος και συνεπώς η συνολική ροή του τυλίγματος προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό με τον αριθμό των αγωγών αυτού. Οι εξισώσεις που δείχνουν πώς στον υπολογισμό της ροής μεταβαίνουμε από το πεδίο B στο διανυσματικό δυναμικό A κάνοντας χρήση του θεωρήματος Stokes της διανυσματικής ανάλυσης δίνονται στη συνέχεια:

Διανυσματικό Δυναμικό:  $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$  (2.16)

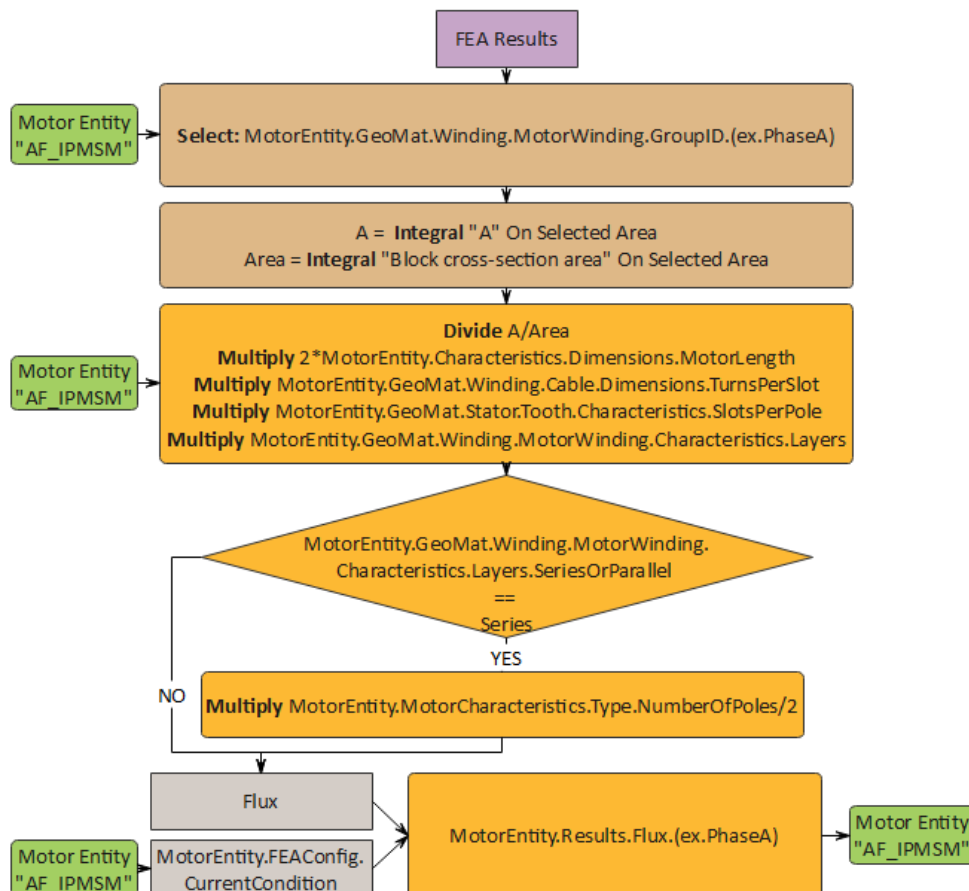
Ολοκλήρωμα Ροής:  $\Phi = \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$  (4.1)

Stokes' Theorem:  $\iint_S (\nabla \times \mathbf{F}) \cdot \hat{n} \, ds = \int_{\partial S} \mathbf{F} \, dl$  (4.2)

Υπολογισμός Ροής από το Διανυσματικό Δυναμικό:  $\Phi = \int_c \mathbf{A} \, dl = 2 \cdot \text{MotorLength} \cdot [\bar{\mathbf{A}}]_{\text{@Slot}}$  (4.3)

Για την εξαγωγή της (4.3) αρκεί να φανταστούμε την επιφάνεια που ολοκληρώνουμε στην (4.1). Η επιφάνεια αυτή, είναι ένα μέρος κυλινδρικής επιφάνειας με μήκος το μήκος της μηχανής, ανάμεσα σε δύο διαδοχικά αυλάκια, στα οποία διέρχεται ο αγωγός κάποιας φάσης. Το σύνορο αυτής της επιφάνειας είναι, τα δύο τα αυλάκια (καλώδιο χαλκού) και τα άκρα του τυλίγματος. Το πεδίο A στη δισδιάστατη προσομοίωση είναι κάθετο στο επίπεδο προσομοίωσης. Συνεπώς, το στοιχειώδες μήκος της κλειστής καμπύλης στα άκρα του τυλίγματος, είναι κάθετο στο πεδίο A και δεν συνεισφέρει στην ολοκλήρωση. Η μέση τιμή του πεδίου A στην αύλακα επί το μήκος της μηχανής είναι ένα από τα δύο άκρα της επιφάνειας που συνεισφέρουν στην ολοκλήρωση, ενώ το άλλο άκρο είναι πλήρως συμμετρικό με αυτό. Τελικά η σχέση (4.3) είναι ικανή να δώσει ως αποτέλεσμα μια τιμή της ροής πολύ κοντά στην πραγματική.

Ο αλγόριθμος σχηματικά δίνεται παρακάτω:



Σχ.4.7.1.2 Βασικό διάγραμμα υπολογισμού ροής. Η χρωματική σημασία διατηρείται ίδια με το σχήμα 4.6.1. Ο αλγόριθμος αυτός επιδρά σε κάθε φάση ξεχωριστά.

Η Back EMF σύμφωνα με τη θεωρία προκύπτει από τη μεταβολή (ως προς το χρόνο) στη ροή που αντιλαμβάνεται το τύλιγμα της εκάστοτε φάσης. Για να την υπολογίσουμε αρκεί να δούμε πώς μεταβάλλεται η ροή σε δύο διαδοχικά στιγμιότυπα».

$$\text{BackEMF} = -\frac{d\lambda}{dt} = -\frac{d\lambda}{d\theta_m} \cdot \frac{d\theta_m}{dt} = -2\pi f_m \cdot \frac{d\lambda}{d\theta_m} = 2\pi f_m \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\theta_{m1} - \theta_{m2}} \quad (4.4)$$

$$\text{BackEMF}_{\text{Nominal}} = -2\pi f_{m\text{Nominal}} \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\theta_{m1} - \theta_{m2}} \quad (4.5)$$

Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν μελετά σε βάθος την μεταβολή της Back EMF σε μη σταθερές λειτουργικές καταστάσεις, και για το λόγο αυτό το ενδιαφέρον περιορίζεται μόνο στην ονομαστική ταχύτητα περιστροφής (4.5). Η ροή είναι γνωστή σύμφωνα με τον αλγόριθμο υπολογισμού της καθώς επίσης και η γωνία που έχει ο δρομέας σε κάθε κατάσταση που αναλύεται η μηχανή, συνεπώς η εφαρμογή του τύπου (4.5) είναι αρκετά απλή.

#### 4.7.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΗΧΑΝΗΣ

Ο δρομέας σύμφωνα με την κατασκευή του, από τις συναρτήσεις προ επεξεργασίας, τοποθετείται με τυχαίο προσανατολισμό. Επίσης, το τύλιγμα εξαιτίας του γεγονότος ότι είναι κατανομημένο, δεν γνωρίζουμε εκ των προτέρων τη γωνία του άξονα στον οποίο η φάση A λαμβάνει τη μέγιστη ροή από το δρομέα. Το κυρίαρχο ενδιαφέρον δεν εντοπίζεται στον προσανατολισμό των δύο αυτών αξόνων στο χώρο, αλλά στην σχετική θέση που έχουν μεταξύ τους.

Ξεχωριστά τα πεδία του δρομέα και του στάτη μπορούν να περιγραφούν σε δύο πλαίσια DQ:

- Ο δρομέας έχει ροή μόνο στον άξονα d και συνεπώς ο άξονας d του πλαισίου dq οφείλει να είναι ο άξονας του δρομέα.
- Στον στάτη κατά τον μετασχηματισμό dq η γωνία του πλαισίου ταυτίζεται με αυτή της φάσης A αφού τότε συναντάται η μέγιστη ροή στον άξονα d και μηδενική στον άξονα q.

Για την ανάλυση της μηχανής από ένα πλαίσιο dq η ευθυγράμμιση του άξονα δρομέα και του άξονα της φάσης A είναι απαραίτητη. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια ενός πειράματος κενού φορτίου.

Στο πείραμα αυτό, θέτουμε μηδενικά ρεύματα στον στάτη, και στρέφουμε τον δρομέα με σταθερό βήμα αρκετά μικρό για μία ηλεκτρική περίοδο. Διαδοχικά λαμβάνουμε τις τιμές των ροών των τυλιγμάτων. Όταν ο μετασχηματισμός DQ με  $\theta=0$ , παρουσιάσει τη μέγιστη δυνατή ροή στον άξονα d τότε ο άξονας του δρομέα έχει ευθυγραμμιστεί με τον άξονα της φάσης A και συνεπώς η γωνία αυτή αποθηκεύεται και ο δρομέας, τοποθετείται με αυτόν τον προσανατολισμό. Σε περίπτωση που επιθυμούμε να μεταβάλουμε τον δρομέα για μια «σύγχρονη περιστροφή», ο δρομέας θα ξεκινά από τη γωνία αυτή.

Γενικά, το ρεύμα της μηχανής στο πλαίσιο dq σχηματίζει γωνία  $\varphi$  με τον άξονα d και διαθέτει κάποιο πλάτος. Η γωνία αυτή και το πλάτος του ρεύματος (Current Amplitude) σχηματίζουν την λειτουργική κατάσταση (Angle, Amplitude). Η λειτουργική κατάσταση αυτή είναι ανεξάρτητη από τη γωνία του δρομέα ή τη γωνία της φάσης A, αλλά εξαρτάται από τη μεταξύ τους γωνία.



Συνεπώς, η γωνία του δρομέα μπορεί να γραφεί ως συνάρτηση της γωνίας του ρεύματος της φάσης A.

$$f_e = \frac{P}{2} f_m \Rightarrow \frac{d\theta_e^{Phase A}}{dt} = \frac{P}{2} \cdot \frac{d\theta_m^{Rotor}}{dt} \Rightarrow \quad (4.6)$$

$$\Rightarrow \int_{t=t_0}^t \frac{d\theta_e^{Phase A}}{d\tau} d\tau = \frac{P}{2} \cdot \int_{t=t_0}^t \frac{d\theta_m^{Rotor}}{d\tau} d\tau \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \theta_e^{Phase A}(t) = \frac{P}{2} \cdot \theta_m^{Rotor}(t) + \left[ \theta_e^{Phase A}(t=t_0) - \frac{P}{2} \cdot \theta_m^{Rotor}(t=t_0) \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \theta_e^{Phase A}(t) = \frac{P}{2} \cdot \theta_m^{Rotor}(t) + \varphi \quad (4.7)$$

Αφού για κάθε χρονική στιγμή κατά τη συγκεκριμένη λειτουργική κατάσταση ισχύει:

$$\begin{cases} \theta_e^{Phase A}(t=t_0) = \theta_{dq Frame}^{d-axis}(t=t_0) + \varphi \\ \frac{P}{2} \cdot \theta_m^{Rotor}(t=t_0) = \theta_{dq Frame}^{d-axis}(t=t_0) \end{cases} \quad (4.8)$$

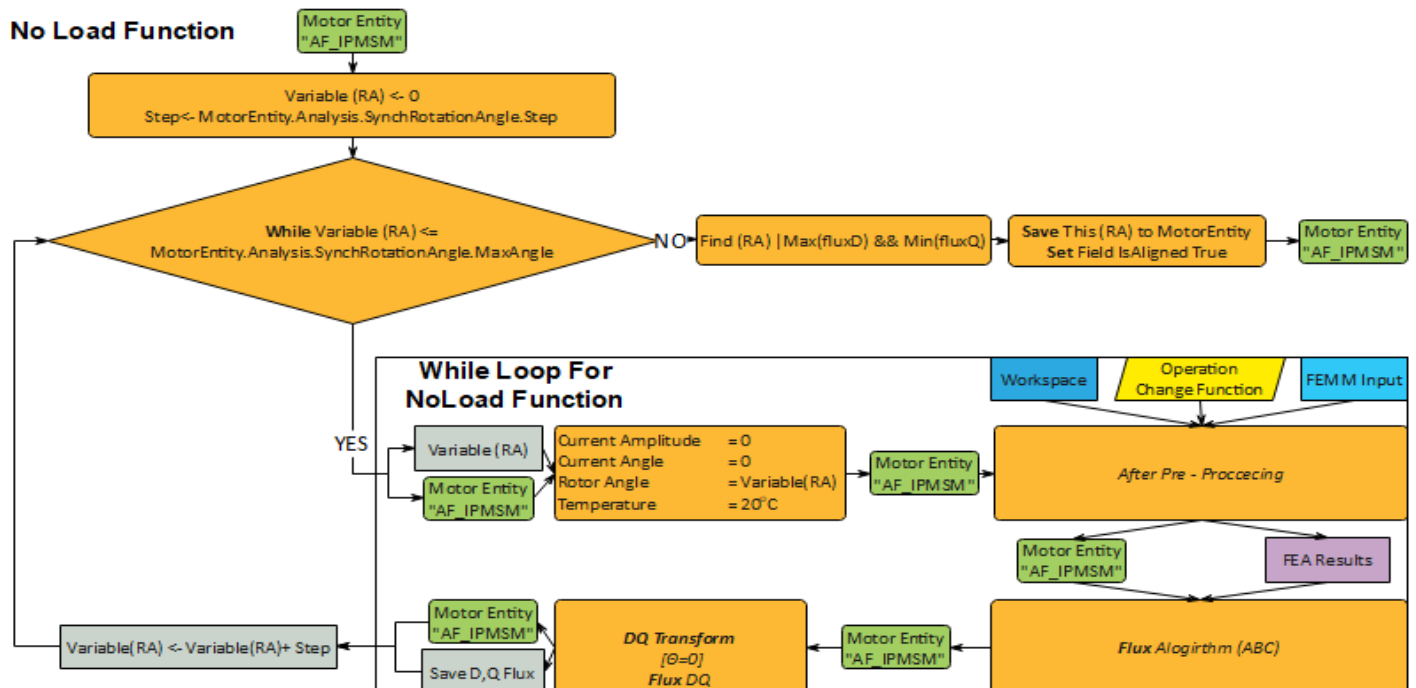
Οι παραπάνω συνθήκες περιγράφουν τη θέση της γωνίας του ρεύματος στο πλαίσιο dq και συνεπώς της γωνίας της φάσης A (4.8.α) και τη θέση του δρομέα στο πλαίσιο dq (4.8.β).

Συνεπώς, η ανάλυση της μηχανής απαιτεί τρία στοιχεία: το πλάτος του ρεύματος (Current Amplitude), τη γωνία του ρεύματος  $\varphi$  (Current Angle) με τον άξονα d και τη σύγχρονη γωνία περιστροφής  $\Theta$  (Synchronous Rotation Angle).

Σύμφωνα με τη γωνία  $\Theta$  η σχέση (4.8) γίνεται:

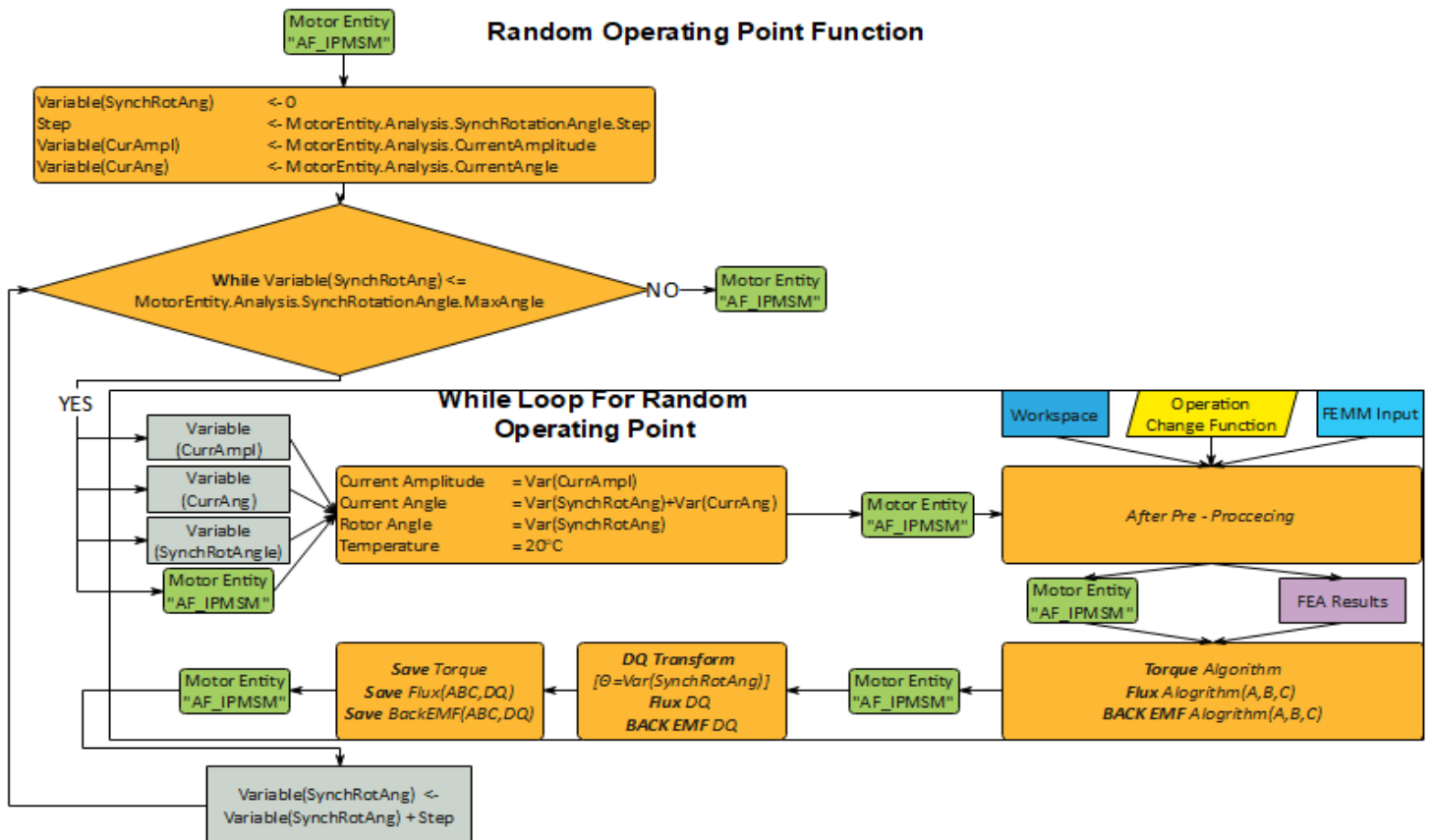
$$\begin{cases} \theta_m^{Rotor} = \frac{2}{P} \cdot \theta \\ \theta_e^{Phase A} = \theta + \varphi \end{cases} \quad (4.9)$$

Παρακάτω δίνεται ένα διάγραμμα της ανάλυσης κενού φορτίου για την ευθυγράμμιση του άξονα d του δρομέα με αυτόν της φάσης A.



Σχ.4.7.2.1 Σχηματικό διάγραμμα αλγορίθμου Κενού Φορτίου.

Πιο κάτω δίνεται μια εικόνα για την ανάλυση των μεγεθών της μηχανής όταν αυτή λειτουργεί σε μία τυχαία λειτουργική κατάσταση (Current Amplitude, Current Angle) υπό οποιαδήποτε σύγχρονη γωνία περιστροφής.



Σχ.4.7.2.2 Σχηματικό διάγραμμα αλγορίθμου Ανάλυσης τυχαίου σημείου λειτουργίας ( $I, \varphi$ ).

#### 4.7.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ

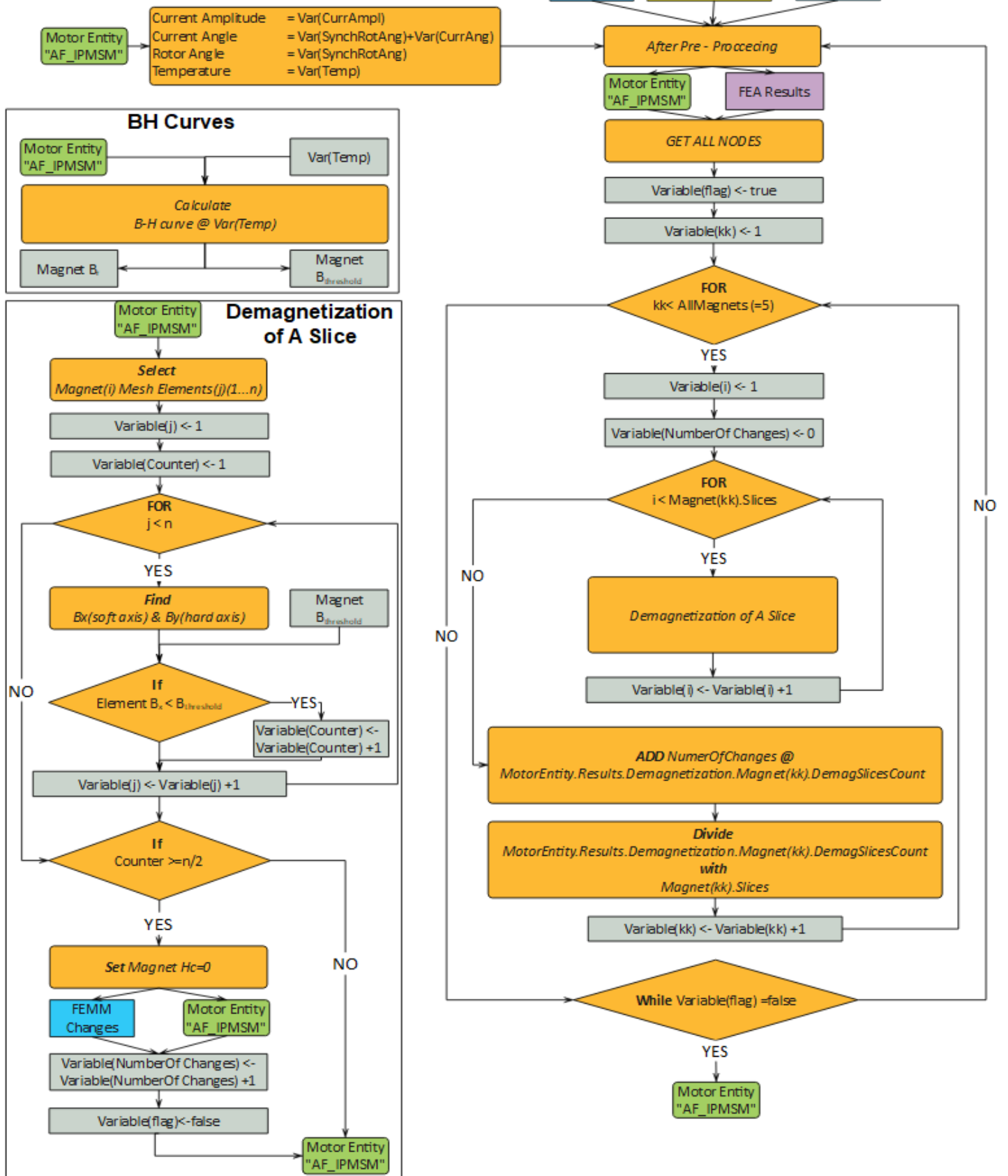
Το κυρίως μέρος της παρούσας διπλωματικής είναι ο υπολογισμός της απομαγνήτισης με τη χρήση κατάλληλων αλγορίθμων. Όπως ειπώθηκε και στο θεωρητικό κεφάλαιο της εργασίας ο αλγόριθμος που επιλέγεται για τον υπολογισμό της απομαγνήτισης είναι αυτός του “Limited Model”.

Το FEMM δίνει τη δυνατότητα να εισάγουμε τα χαρακτηριστικά του κάθε σημείου του πλέγματος στο περιβάλλον του MATLAB, και στην συνέχεια να υπολογίσουμε με βάση τα χαρακτηριστικά αυτά οτιδήποτε επιθυμούμε. Ωστόσο, η μετάβαση στοιχείων του πλέγματος στον MATLAB είναι αρκετά χρονοβόρα διαδικασία ειδικά όταν τα στοιχεία του πλέγματος είναι πολλά.

Όταν διαθέτουμε τα ηλεκτρομαγνητικά χαρακτηριστικά κάθε σημείου του πλέγματος μπορούμε με ευκολία να διαπιστώσουμε αν τα στοιχεία του πλέγματος που βρίσκονται εντός του χωρίου των μαγνητών (έχουν ετικέτα ομάδας την ομάδα του μαγνήτη) βρίσκονται ή όχι στην γραμμική περιοχή λειτουργίας του μαγνητικού υλικού όταν αυτό βρίσκεται στην εκάστοτε δεδομένη θερμοκρασία.

Σε περίπτωση που κάποιο σημείο του μαγνήτη βρίσκεται εκτός των ορίων της καμπύλης B-H του μαγνήτη η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων οφείλει να ξαναγίνει από την αρχή μηδενίζοντας τη παραμένουσα μαγνήτιση του σημείου αυτού. Στη συνέχεια δίνεται σε διάγραμμα Block ο αλγόριθμος ανάλυσης της απομαγνήτισης με το περιορισμένο μοντέλο “Limited Model”.

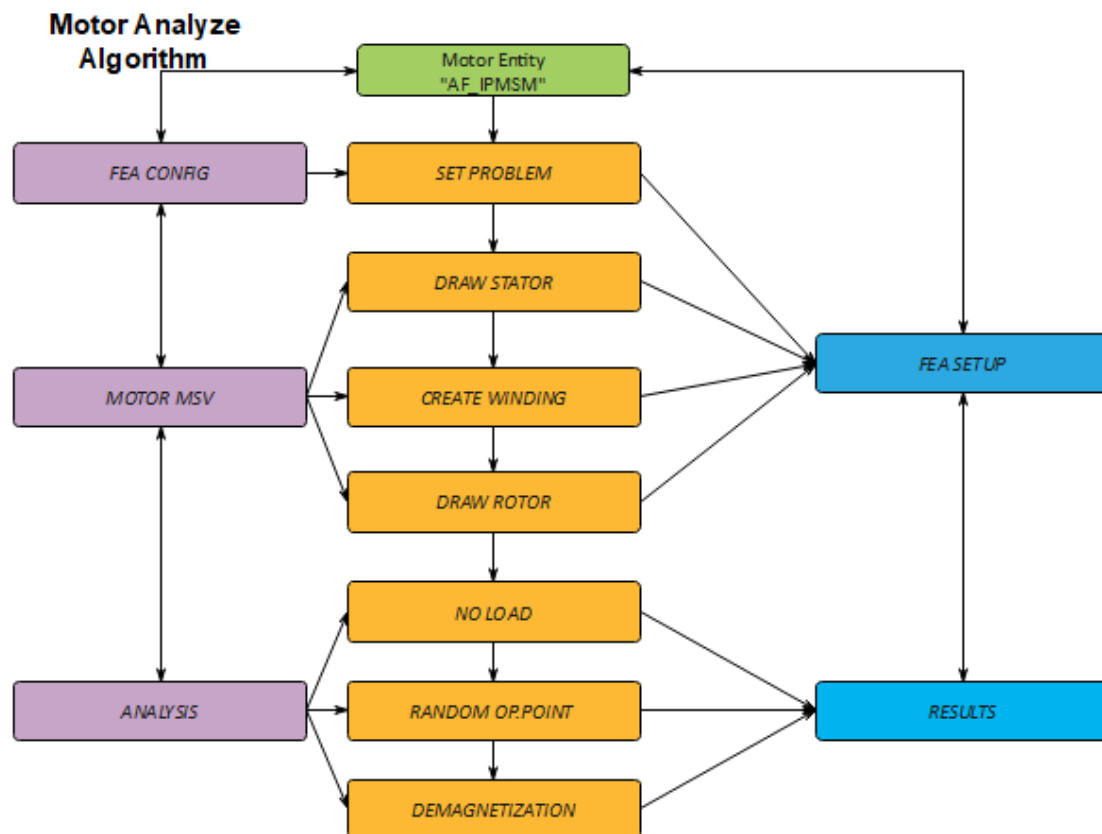
### Limited Model Algorithm



Σχ.4.7.3.1. Διάγραμμα λειτουργίας του περιοριστικού μοντέλου. Ο κάθε μαγνήτης στην γεωμετρία έχει χωριστεί σε πολλές μικρές φέτες (Slices).

Στον προσδιορισμό των συνθηκών λειτουργίας της μηχανής, εμπλέκεται ενεργά και η τιμή της θερμοκρασίας στην οποία βρίσκονται οι μαγνήτες. Η λειτουργική κατάσταση λοιπόν της μηχανής περιγράφεται από τρεις μεταβλητές ( $I, \phi, Temp$ ). Αν θέλουμε να έχουμε όμως ένα πιο στατιστικά ορθό αποτέλεσμα οφείλουμε να εκτελέσουμε και τη σύγχρονη περιστροφή, δρομέα - ρευμάτων στάτη, στην εκάστοτε λειτουργική κατάσταση. Τελικά, για κάποια ορισμένη λειτουργική κατάσταση ο αλγόριθμος υπολογισμού της απομαγνήτισης με βάση το περιοριστικό μοντέλο μπορεί να υπολογίσει το ποσοστό που έχουν απομαγνητιστεί οι μαγνήτες στον δρομέα.

Ο συνολικός αλγόριθμος ως δομική απεικόνιση δίνεται παρακάτω.



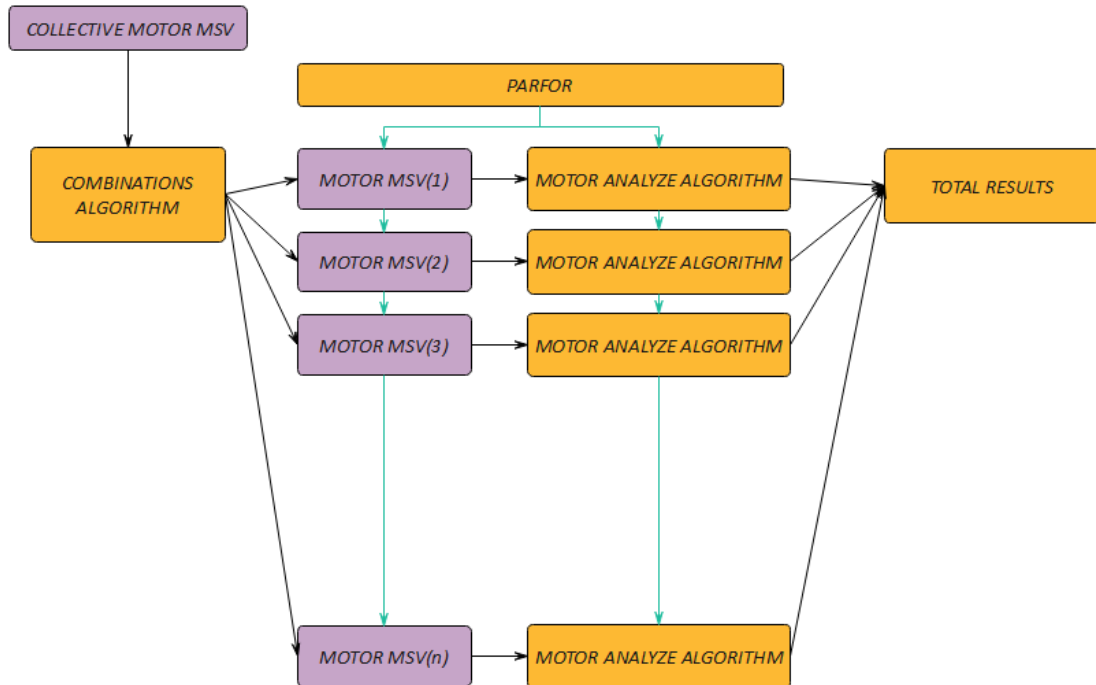
Σχ.4.7.3.2 Συνολικό Διάγραμμα των βασικών αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της μηχανής. Το χρώμα Μωβ είναι οι εισοδοί, το πορτοκαλί είναι αλγόριθμοι επεξεργασίας, και το Μπλε τα αποτελέσματα. Όλα αυτά είναι μέρος της ολότητας της μηχανής (Πράσινο) "MotorEntity".

#### 4.8 ΠΑΡΑΛΛΗΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΩΔΙΚΑ

Στην περίπτωση που επιθυμούμε να κάνουμε αναζήτηση στο πεδίο ορισμού των μεταβλητών, ώστε να αποτυπώσουμε μια εικόνα της εξάρτησης των χαρακτηριστικών της μηχανής από τις μεταβλητές σχεδιασμού, απαραίτητο είναι να δημιουργηθεί μια συνάρτηση που με ευκολία να δημιουργεί συνδυασμούς τιμών μεταβλητών εισόδου. Η ύπαρξη πολλών μηχανών με ορισμένα χαρακτηριστικά ελαφρώς αλλαγμένα, μπορεί να δημιουργηθεί παρέχοντας ένα πίνακα τιμών στο προς διαφοροποίηση χαρακτηριστικό και στην συνέχεια με βάση του συνδυαστικού αλγορίθμου να δημιουργηθούν κατάλληλου πλήθους μηχανές.

Η επεξεργασία πολλών μηχανών με βάση την δομή MotorEntity και την υλοποίηση των αλγορίθμων επεξεργασίας, μπορεί να γίνει μέσω του MATLAB σύμφωνα με την

εντολή PARFOR. Η ανάθεση της ανάλυσης της εκάστοτε μηχανής γίνεται σε κάθε επεξεργαστικό πυρήνα ξεχωριστά και συνεπώς μπορεί να επιτευχθεί πλήρης παράλληλα. Η συνολική ανάλυση των επιδόσεων με βάση τα διαφοροποιημένα χαρακτηριστικά μπορεί να γίνει στο τέλος αφού συγκεντρωθούν όλες οι επιμέρους αναλύσεις. Ένα ενδεικτικό διάγραμμα που περιγράφει την φιλοσοφία της παράλληλης ανάλυσης μηχανών δίνεται παρακάτω:



Σχ.4.8.1. Ενδεικτική υλοποίηση παράλληλης επεξεργασίας μηχανών με ελαφρώς διαφοροποιημένα χαρακτηριστικά.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

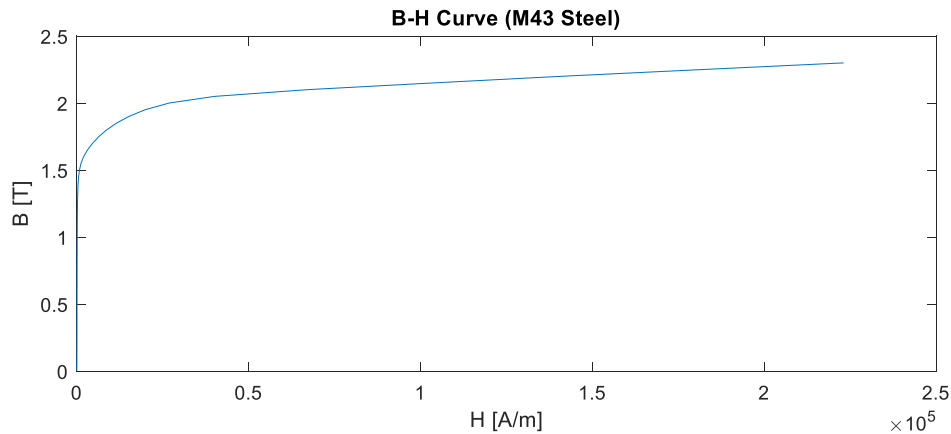
### ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

#### 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται αριθμητικά οι σύγχρονοι ηλεκτρικοί κινητήρες μονίμων μαγνητών με δρομέα τριών διαφορετικών ειδών τοποθέτησης μαγνητών ως προς τις επιδόσεις τους και ως προς την ικανότητα αντοχής στην απομαγνήτιση. Για να γίνει αυτός ο αριθμητικός προσδιορισμός των αποτελεσμάτων αρχικά δίνονται πιο αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιούνται.

#### 5.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΗΣ

Οι ιδιότητες του υλικού του πυρήνα συνθέτουν την συμπεριφορά του πεδίου στην μηχανή, διότι είναι το υλικό στο οποίο γίνεται ισχυρή ενίσχυση του πεδίου μέσω της μεγάλης διαπερατότητας που έχει. Στο υλικό του πυρήνα ωστόσο υπάρχει και το φαινόμενο της υστέρηση που συμβάλλει στην μείωση της απόδοσης της μηχανής. Η περιγραφή αυτών των χαρακτηριστικών είναι λοιπόν καθοριστικής σημασίας για τη λειτουργία της μηχανής. Παρακάτω δίνεται το γράφημα της καμπύλης B-H που χρησιμοποιεί το FEMM,



Σχ.5.2.1. Η Καμπύλη B-H λαμαρίνας M43

Στη συνέχεια ακολουθούν και ορισμένες τιμές που με βάση αυτές προκύπτει μια εκτίμηση των απωλειών του πυρήνα και του χαλκού καθώς και το συνολικό βάρος της μηχανής. Οι τιμές αυτές και η συνολική απόδοση της μηχανής δεν τίθεται προς διερεύνηση στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Material	Conductivity ( $\sigma$ )[S*10 <sup>6</sup> /m]	Density ( $\rho$ )[g/cm <sup>3</sup> ]	Eddy Current Coef. (ce)[Watt/(lb*T <sup>2</sup> *Hz <sup>2</sup> )]	Hysteresis Coefficient (ch)[Watt/(lb*T <sup>2</sup> *Hz)]	Temperature Coef. (a)[K <sup>-1</sup> ]
Copper (Cu)	58	8,93	—	—	3,81*10 <sup>(-3)</sup>
Core Iron(M43 Steel)	10	7,87	31,2*10 <sup>(-6)</sup>	0,00844	5*10 <sup>(-3)</sup>

Σχ.5.2.2.Οι τιμές των συντελεστών δινορρευμάτων, και απωλειών υστέρησης καθώς και η αγωγιμότητα των υλικών μαζί με την επίδραση της στην θερμοκρασία. Τέλος, δίνεται και η τιμή της πυκνότητας των υλικών.

Ένα ακόμα υλικό, το οποίο απαιτεί πληθώρα στοιχείων για να χαρακτηριστεί είναι, όπως φάνηκε και από τη θεωρία, οι μαγνήτες. Στους μαγνήτες απαραίτητο είναι να μπορεί σε κάθε θερμοκρασία να εξαχθεί η καμπύλη B-H που χαρακτηρίζει τον μαγνήτη. Για το λόγο αυτό, δίνονται οι τιμές της παραμένουσας τιμής του πεδίου B, η τιμή της jH<sub>c</sub>, η τιμή της H<sub>c</sub>, η μέγιστη ενέργεια του μαγνήτη, καθώς επίσης και η

εξάρτηση αυτών από τη θερμοκρασία. Στην παρούσα εργασία, ερευνήθηκαν μαγνήτες στους οποίους τα χαρακτηριστικά αυτά είναι διαθέσιμα στο διαδίκτυο και είναι αρκετά εμπορικοί. Στην συνέχεια δίνεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηριστικών μαγνητών που κρίθηκαν ικανοί προς μελέτη στην συγκεκριμένη εργασία.

Ferrite							
Conductivity ( $\sigma$ ) [ $S \cdot 10^6/m$ ]		Density ( $\rho$ ) [ $g/cm^3$ ]			Permeability ( $\mu_r$ )		
10 <sup>-8</sup>		5			1,375		
Material	Br [mT] (20°C)	Hc (Hcb) [kA/m] (20°C)	Hci (Hcj) [kA/m] (20°C)	Bhmax [kJ/m <sup>3</sup> ] (20°C)	Rev. Temp. Coef. Of Induction (a) [%/C]	Rev. Temp. Coef. Of Intrinsic Coercivity (b) [%/C]	Max. Working Temperature (Tmax) [C]
Y40	440-460	330-354	340-360	37.5-41.8	-0,2	0,27	250
Y33H	410-430	250-270	250-275	31.5-35	-0,2	0,27	250
Y28H-2	360-380	271-295	382-405	26-30	-0,2	0,27	250
NdFeB							
Conductivity ( $\sigma$ ) [ $S \cdot 10^6/m$ ]		Density ( $\rho$ ) [ $g/cm^3$ ]			Permeability ( $\mu_r$ )		
0,667		7,5			1,045		
Material	Br [mT] (20°C)	Hc (Hcb) [kA/m] (20°C)	Hci (Hcj) [kA/m] (20°C)	Bhmax [kJ/m <sup>3</sup> ] (20°C)	Rev. Temp. Coef. Of Induction (a) [%/C]	Rev. Temp. Coef. Of Intrinsic Coercivity (b) [%/C]	Max. Working Temperature (Tmax) [C]
N40	1240	923	955	302	-0,120	-0,700	80
N52	1430	796	875	398	-0,120	-0,700	80
N45M	1320	875	1114	342	-0,115	-0,650	100
N50M	1400	1035	1114	382	-0,115	-0,650	100
N42UH	1280	875	1989	318	-0,100	-0,550	180
N50H	1400	995	1353	382	-0,110	-0,600	120
SmCo							
Conductivity ( $\sigma$ ) [ $S \cdot 10^6/m$ ]		Density ( $\rho$ ) [ $g/cm^3$ ]			Permeability ( $\mu_r$ )		
1,18		8,4			1,075		
Material	Br [mT] (20°C)	Hc (Hcb) [kA/m] (20°C)	Hci (Hcj) [kA/m] (20°C)	Bhmax [kJ/m <sup>3</sup> ] (20°C)	Rev. Temp. Coef. Of Induction (a) [%/C]	Rev. Temp. Coef. Of Intrinsic Coercivity (b) [%/C]	Max. Working Temperature (Tmax) [C]
SmCo16(1:5)	810-850	620-660	1194-1830	110-127	-0,05	-0,3	250
SmCo24(1:5)	960-1000	730-770	1194-1830	175-190	-0,05	-0,3	250
SmCo22S(1:5)	920-960	710-750	7433-2000	160-175	-0,045	-0,28	250
SmCo30L(2:17)	1080-1150	557-795	636-955	220-240	-0,035	-0,2	250
SmCo30M(2:17)	1080-1100	716-835	955-1273	220-240	-0,035	-0,2	300
SmCo30H(2:17)	1080-1100	788-835	>1990	220-240	-0,035	-0,2	350

Σχ.5.2.3 Συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηριστικών μαγνητών. Ο πίνακας περιέχει μαγνήτες Νεοδυμίου, Σαμάριου και Φερρίτη.

### 5.3 ΤΟ ΕΙΔΟΣ ΜΑΓΝΗΤΗ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΤΙΣ ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ

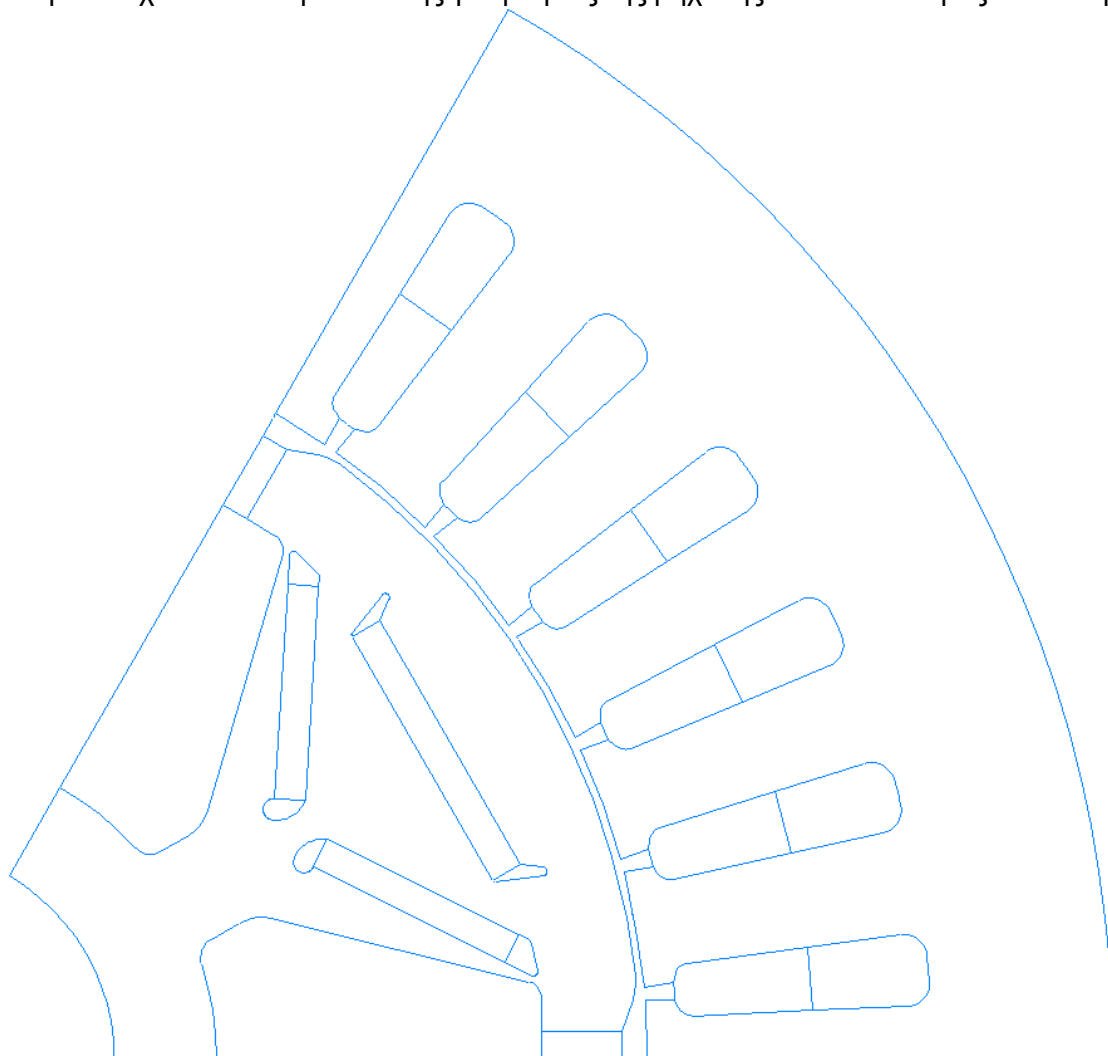
Για τη μελέτη των διαφορών που προκύπτουν από την επιλογή του μαγνήτη, τόσο στις επιδόσεις όσο και στην απομαγνήτιση της μηχανής, επιλέχθηκε να διεξαχθεί ένα πείραμα προσομοιώσεων, ανάμεσα σε μηχανές ακριβώς ίδιας εγκάρσιας (κάθετη στον άξονα) γεωμετρίας δρομέα και στάτη, με διαφορετικό ενεργό μήκος και διαφορετικό υλικό μαγνήτη, που επιτυγχάνουν την ίδια μέση τιμή ροπής για το ίδιο μέτρο ρεύματος στάτη.

Η σύγκριση είναι εύλογο να γίνεται σε μαγνήτες παραπλήσιων ιδιοτήτων. Στην περίπτωση που γίνεται σύγκριση ανάμεσα σε κινητήρες ίδιων επιδόσεων, οι οποίοι χρησιμοποιούν πολύ διαφορετικά υλικά μαγνητών, τότε οι γεωμετρίες των κινητήρων, συνήθως είναι εξαρχής πολύ διαφορετικές.

Στο πείραμα αυτό, εφόσον δεν μεταβάλλεται η γεωμετρία του δρομέα, όταν χρησιμοποιούμε διαφορετικό είδος μαγνήτη, μεταβάλλουμε τη μέση τιμή του πεδίου στο διάκενο και συνεπώς η επίδοση στην ροπή μεταβάλλεται. Για να διατηρήσουμε την τιμή της ροπής σταθερή και ταυτόχρονα να μην επηρεάζει η γεωμετρία την συμπεριφορά της μηχανής στην απομαγνήτιση, αποφασίστηκε να μεταβάλλεται μόνο το ενεργό μήκος της μηχανής. Με αυτόν τον τρόπο, τα αποτελέσματα της απομαγνήτισης οφείλονται κυρίως στην αλλαγή του υλικού μαγνήτη.

Τέλος, απαραίτητο είναι να αναφερθεί πως το υλικό των μαγνητών επηρεάζει και τον κορεσμό στο υλικό του πυρήνα κυρίως στις επιδόσεις της μηχανής. Όταν γίνεται η μελέτη της απομαγνήτισης, τα πεδία του στάτη και του δρομέα πρακτικά είναι αντίρροπα, με πολύ μεγαλύτερο αυτό του στάτη, συνεπώς η επίπτωση του υλικού των μαγνητών στον κορεσμό είναι μικρή.

Στην συνέχεια δίνεται η εικόνα της γεωμετρίας της μηχανής που τίθεται προς ανάλυση.



Σχ.5.3.1 Εικόνα της γεωμετρίας ενός πόλου της μηχανής που χρησιμοποιείται για την ανάλυση διαφόρων ειδών μαγνητών.



### 5.3.1 ΜΗΧΑΝΗ ΜΕ ΜΑΓΝΗΤΕΣ ND52

Η πρώτη μηχανή που αναλύεται είναι η μηχανή η οποία έχει μόνο μαγνήτες τύπου ND52. Ο γενικός πίνακας των χαρακτηριστικών της δίνεται στη συνέχεια.

ND52						
Magnetic Materials (A)	Remanence (Br)[T] (20°C)	Coercivity (Hcb)[kA/m] (20°C)	Intrinsic Coercivity (Hci)[kA/m] (20°C)	Energy (BHmax)[MGOe] (20°C)	Permeability (μr)	
	Spoke Magnet	1,43	796	875	52	1,045
	V Type Magnet	1,43	796	875	52	1,045
	Insert Magnet	1,43	796	875	52	1,045
Magnetic Materials (B)	Rev. Temp. Coef. Of Induction (a)[%/C]	Rev. Temp. Coef. Of Intrinsic Coercivity (b)[%/C]	Max. Working Temperature (Tmax)[C]	Conductivity (σ)[S*10 <sup>6</sup> /m]	Density (ρ)[g/cm <sup>3</sup> ]	
	Spoke Magnet	-0,12	-0,7	80	0,667	7,65
	V Type Magnet	-0,12	-0,7	80	0,667	7,65
	Insert Magnet	-0,12	-0,7	80	0,667	7,65
Motor General Characteristics	Poles	Phases	Nominal Current Density (Inom)[A/mm <sup>2</sup> ]	Lamination Factor (cs)[%]	Fill Factor (ff)[%]	
	6	3	4	95	60	
	Air Gap Length (Lg)[mm]	Rotor Inner Radius (Rri)[mm]	Rotor Outer Radius (Rro)[mm]	Outer Radius (Rso)[mm]	Motor Active Length (L)[mm]	
	0,7	20	70	115	65,3	
Winding General Characteristics	Pole Turns	Parallel Or Series	Layers	Layers Analogy	Overlap	
	48	Parallel	2	[50 50]%	1	
Stator General Characteristics	Slots per Pole per Phase (Spp)[Num]	Yoke2Tooth Normalized [%]	Tooth Parallelization [%]	ToothTips [%]	Tooth2Slot [%]	
	2	214	125	90	65	
	Tips2Tooth [%]	Tips2Tips [%]	Inner Fillet (mm)	Outer Fillet (mm)		
	13	20	1,4	2,2		
Rotor General Characteristics	Spoke Channel		Saliency			
	Spoke Channel Angle 2 Polar Angle [%]	Spoke Channel Depth 2 Active Pole Radius [%]	Saliency [%]	Saliency Depth 2 Air Gap [%]		
	22	25	82	125		
	Yoke & Pole Channel					
	Inner Yoke Radius 2 Channel Width [%]	Active Pole Radius 2 Yoke Radius [%]	Channel Width 2 Active Length [%]			
	100	68	33			
Magnet Position Characteristics	Insert Magnet			Spoke Magnet		
	Insert PM Depth 2 Active Pole Radius [%]	Insert PM Length 2 Possible Length [%]	Insert PM Area per Pole [mm <sup>2</sup> ]	Spoke Area per Pole [mm <sup>2</sup> ]	Spoke Magnet Direction [deg]	
	34	50	80	40	180	
	V Type Magnet					
	V Type PM Angle On Top 2 Possible Angle [%]	V Type PM Top Depth 2 Active Pole Radius [%]	V Type PM Angle On Bottom 2 Possible Angle [%]	V Type PM Bottom Depth 2 Active Pole Radius [%]	V Type PM Area per Pole [mm <sup>2</sup> ]	
	87	33	25	76	120	
Flux Barriers Characteristics	Insert PM		V Magnet			
	Insert PM FB Width 2 Insert PM Width [%]	Insert PM FB Length 2 Insert PM Length [%]	V Type PM Top FB Left 2 Right Length [%]	V Type PM Top FB Right Length 2 V Type PM Length [%]	V Type PM Bottom FB Length 2 V Type PM Length [%]	V Type PM Bottom FB Arc Angle Bottom [deg]
	150	12	32	18	10	180
Rotor Fillets	Saliency		Main Flux Barrier (Rotor Yoke) Fillets			
	Fillet [mm]	Main FB inner Fillet [mm]	Main FB Middle Fillet [mm]	Main FB Outer Fillet [mm]		
	5	2	4	1,5		
	Insert Flux Barrier		V Type PM			
	Insert PM Top Fillet [mm]	Insert PM Bottom Fillet [mm]	V Type PM Top & Left Fillet [mm]	V Type PM Top & Right Fillet [mm]		
	0,4	0,2	0,6	0,4		

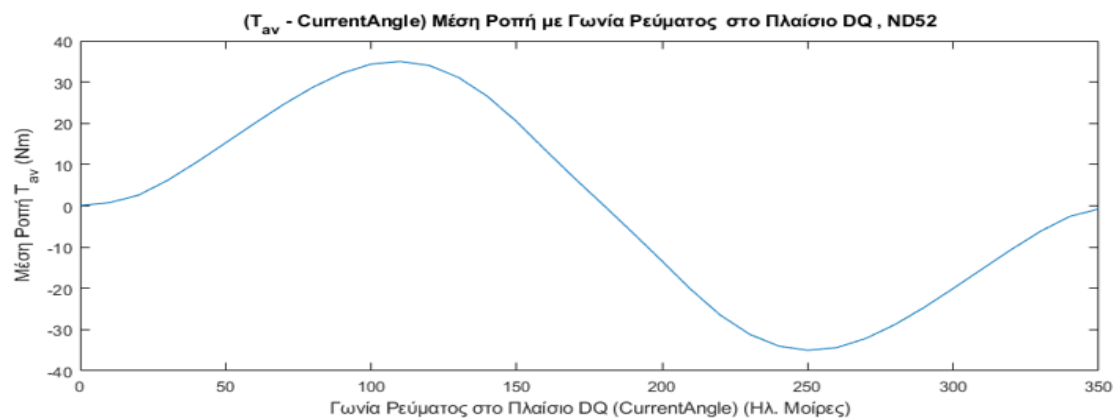
Σχ.5.3.1.1 Αναλυτικός πίνακας χαρακτηριστικών μηχανής με μαγνήτες τύπου ND52.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά της μηχανής προέκυψαν σύμφωνα με την προκαταρκτική σχεδίαση και με γνώμονα την μη ύπαρξη μεγάλου κορεσμού στον δρομέα και στον στάτη. Η γεωμετρία αυτή, δεν έχει βελτιστοποιηθεί ως προς κάποιο χαρακτηριστικό και η χρήση της γίνεται για την ανάδειξη αποτελεσμάτων των μεθόδων που έχουν περιγραφεί, στα κεφάλαια 2, 3 και 4. Γενικά, οι μέθοδοι υπολογισμού της απομαγνήτισης εφαρμόζονται πάνω σε κάποια ήδη βελτιστοποιημένη γεωμετρία και βοηθούν στην μελέτη του κόστους, όσον αφορά το είδος και τη βαθμίδα (Grade) του μαγνήτη που η τελική γεωμετρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Για λόγους πληρότητας της εργασίας παρακάτω δίνονται ορισμένα από τα χαρακτηριστικά που αποδίδει η μηχανή αυτή.

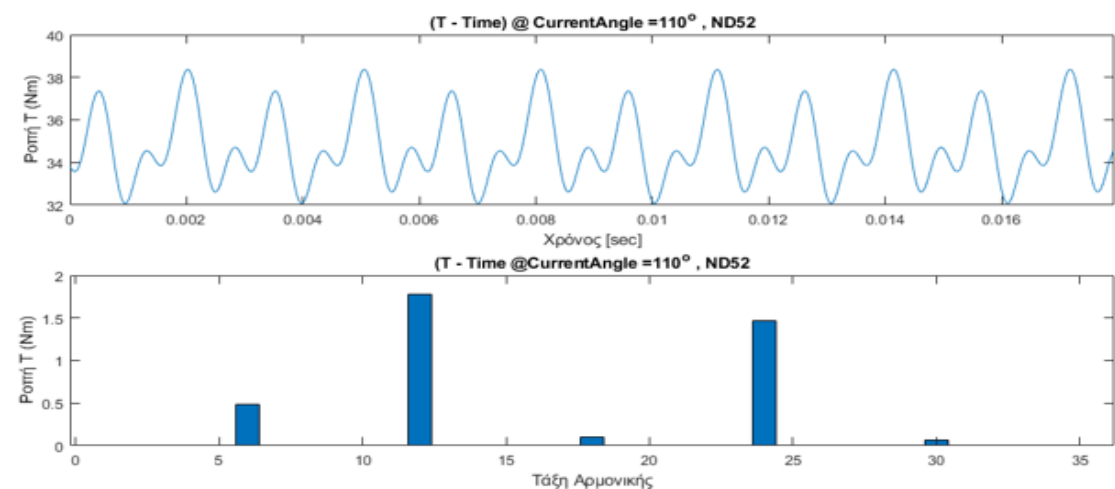
### 5.3.1.1 ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Οι επιδόσεις της μηχανής όταν αυτή λειτουργεί με ονομαστικό μέτρο ρεύματος (42,25 A) ως προς την μέση ροπή σε συνάρτηση της γωνίας του ρεύματος, με αναφορά τον άξονα d, είναι:



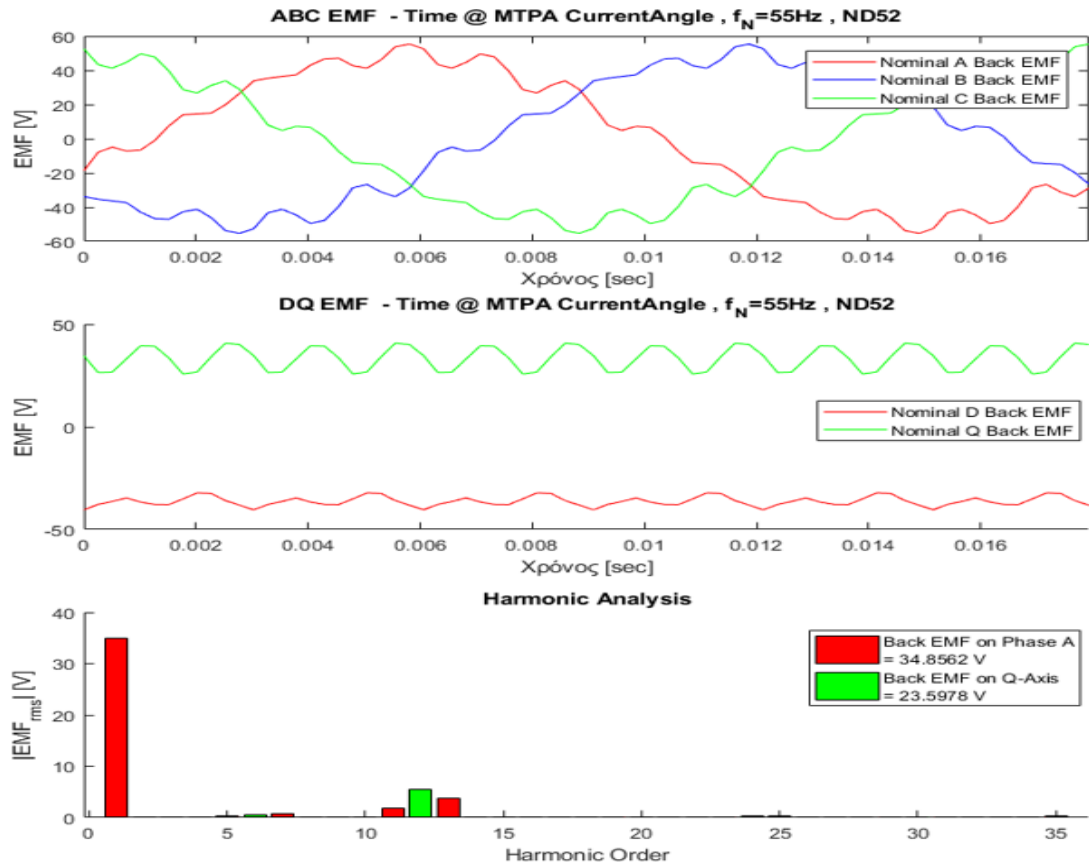
Σχ.5.3.1.1.1 Ροπή – Γωνία ρεύματος για ονομαστικό μέτρο ρεύματος σε μηχανή με μαγνήτες τύπου ND52. Η μέγιστη τιμή της ροπής είναι 34.7Nm.

Οι επιδόσεις της στην ροπή όταν αυτή λειτουργεί στο σημείο MTPA (Maximum Torque Per Ampere) για ονομαστικό μέτρο ρεύματος (42,24 A) και ονομαστική ταχύτητα (1100RPM) είναι:



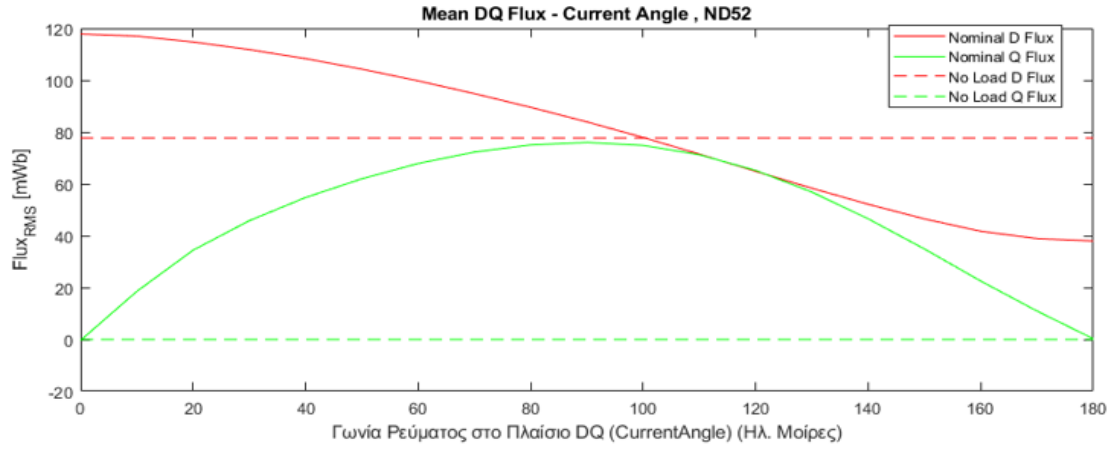
Σχ.5.3.1.1.2 Ροπή – Χρόνος για ονομαστικό μέτρο ρεύματος στη γωνία που επιτυγχάνεται μέγιστη ροπή όταν η μηχανή στρέφεται με ονομαστική ταχύτητα 1100RPM, για τη μηχανή με μαγνήτες τύπου ND52. Παράλληλα δίνεται και το μέτρο του αρμονικού περιεχόμενου της ροπής σε συνάρτηση της τάξης της αρμονικής.

Ένα επιπλέον σημαντικό χαρακτηριστικό της μηχανής είναι η τιμή της Back EMF που αναπτύσσεται στο τριφασικό τύλιγμά της. Πιο κάτω παρουσιάζεται η Back EMF για το σημείο MTPA σε ονομαστικό μέτρο ρεύματος στάτη σε συνάρτηση του χρόνου.



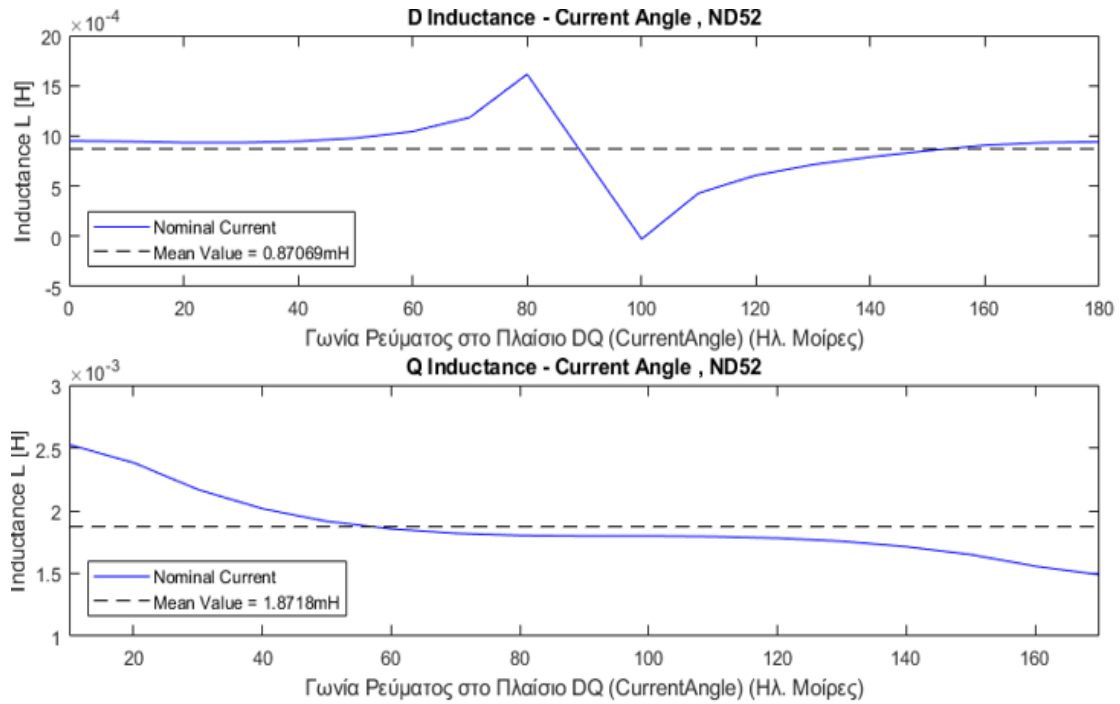
Σχ.5.3.1.1.3 Back EMF(abc,dq) – Χρόνος για ονομαστικό μέτρο ρεύματος στη γωνία που επιτυγχάνεται μέγιστη ροπή όταν η μηχανή στρέφεται με ονομαστική ταχύτητα 1100RPM, για τη μηχανή με μαγνήτες τύπου ND52. Παράλληλα δίνεται και το μέτρο του αρμονικού περιεχόμενου της Back EMF σε συνάρτηση της τάξης της αρμονικής.

Οι τιμές της ροής στο τριφασικό τύλιγμα και η τιμή του ρεύματος σε αυτό συνθέτουν τις αυτεπαγωγές του τυλίγματος της μηχανής. Στην συνέχεια δίνονται οι τιμές των ροών στο πλαίσιο DQ για ονομαστικό μέτρο ρεύματος και για μηδενικό ρεύμα στάτη ως συνάρτηση της γωνίας του ρεύματος με αναφορά τον άξονα d.



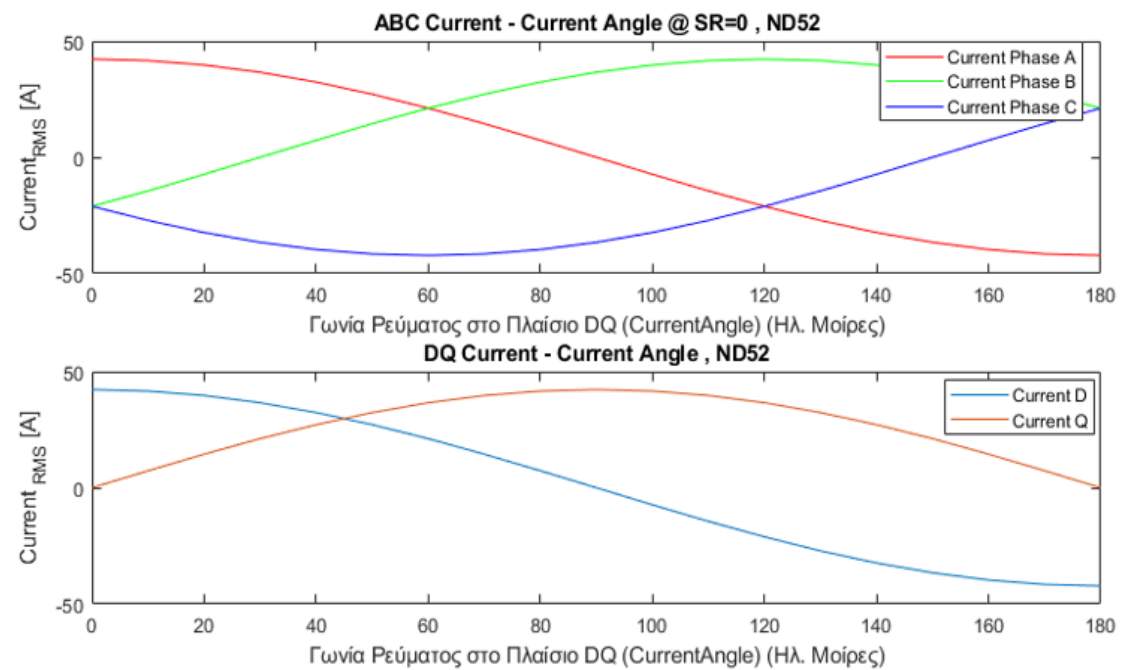
Σχ.5.3.1.1.4 Ροή dq – Γωνία ρεύματος για ονομαστικό και μηδενικό μέτρο ρεύματος σε μηχανή με μαγνήτες τύπου ND52.

Συνολικά, η μέση αυτεπαγωγή της μηχανής προκύπτει με διαίρεση της ροής που προκαλεί το τύλιγμα με το ρεύμα που το διαρρέει:



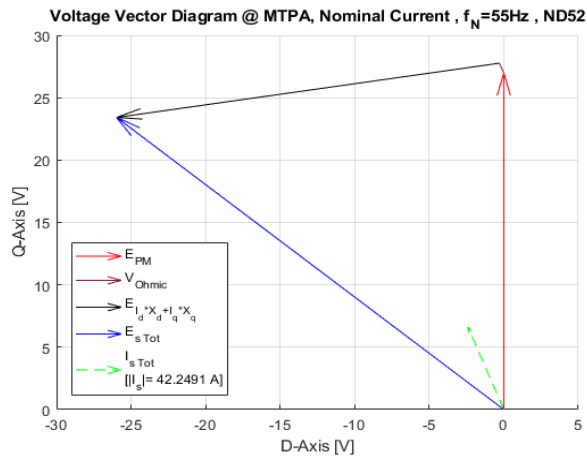
Σχ.5.3.1.1.5 Αυτεπαγωγή dq – Γωνία ρεύματος για ονομαστικό ρεύμα σε μηχανή με μαγνήτες τύπου ND52.

Τέλος, δίνεται και η γραφική παράσταση του ρεύματος, με τη γωνία του, με αναφορά τον άξονα d.



Σχ.5.3.1.1.6 Ρεύμα (abc,dq) – Γωνία ρεύματος για ονομαστικό μέτρο ρεύματος σε μηχανή με μαγνήτες τύπου ND52.

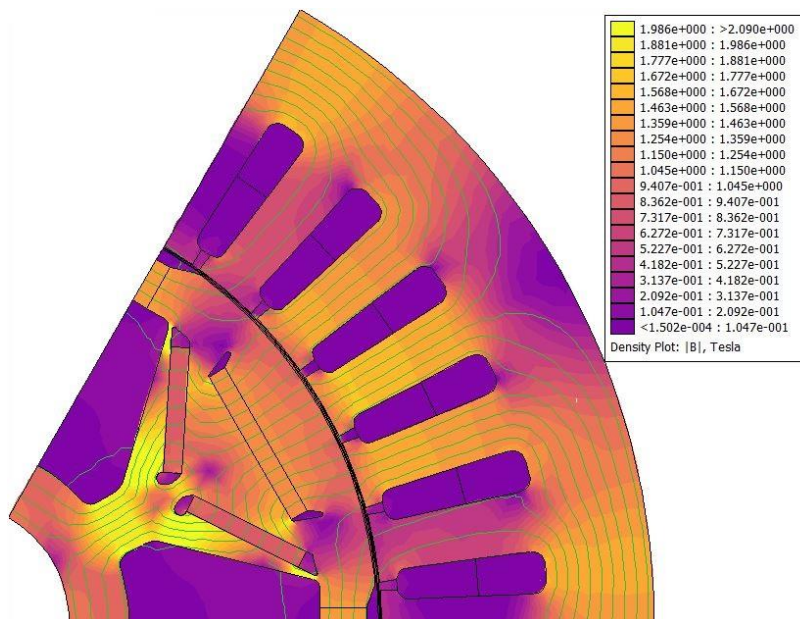
Μια μορφή επαλήθευσης είναι ο σχηματισμός διανυσματικού διαγράμματος τάσεων της μηχανής για τη λειτουργία της μηχανής στο σημείο MTPA με ονομαστικό ρεύμα στις 1100RPM. Το διάγραμμα αυτό δίνεται αμέσως πιο κάτω.



Σχ.5.3.1.1.7 Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων μηχανής με μαγνήτες τύπου ND52. Η τιμή των αυτεπαγωγών δεν είναι οι μέσες τιμές που περιγράφηκαν παραπάνω αλλά οι ακριβείς τιμές τους στη συγκεκριμένη γωνία ρεύματος.

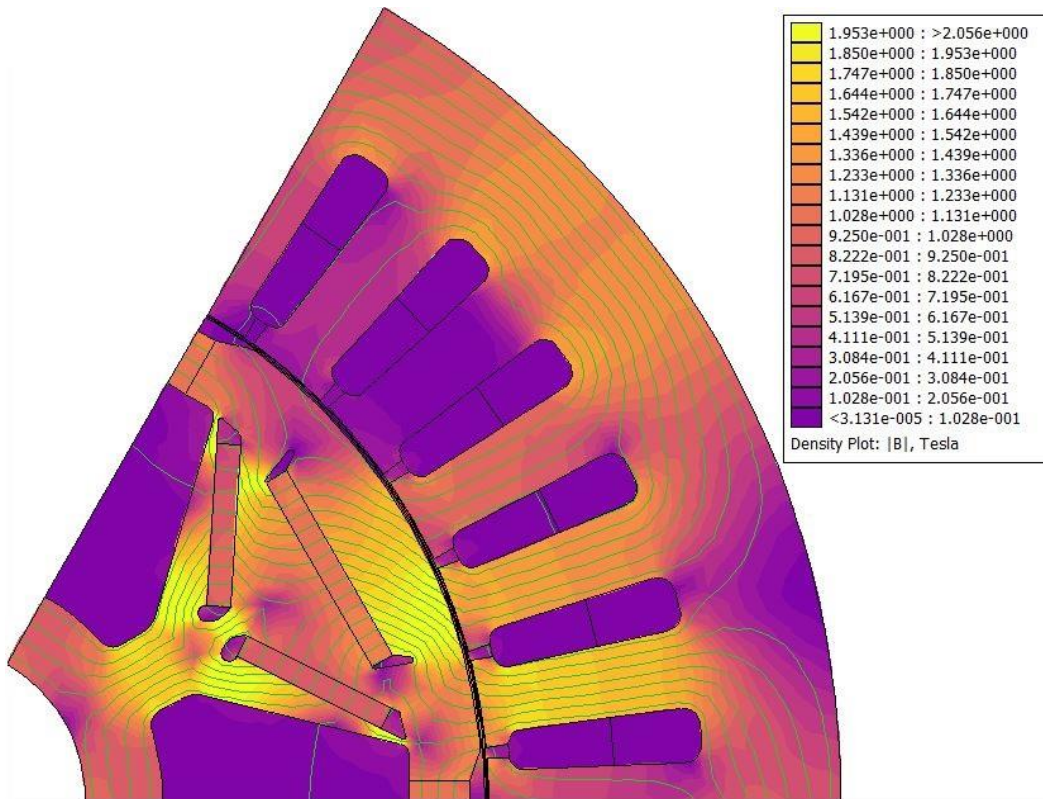
Η ακρίβεια των μετρήσεων, προέρχεται από το πλέγμα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και το βήμα της σύγχρονης περιστροφής (περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4). Η περίοδος της σύγχρονης περιστροφής ακόμα μπορεί να επιλεγεί μικρότερη από 360 ηλεκτρικές μοίρες για λόγους μείωσης του υπολογιστικού χρόνου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία το βήμα επιλέχθηκε ανα 5 Ηλ.Μοίρες και η περίοδος 60 ηλ.Μοίρες. Με αυτή την επιλογή οι ελάχιστες αρμονικές που μπορούμε να παρατηρήσουμε, είναι αυτές της 6<sup>ης</sup> τάξης έως 35<sup>ης</sup>. Στη γενική περίπτωση το βήμα που επιλέχθηκε είναι 10 Ηλ.Μοίρες αφού η μέγιστη αρμονική που μπορούμε να παρατηρήσουμε είναι η 17<sup>η</sup>.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της μηχανής κατά την ονομαστική της φόρτιση συμπληρώνεται με τις εικόνες του πεδίου της μηχανής. Τέλος, παρατίθεται και μια εικόνα όταν τοποθετούμε μηδενικά ρεύματα στάτη.

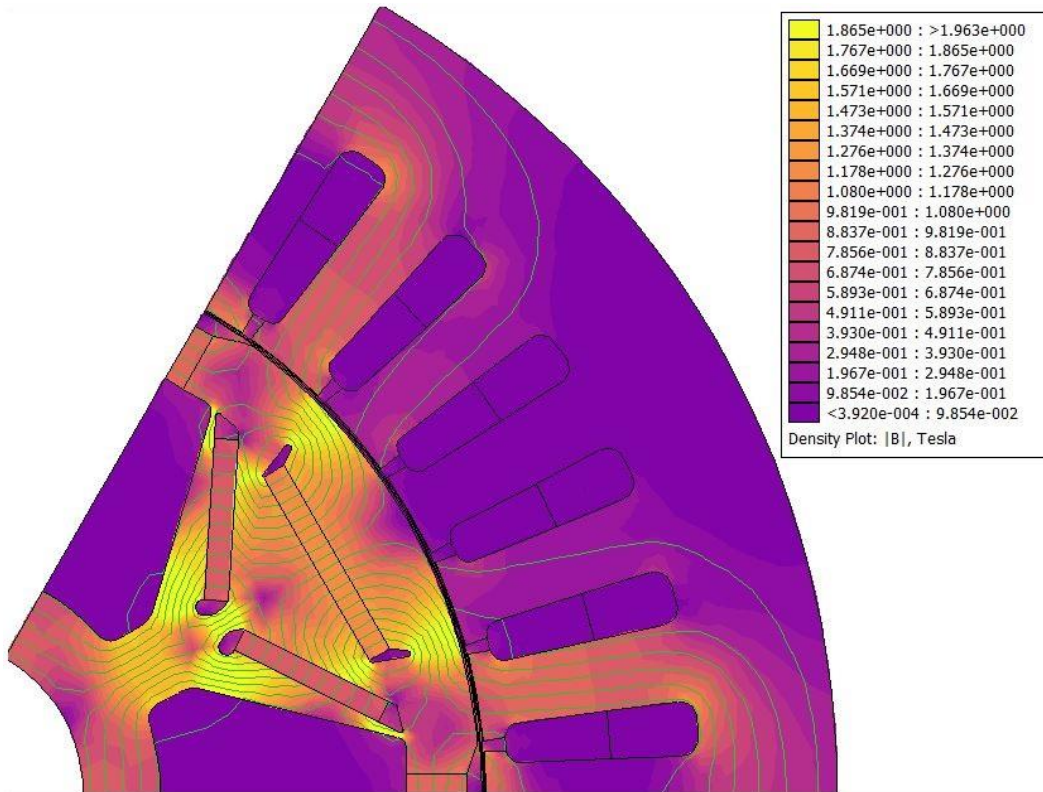


Σχ.5.3.1.1.8 Εικόνα του πεδίου στην μηχανή (ND52) όταν το ρεύμα είναι ονομαστικό και η γωνία του με αναφορά τον άξονα d είναι μηδέν μοίρες.

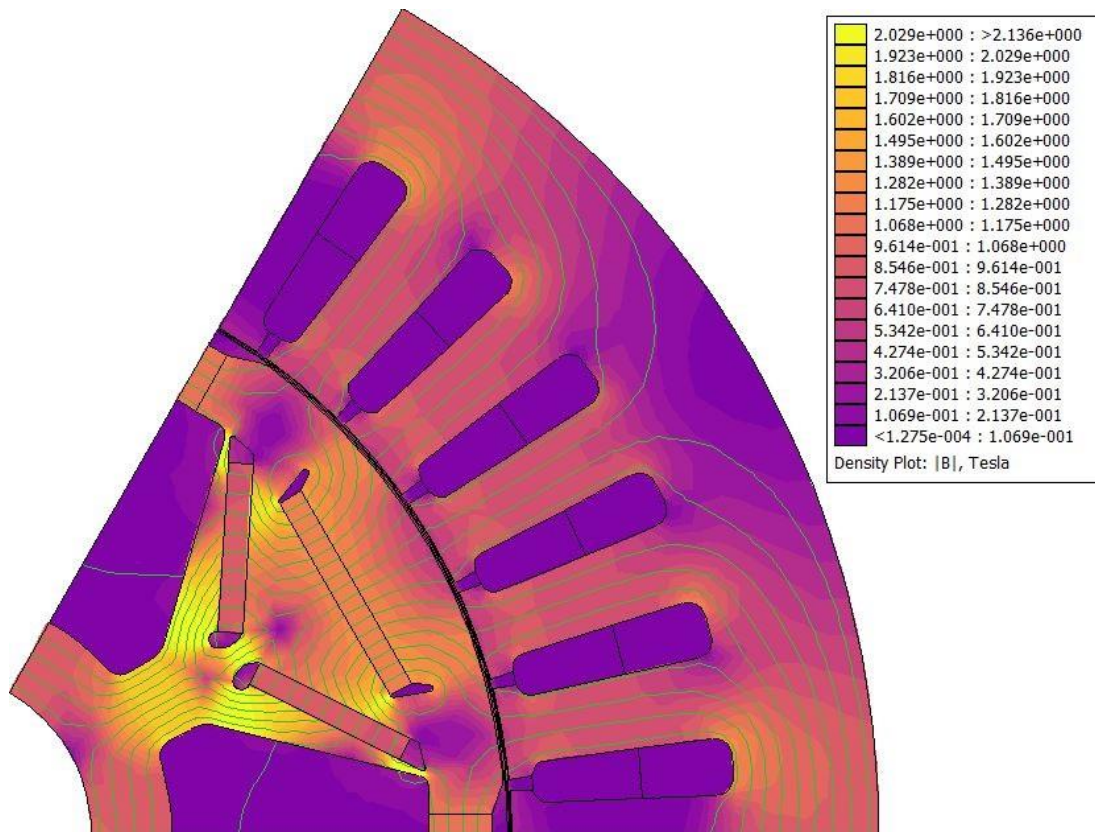




Σχ.5.3.1.1.9 Εικόνα του πεδίου στην μηχανή (ND52) όταν το ρεύμα είναι ονομαστικό και η γωνία του με αναφορά τον άξονα d είναι στο σημείο ΜΤΡΑ (ή 110° ηλ. μοίρες).



Σχ.5.3.1.1.10 Εικόνα του πεδίου στην μηχανή (ND52) όταν το ρεύμα είναι ονομαστικό και η γωνία του με αναφορά τον άξονα d είναι 180° Μοίρες.



Σχ.5.3.1.1.11 Εικόνα του πεδίου στην μηχανή (ND52) όταν το ρεύμα στον στάτη είναι μηδέν.

Αναφορικά με τα παραπάνω χαρακτηριστικά δημιουργείται ένας συγκεντρωτικός πίνακας επιδόσεων για τη μηχανή με μοναδικούς μαγνήτες τύπου ND52, όπως φαίνεται παρακάτω:

Machine: ND52			
Nominal @MTPA Back EMF <sub>RMS</sub> [V]	34,86	THD <sub>BackEMF</sub> [%]	12,21
I <sub>Nominal</sub> [A]	42,25	MTPA <sub>Nominal</sub> [Deg]	110,00
L <sub>d</sub> [mH]	0,87	No Load Flux <sub>d</sub> [mWb]	77,68
L <sub>q</sub> [mH]	1,87	Nominal f <sub>Electr.</sub> [Hz]	55,00
Torque[Nm]	34,73	Torque <sub>Ripple</sub> [%]	17,53

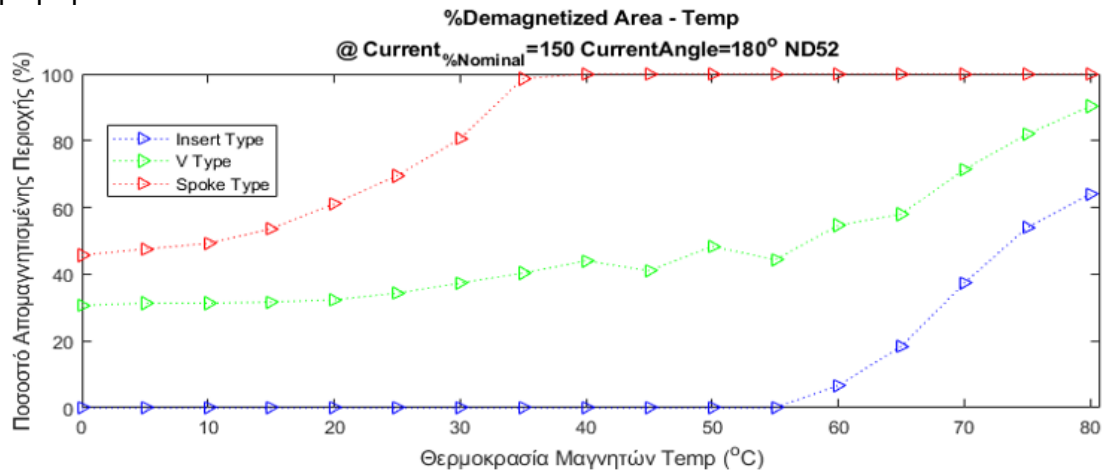
Σχ.5.3.1.1.12 Εικόνα συγκεντρωτικών στοιχείων μηχανής (ND52).

### 5.3.1.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 1,5 ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ

Η μηχανή αυτή, παρουσιάζει, σύμφωνα με το περιοριστικό μοντέλο απομαγνήτισης, μεγάλη ευαισθησία ως προς τη θερμοκρασία. Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου απομαγνήτισης έδειξαν πως ακόμα και για τη δοκιμή που εφαρμόζεται ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό με γωνία 180°, με αναφορά τον άξονα d, η συμπεριφορά της μηχανής δεν είναι επαρκής στο να μην απομαγνητιστεί.

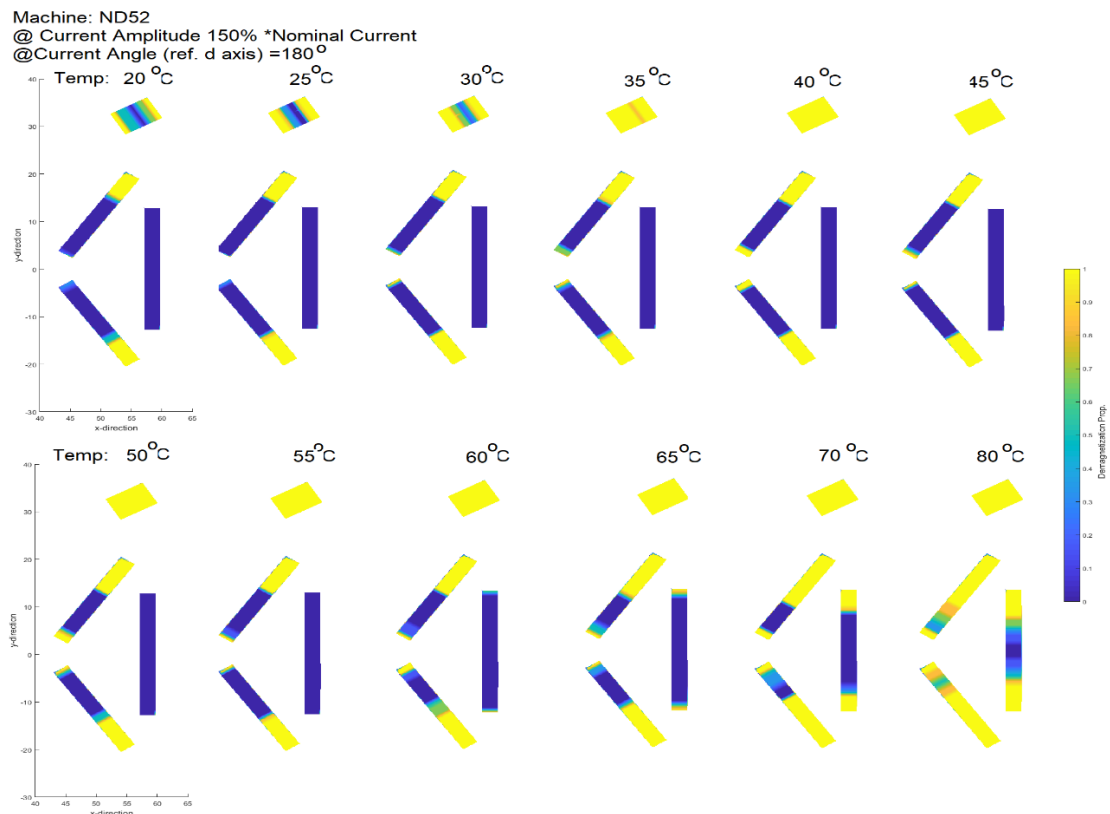
Στη συνέχεια παρατίθεται η γραφική παράσταση της απομαγνήτισμένης περιοχής ως ποσοστό της ολικής περιοχής του μαγνήτη σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας των

μαγνητών.



Σχ.5.3.1.2.1 %Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180° μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND52.

Επιπρόσθετα, μπορούμε να έχουμε και μια απεικόνιση της θέσης που καταλαμβάνει η απομαγνήτιση. Για να γίνει αυτό κατά τη σύγχρονη περιστροφή επιλέγουμε αποθηκεύουμε την θέση των σημείων που απομαγνητίστηκαν. Μετα την σύγχρονη περιστροφή μπορούμε να εξάγουμε την πιθανότητα του κάθε σημείου να απομαγνητίσει. Δηλαδή, μπορούμε να διαιρέσουμε σε κάθε σημείο τις φορές που υπέστη την απομαγνήτιση προς τα συνολικά βήματα της σύγχρονης περιστροφής.

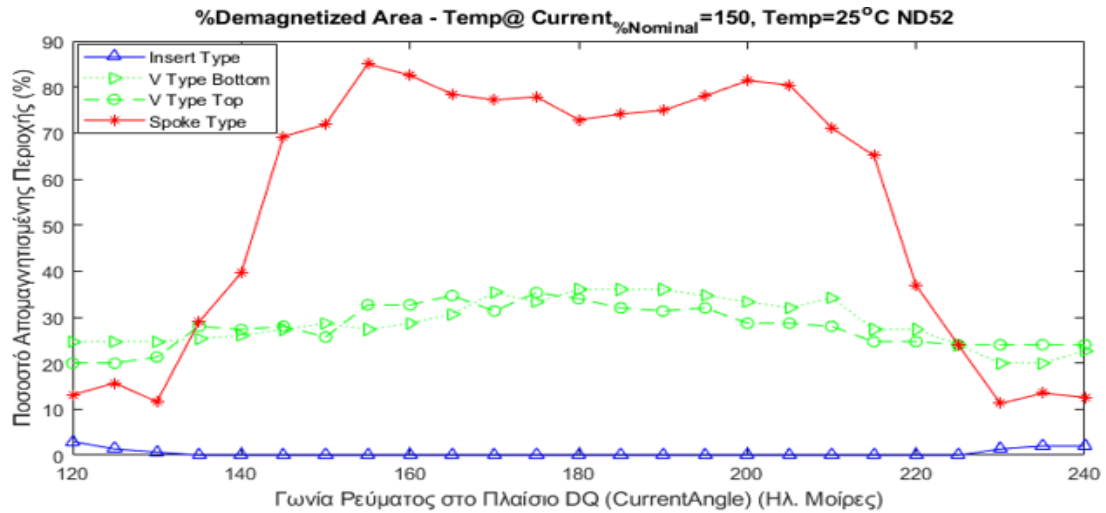


Σχ.5.3.1.2.2 Πιθανότητα απομαγνήτισης εκάστοτε σημείου μαγνήτη και η εξέλιξη με βάση τη Θερμοκρασία για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180° μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή τύπου ND52.

Η απομαγνήτιση ωστόσο εξαρτάται άμεσα και από τη γωνία του ρεύματος. Πιο κάτω γίνεται μια προσπάθεια απεικόνισης αυτής της εξάρτησης για μια σταθερή

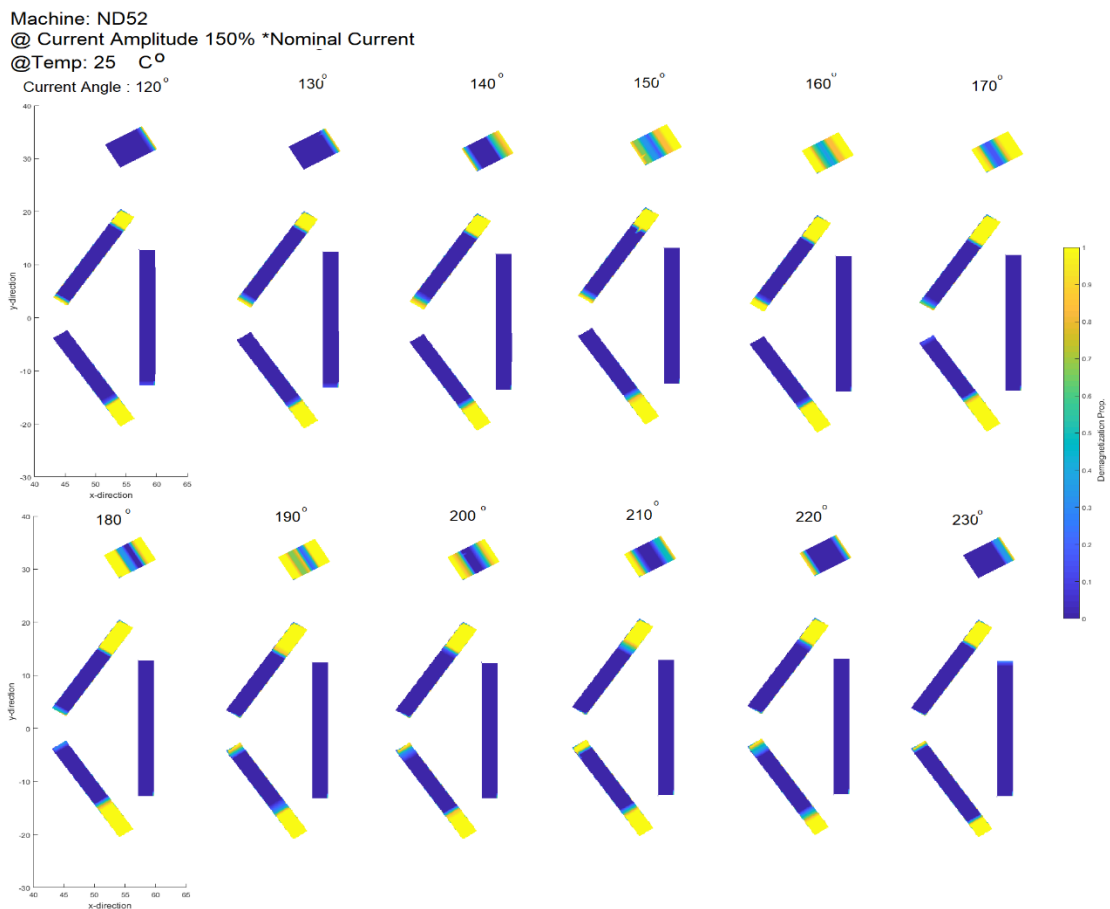


θερμοκρασία ενώ το ρεύμα διατηρείται στην τιμή που είχε πρότερα (1.5 φορά το ονομαστικό). Στην γραφική παράσταση εξαιτίας της μη ύπαρξης συμμετρίας των πεδίων η απομαγνήτιση μελετάται ξεχωριστά και για τον κάθε μαγνήτη. Οι μαγνήτες στην παρούσα γεωμετρία είναι τέσσερις ανά πόλο: οι δύο μαγνήτες V type , ο Spoke Type και ο Insert Type.



Σχ.5.3.1.2.3 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Γωνία ρεύματος. Για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό, σε θερμοκρασία 20°C, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND52

Μια πιο αναλυτική εικόνα που δείχνει και τη θέση των σημείων που απομαγνητίζονται δίνεται παρακάτω σαν εξελικτικό διάγραμμα.

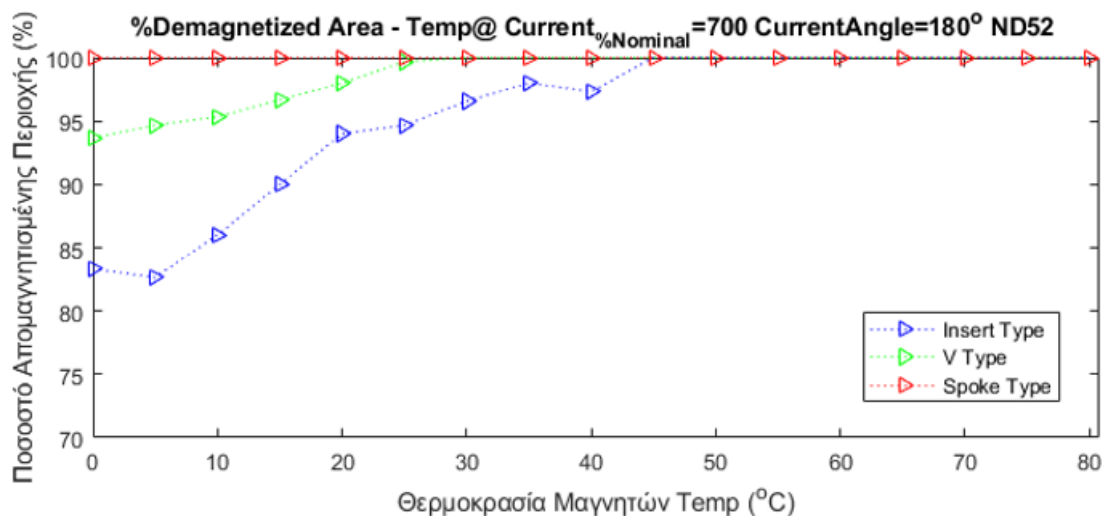


Σχ.5.3.1.2.4 Πιθανότητα απομαγνήτισης εκάστοτε σημείου μαγνήτη και η εξέλιξη με βάση τη γωνία ρεύματος για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό σε θερμοκρασία 25°C, για την μηχανή τύπου ND52.

### 5.3.1.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 7 ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ

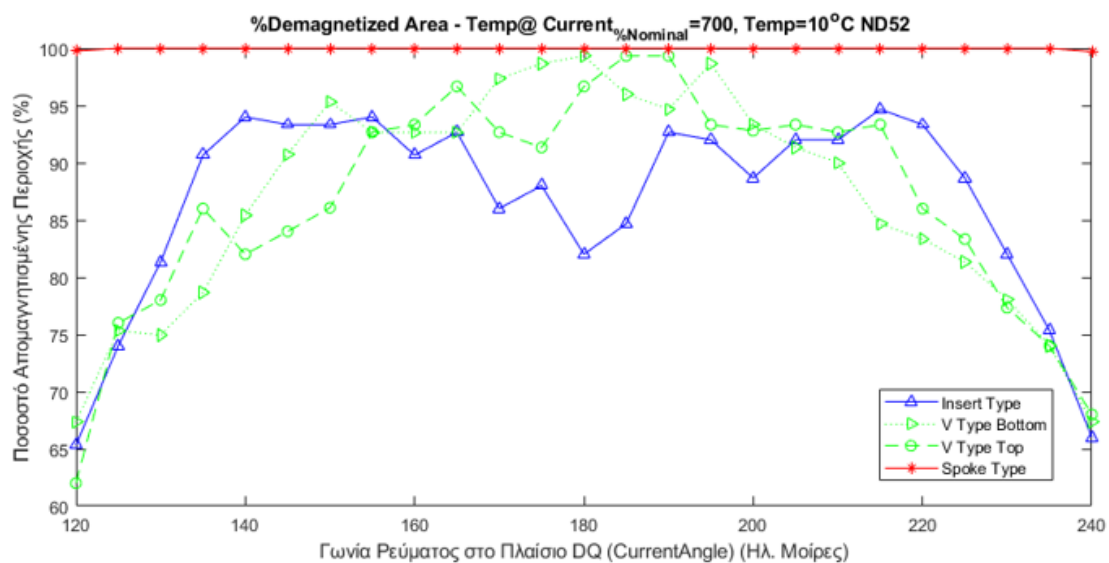
Στην μηχανή με μαγνήτες τύπου ND52 παρατηρείται μια έντονη ευαισθησία στην απομαγνήτιση ακόμη και όταν το ρεύμα του στάτη είναι αρκετά μικρό. Συνεπώς, η επίπτωση της αύξησης του ρεύματος αναμένουμε να ελαττώνει την αντοχή της μηχανής. Αυτό μπορεί να γίνει εμφανές κατά τη διεξαγωγή της ανάλυσης της απομαγνήτισης στην μηχανή με επτά φορές το ονομαστικό ρεύμα.

Η γραφική παράσταση της απομαγνήτισης της μηχανής με τη θερμοκρασία δίνεται στη συνέχεια. Εύκολα παρατηρούμε πως σε όλες τις θερμοκρασίες λειτουργίας της μηχανής, αν το ρεύμα έχει γωνία  $180^\circ$  μοίρες (με αναφορά τον άξονα d) και είναι επτά φορές το ονομαστικό, η ελάχιστη απομαγνήτιση που μπορεί να συμβεί είναι 80% (σύμφωνα με το περιοριστικό μοντέλο).



Σχ.5.3.1.2.5 %Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό σε γωνία  $180^\circ$  μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND52.

Η απομαγνήτιση σαν εξάρτηση της γωνίας του ρεύματος στην θερμοκρασία των  $10^\circ\text{C}$  δίνεται:



Σχ.5.3.1.2.6 %Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Γωνία ρεύματος. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό, σε θερμοκρασία  $10^\circ\text{C}$ , για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND52

### 5.3.2 ΜΗΧΑΝΗ ΜΕ ΜΑΓΝΗΤΕΣ ND50H

Στην μηχανή τοποθετήθηκαν στη συνέχεια μαγνήτες τύπου ND50H. Οι μαγνήτες αυτού του τύπου, έχουν μεγαλύτερη τιμή  $jH_c$  και συνεπώς απομαγνητίζονται πιο δύσκολα σε σχέση με τους μαγνήτες τύπου ND52. Η επίδοση της μηχανής στην ροπή για να παραμείνει ίδια, το μήκος την μηχανής οφείλει να αυξηθεί, εφόσον η τιμή  $B_r$  των μαγνητών μειώνεται. Πιο κάτω δίνεται ο αναλυτικός πίνακας των χαρακτηριστικών της μηχανής:

ND50H						
Magnetic Materials (A)	Remanence (Br)[T] (20°C)	Coercivity (Hcb)[kA/m] (20°C)	Intrinsic Coercivity (Hci)[kA/m] (20°C)	Energy (BHmax)[MGOe] (20°C)	Permeability ( $\mu_r$ )	
	Spoke Magnet	1,40	995	1353	50	1,045
	V Type Magnet	1,40	995	1353	50	1,045
	Insert Magnet	1,40	995	1353	50	1,045
Magnetic Materials (B)	Rev. Temp. Coef. Of Induction (a)[%/C]	Rev. Temp. Coef. Of Intrinsic Coercivity (b)[%/C]	Max. Working Temperature (Tmax)[C]	Conductivity ( $\sigma$ )[S*10 <sup>6</sup> /m]	Density ( $\rho$ )[g/cm <sup>3</sup> ]	
	Spoke Magnet	-0,11	-0,65	120	0,667	7,65
	V Type Magnet	-0,11	-0,65	120	0,667	7,65
	Insert Magnet	-0,11	-0,65	120	0,667	7,65
Motor General Characteristics	Poles	Phases	Nominal Current Density (Jnom)[A/mm <sup>2</sup> ]	Lamination Factor (cs)[%]	Fill Factor (ff)[%]	
	6	3	4	95	60	
	Air Gap Length (Lg)[mm]	Rotor Inner Radius (Rri)[mm]	Rotor Outer Radius (Rro)[mm]	Outer Radius (Rso)[mm]	Motor Active Length (L)[mm]	
	0,7	20	70	115	66,1	
Winding General Characteristics	Pole Turns	Parallel Or Series	Layers	Layers Analogy	Overlap	
	48	Parallel	2	[50 50]%	1	
Stator General Characteristics	Slots per Pole per Phase (Spp)[Num]	Yoke2Tooth Normalized [%]	Tooth Parallelization [%]	ToothTips [%]	Tooth2Slot [%]	
	2	214	125	90	65	
	Tips2Tooth [%]	Tips2Tips [%]	Inner Fillet (mm)	Outer Fillet (mm)		
	13	20	1,4	2,2		
Rotor General Characteristics	Spoke Channel		Saliency			
	Spoke Channel Angle 2 Polar Angle [%]	Spoke Channel Depth 2 Active Pole Radius [%]	Saliency [%]	Saliency Depth 2 Air Gap [%]		
	22	25	82	125		
	Yoke & Pole Channel					
	Inner Yoke Radius 2 Channel Width [%]	Active Pole Radius 2 Yoke Radius [%]	Channel Width 2 Active Length [%]			
	100	68	33			
Magnet Position Characteristics	Insert Magnet			Spoke Magnet		
	Insert PM Depth 2 Active Pole Radius [%]	Insert PM Length 2 Possible Length [%]	Insert PM Area per Pole [mm <sup>2</sup> ]	Spoke Area per Pole [mm <sup>2</sup> ]	Spoke Magnet Direction [deg]	
	34	50	80	40	180	
	V Type Magnet					
V Type PM Angle On Top 2 Possible Angle [%]	V Type PM Top Depth 2 Active Pole Radius [%]	V Type PM Angle On Bottom 2 Possible Angle [%]	V Type PM Bottom Depth 2 Active Pole Radius [%]	V Type PM Area per Pole [mm <sup>2</sup> ]		
87	33	25	76	120		
Flux Barriers Characteristics	Insert PM			V Magnet		
	Insert PM FB Width 2 Insert PM Width [%]	Insert PM FB Length 2 Insert PM Length [%]	V Type PM Top FB Left 2 Right Length [%]	V Type PM Top FB Right Length 2 V Type PM Length [%]	V Type PM Bottom FB Length 2 V Type PM Length [%]	V Type PM Bottom FB Arc Angle Bottom [deg]
	150	12	32	18	10	180
Rotor Fillets	Saliency	Main Flux Barrier (Rotor Yoke) Fillets				
	Fillet [mm]	Main FB inner Fillet [mm]	Main FB Middle Fillet [mm]	Main FB Outer Fillet [mm]		
	5	2	4	1,5		
	Insert Flux Barrier		V Type PM			
	Insert PM Top Fillet [mm]	Insert PM Bottom Fillet [mm]	V Type PM Top & Left Fillet [mm]	V Type PM Top & Right Fillet [mm]		
	0,4	0,2	0,6	0,4		

Σχ.5.3.2.1 Αναλυτικός πίνακας χαρακτηριστικών μηχανής με μαγνήτες τύπου ND52

### 5.3.2.1 ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

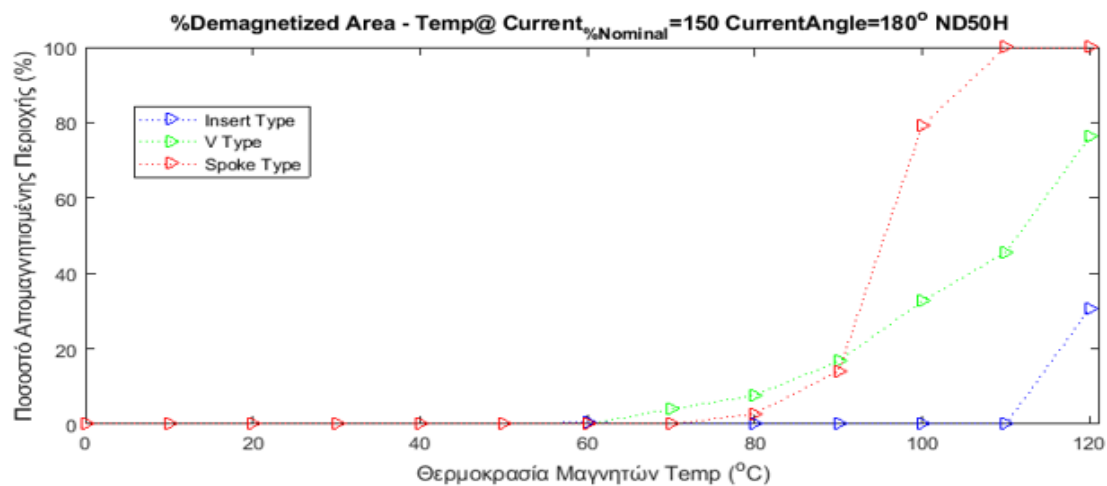
Σε αυτή τη μηχανή δίνονται οι επιδόσεις της σε μορφή πίνακα χωρίς την πλήρη γραφική απεικόνιση των μεγεθών της μηχανής.

Machine: ND50H			
Nominal @MTPA Back EMF <sub>RMS</sub> [V]	35,10	THD <sub>BackEMF</sub> [%]	9,83
I <sub>Nominal</sub> [A]	42,25	MTPA <sub>Nominal</sub> [Deg]	110,00
L <sub>d</sub> [mH]	0,89	No Load Flux <sub>d</sub> [mWb]	77,17
L <sub>q</sub> [mH]	1,92	Nominal f <sub>Electr.</sub> [Hz]	55,00
Torque[Nm]	35,00	TorqueRipple[%]	17,33

Σχ.5.3.2.1.1 Εικόνα συγκεντροτικών στοιχείων μηχανής (ND50H).

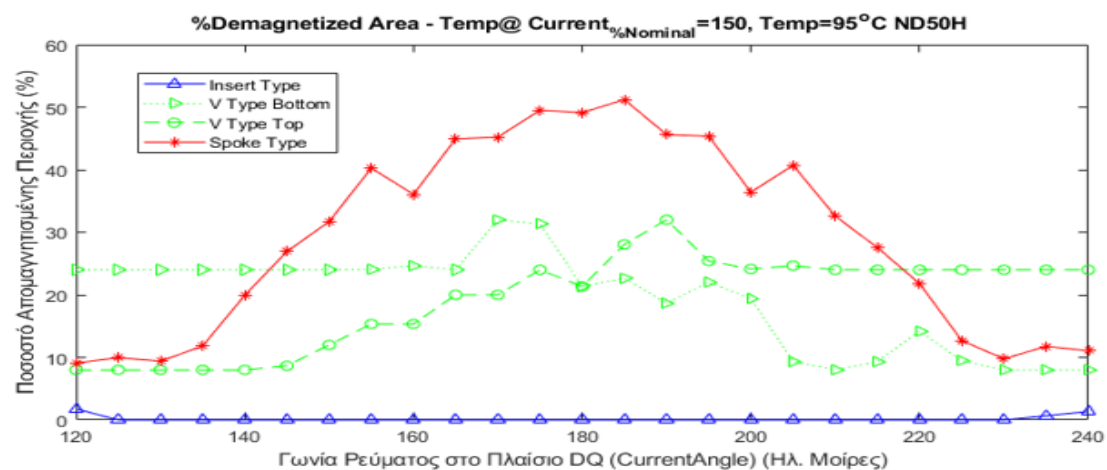
### 5.3.2.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 1.5 ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ

Η συμπεριφορά της μηχανής με μαγνήτες τύπου ND50H είναι αρκετά βελτιωμένη σε σύγκριση με τη μηχανή με μαγνήτες ND52. Πιο κάτω φαίνεται ένα διάγραμμα με το ποσοστό της απομαγνητισμένης περιοχής σε συνάρτηση της θερμοκρασίας όταν τα ρεύματα του στάτη έχουν γωνία 180° Μοιρών με τον άξονα d και μέτρο 1.5 φορές το ονομαστικό.



Σχ.5.3.2.2.1 %Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180° μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H.

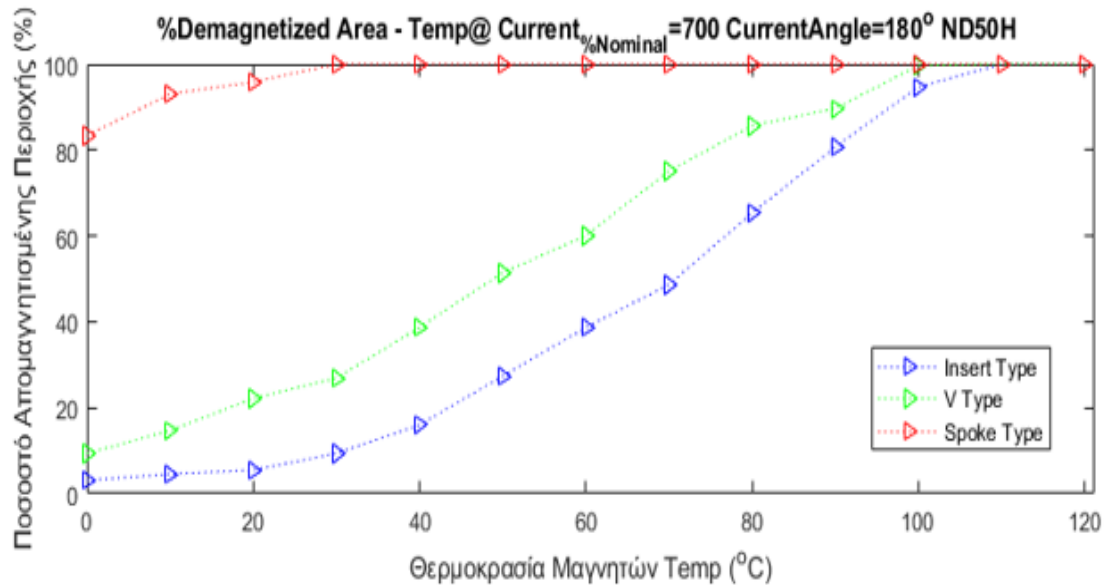
Σε αυτή τη τιμή του ρεύματος δίνεται και η εξάρτηση της απομαγνήτισης από τη γωνία του ρεύματος με τον άξονα d όταν η θερμοκρασία είναι σταθερή στους 95°C.



Σχ.5.3.2.2.2 %Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Γωνία ρεύματος. Για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό, σε θερμοκρασία 20°C, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H.

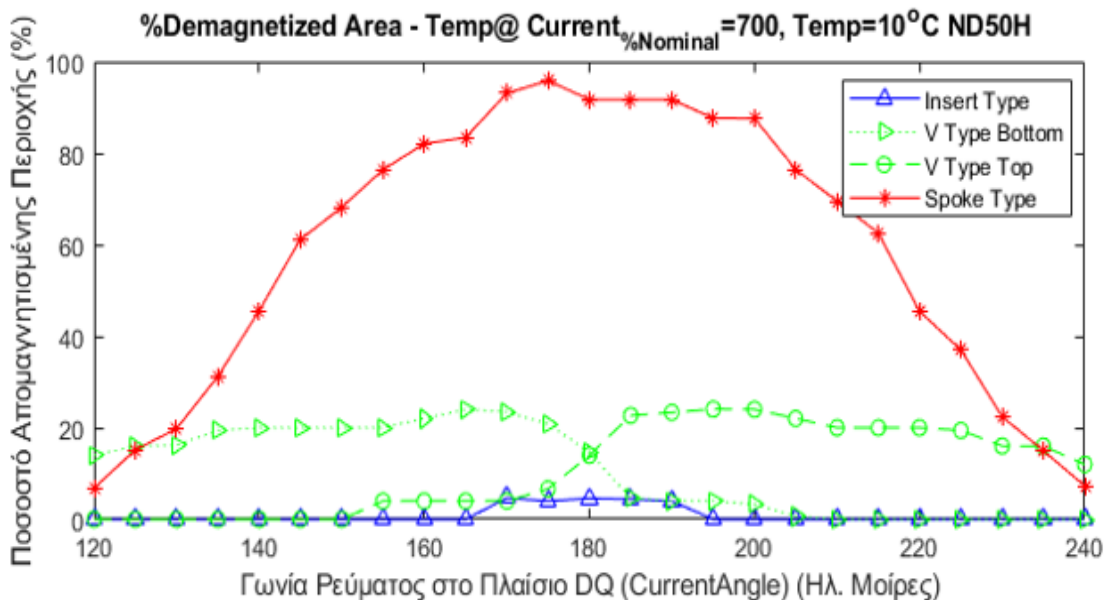
### 5.3.2.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 7 ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ

Η μηχανή με μαγνήτες ND50H εξετάστηκε και ως προς τη συμπεριφορά της στην απομαγνήτιση όταν το ρεύμα είναι 7 φορές τον ονομαστικό. Σε αυτή την περίπτωση η βελτίωση σε σύγκριση με τη προηγούμενη μηχανή με μαγνήτες ND52 είναι πολύ μεγάλη. Στην συνέχεια παρατίθεται και η γραφική απεικόνιση του ποσοστού απομαγνητισμένης περιοχής με τη θερμοκρασία όταν το ρεύμα έχει γωνία 180° μοίρες με τον άξονα d και είναι 7 φορές το ονομαστικό.



Σχ.5.3.2.3.1 %Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180° μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H.

Η εξάρτηση της απομαγνήτισης από τη γωνία του ρεύματος όταν αυτό έχει τιμή 7 φορές το ονομαστικό και η θερμοκρασία των μαγνητών είναι 10°C δίνεται παρακάτω:



Σχ.5.3.2.3.2 %Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Γωνία ρεύματος. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό, σε θερμοκρασία 10°C, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H

### 5.3.3 ΜΗΧΑΝΗ ΜΕ ΜΑΓΝΗΤΕΣ ND42UH

Στην μηχανή τοποθετήθηκαν στη συνέχεια μαγνήτες τύπου ND42UH. Οι μαγνήτες αυτού του τύπου, έχουν μεγαλύτερη τιμή  $jH_c$  και συνεπώς απομαγνητίζονται πιο δύσκολα σε σχέση με τους μαγνήτες τύπου ND50H και συνεπώς ακόμα πιο δύσκολα όταν σχετίζονται με την αρχική προσομοίωση της μηχανής που φέρει μαγνήτες ND52. Η επίδοση της μηχανής στην ροπή για να παραμείνει ίδια, το μήκος της μηχανής οφείλει να αυξηθεί, εφόσον η τιμή  $B_r$  των μαγνητών μειώνεται. Πιο κάτω δίνεται ο αναλυτικός πίνακας των χαρακτηριστικών της μηχανής.

ND42UH						
Magnetic Materials (A)	Remanence (Br)[T] (20°C)	Coercivity (Hcb)[kA/m] (20°C)	Intrinsic Coercivity (Hci)[kA/m] (20°C)	Energy (BHmax)[MGOe] (20°C)	Permeability ( $\mu_r$ )	
Spoke Magnet	1,28	875	1989	42	1,045	
V Type Magnet	1,28	875	1989	42	1,045	
Insert Magnet	1,28	875	1989	42	1,045	
Magnetic Materials (B)	Rev. Temp. Coef. Of Induction (a)[%/C]	Rev. Temp. Coef. Of Intrinsic Coercivity (b)[%/C]	Max. Working Temperature (Tmax)[C]	Conductivity ( $\sigma$ )[S*10 <sup>6</sup> /m]	Density ( $\rho$ )[g/cm <sup>3</sup> ]	
Spoke Magnet	-0,1	-0,55	180	0,667	7,65	
V Type Magnet	-0,1	-0,55	180	0,667	7,65	
Insert Magnet	-0,1	-0,55	180	0,667	7,65	
Motor General Characteristics	Poles	Phases	Nominal Current Density (Jnom)[A/mm <sup>2</sup> ]	Lamination Factor (cs)[%]	Fill Factor (ff)[%]	
	6	3	4	95	60	
	Air Gap Length (Lg)[mm]	Rotor Inner Radius (Rri)[mm]	Rotor Outer Radius (Rro)[mm]	Outer Radius (Rso)[mm]	Motor Active Length (L)[mm]	
	0,7	20	70	115	69,5	
Winding General Characteristics	Pole Turns	Parallel Or Series	Layers	Layers Analogy	Overlap	
	48	Parallel	2	[50 50%]	1	
Stator General Characteristics	Slots per Pole per Phase (Spp)[Num]	Yoke2Tooth Normalized [%]	Tooth Parallelization [%]	ToothTips [%]	Tooth2Slot [%]	
	2	214	125	90	65	
	Tips2Tooth [%]	Tips2Tips [%]	Inner Fillet (mm)	Outer Fillet (mm)		
	13	20	1,4	2,2		
Rotor General Characteristics	Spoke Channel		Saliency			
	Spoke Channel Angle 2 Polar Angle [%]	Spoke Channel Depth 2 Active Pole Radius [%]	Saliency [%]	Saliency Depth 2 Air Gap [%]		
	22	25	82	125		
	Yoke & Pole Channel					
	Inner Yoke Radius 2 Channel Width [%]	Active Pole Radius 2 Yoke Radius [%]	Channel Width 2 Active Length [%]			
	100	68	33			
Magnet Position Characteristics	Insert Magnet			Spoke Magnet		
	Insert PM Depth 2 Active Pole Radius [%]	Insert PM Length 2 Possible Length [%]	Insert PM Area per Pole [mm <sup>2</sup> ]	Spoke Area per Pole [mm <sup>2</sup> ]	Spoke Magnet Direction [deg]	
	34	50	80	40	180	
	V Type Magnet					
	V Type PM Angle On Top 2 Possible Angle [%]	V Type PM Top Depth 2 Active Pole Radius [%]	V Type PM Angle On Bottom 2 Possible Angle [%]	V Type PM Bottom Depth 2 Active Pole Radius [%]	V Type PM Area per Pole [mm <sup>2</sup> ]	
	87	33	25	76	120	
Flux Barriers Characteristics	Insert PM		V Magnet			
	Insert PM FB Width 2 Insert PM Width [%]	Insert PM FB Length 2 Insert PM Length [%]	V Type PM Top FB Left 2 Right Length [%]	V Type PM Top FB Right Length 2 V Type PM Length [%]	V Type PM Bottom FB Length 2 V Type PM Length [%]	V Type PM Bottom FB Arc Angle Bottom [deg]
	150	12	32	18	10	180
Rotor Fillets	Saliency	Main Flux Barrier (Rotor Yoke) Fillets				
	Fillet [mm]	Main FB inner Fillet [mm]	Main FB Middle Fillet [mm]	Main FB Outer Fillet [mm]		
	5	2	4	1,5		
	Insert Flux Barrier		V Type PM			
	Insert PM Top Fillet [mm]	Insert PM Bottom Fillet [mm]	V Type PM Top & Left Fillet [mm]	V Type PM Top & Right Fillet [mm]		
	0,4	0,2	0,6	0,4		

Σχ.5.3.3.1 Αναλυτικός πίνακας χαρακτηριστικών μηχανής με μαγνήτες τύπου ND42UH

### 5.3.3.1 ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Σε αυτή τη μηχανή δίνονται οι επιδόσεις της σε μορφή πίνακα χωρίς την πλήρη γραφική απεικόνιση των μεγεθών της μηχανής.

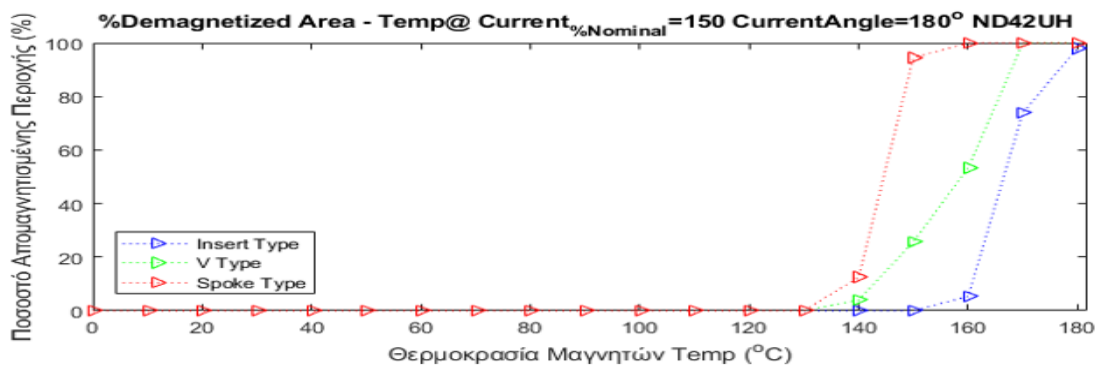
Machine: ND42UH			
Nominal @MTPA Back EMF <sub>RMS</sub> [V]	36,40	THD <sub>BackEMF</sub> [%]	9,94
I <sub>Nominal</sub> [A]	42,25	MTPA <sub>Nominal</sub> [Deg]	110,00
L <sub>d</sub> [mH]	0,96	No Load Flux <sub>d</sub> [mWb]	74,92
L <sub>q</sub> [mH]	2,12	Nominal f <sub>Electr.</sub> [Hz]	55,00
Torque[Nm]	35,00	Torque <sub>Ripple</sub> [%]	18,72

Σχ.5.3.3.1.1 Εικόνα συγκεντρωτικών στοιχείων μηχανής (ND42UH).

### 5.3.3.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 1.5 ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ

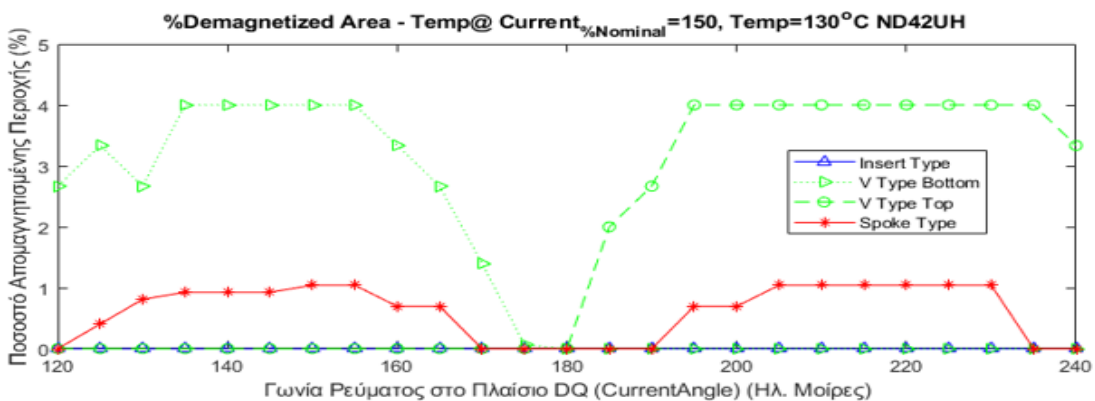
Όσον αφορά τη συμπεριφορά στην απομαγνήτιση αυτής της μηχανής με μαγνήτες ND42UH, όπως φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα, είναι πολύ πιο ανθεκτική σε σχέση με τις προηγούμενες δύο μηχανές. Αυτό είναι εμφανές καθώς παρουσιάζει έντονη αντίσταση στην απομαγνήτιση, δηλαδή σχεδόν μηδενική απομαγνήτιση, μέχρι και την  $\theta:120^{\circ}\text{C}$  και στη συνέχεια απομαγνητίζονται απότομα και ραγδαία

Πιο κάτω φαίνεται ένα διάγραμμα με το ποσοστό της απομαγνητισμένης περιοχής σε συνάρτηση της θερμοκρασίας όταν τα ρεύματα του στάτη έχουν γωνία  $180^{\circ}$  Μοιρών με τον άξονα d και μέτρο 1.5 φορές το ονομαστικό.



Σχ.5.3.3.2.1 %Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό σε γωνία  $180^{\circ}$  μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND42UH.

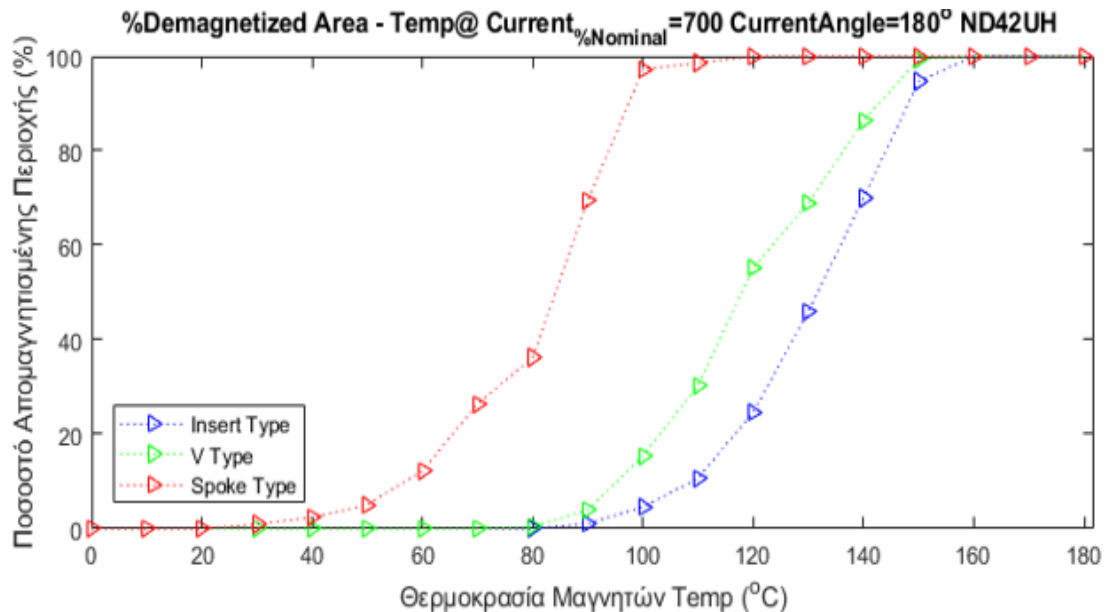
Σε αυτή τη τιμή του ρεύματος δίνεται και η εξάρτηση της απομαγνήτισης από τη γωνία του ρεύματος με τον άξονα d όταν η θερμοκρασία είναι σταθερή στους  $130^{\circ}\text{C}$



Σχ.5.3.3.2.2 %Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Γωνία ρεύματος. Για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό, σε θερμοκρασία  $130^{\circ}\text{C}$ , για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H.

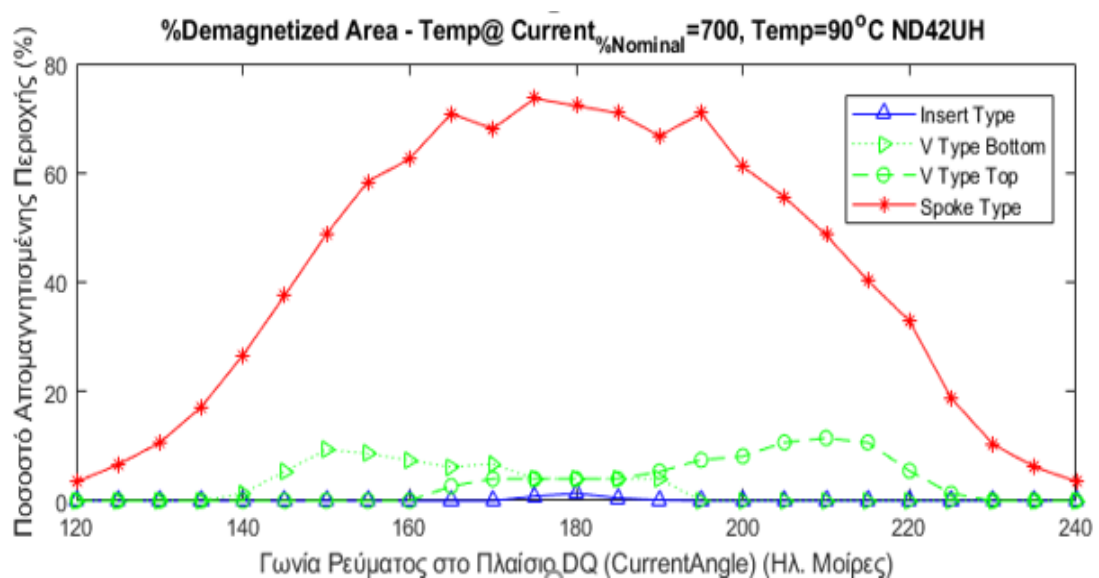
### 5.3.3.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 7 ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ

Η μηχανή με μαγνήτες ND42UH εξετάστηκε και ως προς τη συμπεριφορά της στην απομαγνήτιση, όταν το ρεύμα είναι 7 φορές τον ονομαστικό. Παρακάτω δίνεται το διάγραμμα που αναπαριστά το ποσοστό απομαγνήτισης των μαγνητών της μηχανής στην ανωτέρα λειτουργική κατάσταση σε σχέση με τη θερμοκρασία. Όπως προκύπτει, η συμπεριφορά του μαγνήτη είναι η καλύτερη έως τώρα καθώς οι μαγνήτες μέχρι και τη θερμοκρασία των 60°C δεν έχουν απομαγνητιστεί ιδιαίτερα. Ειδικά, ο Insert-type μαγνήτης δε παρουσιάζει καμία εικόνα απομαγνήτισης μέχρι να φτάσει σε ακραίες τιμές θερμοκρασίας άνω των 100°C.



Σχ.5.3.3.1 %Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180° μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H.

Η εξάρτηση της απομαγνήτισης από τη γωνία του ρεύματος, όταν αυτό έχει τιμή 7 φορές το ονομαστικό και η θερμοκρασία των μαγνητών είναι 90°C δίνεται παρακάτω:



Σχ.5.3.3.2 %Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Γωνία ρεύματος. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό, σε θερμοκρασία 10°C, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H



### 5.3.4 ΜΗΧΑΝΗ ΜΕ ΣΥΝΔΙΑΣΜΟ ΜΑΓΝΗΤΩΝ: ND42UH (SPOKE & V-TYPE), ND50H (INSERT TYPE)

Η ανάλυση του φαινομένου της απομαγνήτισης ,που έλαβε χώρα στο προηγούμενο κεφάλαιο ,φανερώνει την έντονη σχέση που έχει η θέση του κάθε είδους μαγνήτη πάνω στη μηχανή (spoke , insert , V-type) με την ευαισθησία του στην απομαγνήτιση. Εύλογα λοιπόν, μας οδηγεί στη δημιουργία μίας μηχανής που χρησιμοποιεί διαφορετικά είδη μαγνητών σε κάθε θέση και εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματά τους όσον αφορά το κόστος ανά επίδοση.

ND42UH ND50H						
Magnetic Materials (A)	Remanence (Br)[T] (20°C)	Coercivity (Hcb)[kA/m] (20°C)	Intrinsic Coercivity (Hci)[kA/m] (20°C)	Energy (BHmax)[MGOe] (20°C)	Permeability (μr)	
	Spoke Magnet	1,28	875	1989	42	1,045
	V Type Magnet	1,28	875	1989	42	1,045
Insert Magnet	1,40	995	1353	50	1,045	
Magnetic Materials (B)	Rev. Temp. Coef. Of Induction (a)[%/C]	Rev. Temp. Coef. Of Intrinsic Coercivity (b)[%/C]	Max. Working Temperature (Tmax)[C]	Conductivity (σ)[S*10 <sup>6</sup> /m]	Density (ρ)[g/cm <sup>3</sup> ]	
	Spoke Magnet	-0,1	-0,55	120	0,667	7,65
	V Type Magnet	-0,1	-0,55	120	0,667	7,65
Insert Magnet	-0,11	-0,65	120	0,667	7,65	
Motor General Characteristics	Poles	Phases	Nominal Current Density (Jnom)[A/mm <sup>2</sup> ]	Lamination Factor (cs)[%]	Fill Factor (ff)[%]	
	6	3	4	95	60	
	Air Gap Length (Lg)[mm]	Rotor Inner Radius (Rri)[mm]	Rotor Outer Radius (Rro)[mm]	Outer Radius (Rso)[mm]	Motor Active Length (L)[mm]	
	0,7	20	70	115	69,4	
Winding General Characteristics	Pole Turns	Parallel Or Series	Layers	Layers Analogy	Overlap	
	48	Parallel	2	[50 50]%	1	
Stator General Characteristics	Slots per Pole per Phase (Spp)[Num]	Yoke 2 Tooth Normalized [%]	Tooth Parallelization [%]	Tooth Tips [%]	Tooth 2 Slot [%]	
	2	214	125	90	65	
	Tips 2 Tooth [%]	Tips 2 Tips [%]	Inner Fillet (mm)	Outer Fillet (mm)		
	13	20	1,4	2,2		
Rotor General Characteristics	Spoke Channel		Saliency			
	Spoke Channel Angle 2 Polar Angle [%]	Spoke Channel Depth 2 Active Pole Radius [%]	Saliency [%]	Saliency Depth 2 Air Gap [%]		
	22	25	82	125		
	Yoke & Pole Channel					
	Inner Yoke Radius 2 Channel Width [%]	Active Pole Radius 2 Yoke Radius [%]	Channel Width 2 Active Length [%]			
	100	68	33			
Magnet Position Characteristics	Insert Magnet			Spoke Magnet		
	Insert PM Depth 2 Active Pole Radius [%]	Insert PM Length 2 Possible Length [%]	Insert PM Area per Pole [mm <sup>2</sup> ]	Spoke Area per Pole [mm <sup>2</sup> ]	Spoke Magnet Direction [deg]	
	34	50	80	40	180	
	V Type Magnet					
	V Type PM Angle On Top 2 Possible Angle [%]	V Type PM Top Depth 2 Active Pole Radius [%]	V Type PM Angle On Bottom 2 Possible Angle [%]	V Type PM Bottom Depth 2 Active Pole Radius [%]	V Type PM Area per Pole [mm <sup>2</sup> ]	
	87	33	25	76	120	
Flux Barriers Characteristics	Insert PM		V Magnet			
	Insert PM FB Width 2 Insert PM Width [%]	Insert PM FB Length 2 Insert PM Length [%]	V Type PM Top FB Left 2 Right Length [%]	V Type PM Top FB Right Length 2 V Type PM Length [%]	V Type PM Bottom FB Length 2 V Type PM Length [%]	V Type PM Bottom FB Arc Angle Bottom [deg]
	150	12	32	18	10	180
Rotor Fillets	Saliency		Main Flux Barrier (Rotor Yoke) Fillets			
	Fillet [mm]	Main FB inner Fillet [mm]	Main FB Middle Fillet [mm]	Main FB Outer Fillet [mm]		
	5	2	4	1,5		
	Insert Flux Barrier		V Type PM			
	Insert PM Top Fillet [mm]	Insert PM Bottom Fillet [mm]	V Type PM Top & Left Fillet [mm]	V Type PM Top & Right Fillet [mm]		
	0,4	0,2	0,6	0,4		

Σχ.5.3.4.1 Αναλυτικός πίνακας χαρακτηριστικών μηχανής με μαγνήτες τύπου ND42UH & ND50H

Στη συγκεκριμένη γεωμετρία συμμετέχουν δύο είδη μαγνητών : Ο ND42UH στις θέσεις spoke και V-type και ο ND50H στη θέση insert-type. Ο τελευταίος καταλαμβάνει αυτή τη θέση γιατί απομαγνητίζεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία σε σχέση με τον ND42UH, ο οποίος δεν απομαγνητίζεται μέχρι τους 120°C. Οι μέγιστες λειτουργικές θερμοκρασίες των μαγνητών αυτών , σύμφωνα με τους κατασκευαστές είναι 180°C για τον ND42UH και 120°C για τον ND50H . Συνεπώς η μηχανή θα εξεταστεί μέχρι τους 120°C

#### 5.3.4.1 ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

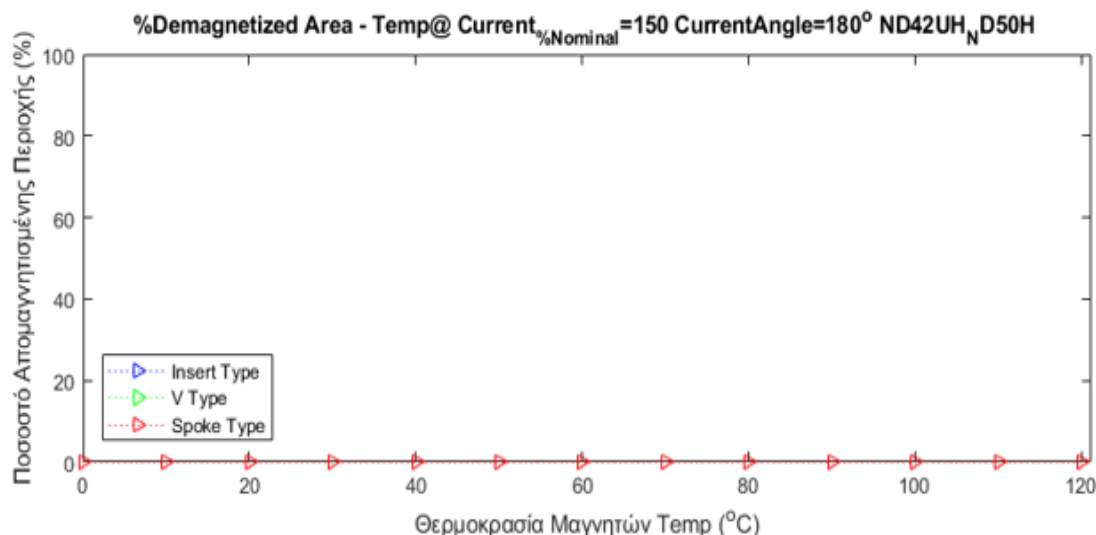
Στο κομμάτι αυτό αναπαρίστανται με τη μορφή πίνακα οι επιδόσεις και τα χαρακτηριστικά αυτής της μηχανής συνδυασμένων μαγνητών.

Machine: ND42UH & ND50H			
Nominal @MTPA Back EMF <sub>RMS</sub> [V]	35,60	THD <sub>BackEMF</sub> [%]	8,71
I <sub>Nominal</sub> [A]	42,25	MTPA <sub>Nominal</sub> [Deg]	110,00
L <sub>d</sub> [mH]	0,96	No Load Flux <sub>d</sub> [mWb]	76.06
L <sub>q</sub> [mH]	2,01	Nominal f <sub>Electr.</sub> [Hz]	55,00
Torque[Nm]	35,00	Torque <sub>Ripple</sub> [%]	15,41

Σχ.5.3.4.1.1 Εικόνα συγκεντροτικών στοιχείων μηχανής (ND42UH & ND50H).

#### 5.3.4.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 1.5 ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα που ακολουθεί , η συγκεκριμένη μηχανή δεν απομαγνητίζεται καθόλου στο εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας των μαγνητών που παρέχει ο κατασκευαστής.

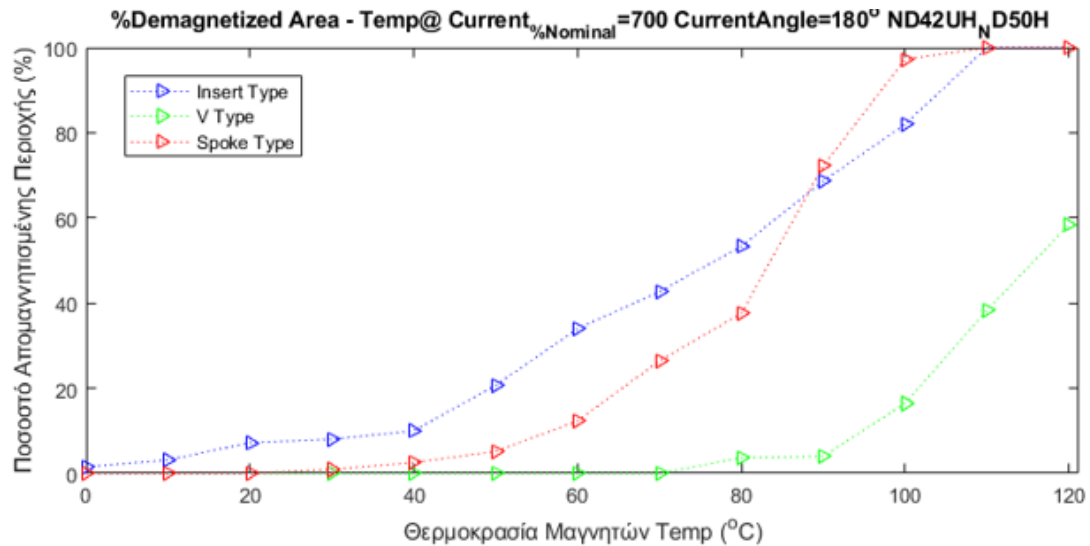


Σχ.5.3.4.2.1 %Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 1.5 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180° μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND42UH & ND50H

Ακόμα, η μηδενική απομαγνήτιση ακόμα και στη μέγιστη θερμοκρασία δίνει μία αρχική εντύπωση για τη τιμή του ποσοστού της απομαγνήτισης σα συνάρτηση της γωνίας του ρεύματος. Η τιμή αυτή είναι πράγματι μηδενική όπως υποθέσαμε μελετώντας το παραπάνω διάγραμμα.

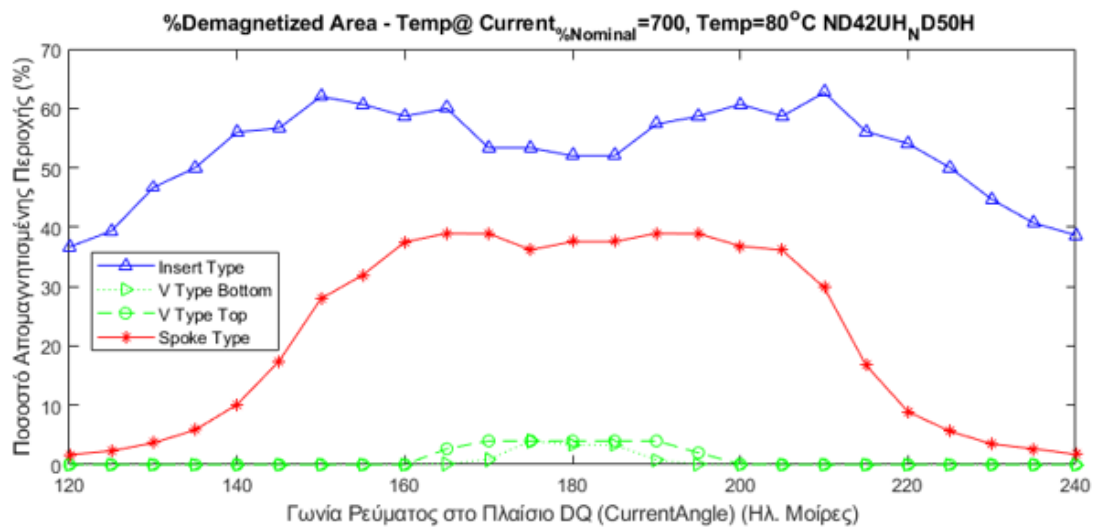
### 5.3.4.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 7 ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ

Η συγκεκριμένη μηχανή που αποτελεί μίξη δύο διαφορετικών μαγνητών στη γεωμετρία της περιγράφεται σε λειτουργική κατάσταση με ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό. Ακολουθεί γραφική παράσταση που φανερώνει τη συμπεριφορά απομαγνήτισης της συγκεκριμένης μηχανής σε όλο το θερμοκρασιακό εύρος .



Σχ.5.3.4.3.1 Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180° μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H&ND42UH

Παρακάτω φαίνεται η γραφική απεικόνιση εξάρτησης της απομαγνήτισης από τη γωνία ρεύματος για σταθερή θερμοκρασία 80°C.



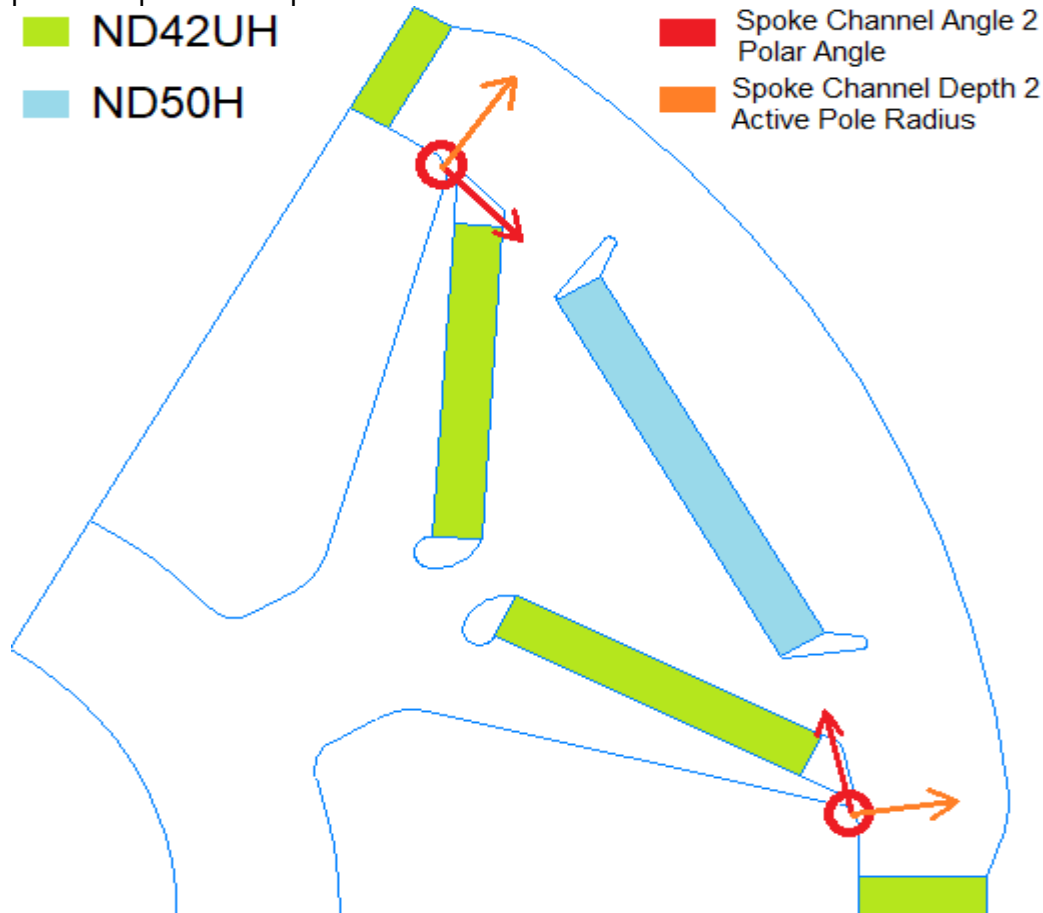
Σχ.5.3.4.3.2 %Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Γωνία ρεύματος. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό, σε θερμοκρασία 10°C, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H

Η μηχανή αυτή, δίνει συνδυασμένα χαρακτηριστικά των μηχανών που χρησιμοποιούν εξολοκλήρου μαγνήτες τύπου ND50H και ND42UH. Το μήκος της μηχανής συνδυασμού μαγνητών που απαιτείται για την παραγωγή ροπής 35Nm είναι σχεδόν ίδιο με αυτό της μηχανής ND42UH όπως και η συμπεριφορά της μηχανής στην απομαγνήτιση. Βελτίωση αποτελεί η ομοιομορφία που παρουσιάζει στην απομαγνήτιση στους μαγνήτες της. Αυτό σημαίνει πώς όλοι οι μαγνήτες απομαγνητίζονται στο ίδιο ποσοστό ασχέτως της θερμοκρασίας που επικρατεί. Στην συνέχεια γίνεται μια προσπάθεια βελτίωσης αυτής της ομοιομορφίας ακόμη

περισσότερο και συνάμα την αύξηση της απαιτούμενης θερμοκρασίας για την μέγιστη απομαγνήτιση των μαγνητών της μηχανής στο 10% όταν το ρεύμα είναι 7 φορές το ονομαστικό και η γωνία του με τον άξονα d είναι 180° μοίρες.

#### 5.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Στη συγκεκριμένη ενότητα επιλέχθηκαν δύο από τις γεωμετρικές σχεδιαστικές μεταβλητές (βλ. κεφ. 4) με σκοπό την μεταβολή τους και την επίβλεψη των αντίστοιχων μεταβολών που προκαλούν τόσο στο φαινόμενο της απομαγνήτισης όσο και στις επιδόσεις της μηχανής. Οι μεταβλητές που επιλέχθηκαν, είναι οι: “Spoke Channel Angle 2 Polar Angle” και “Spoke Channel Depth 2 Active Pole Radius”. Για να γίνει πιο σαφής η επίπτωση που έχει η μεταβολή αυτών των μεταβλητών στη γεωμετρία δίνεται μια τυπική απεικόνιση.



Σχ.5.4.1 Εικόνα γεωμετρίας δρομέα. Η γεωμετρική αλλαγή που λαμβάνει χώρα όταν επιρρεάζονται οι γεωμετρικές μεταβλητές που τίθενται προς μελέτη.

Η μηχανή που εφαρμόζονται αυτές οι μεταβολές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών είναι η μηχανή με δύο διαφορετικά είδη μαγνήτη που περιεγράφηκε παραπάνω (βλ. κεφ. 5.2.4). Οι υπόλοιπες μεταβλητές σχεδίασης είναι σταθερές και οι τιμές τους βρίσκονται στον πίνακα (Σχ.5.3.4.1)

Οι τιμές των μεταβλητών “Spoke Channel Angle 2 Polar Angle” και “Spoke Channel Depth 2 Active Pole Radius” στις οποίες μελετήθηκαν οι μηχανές είναι:

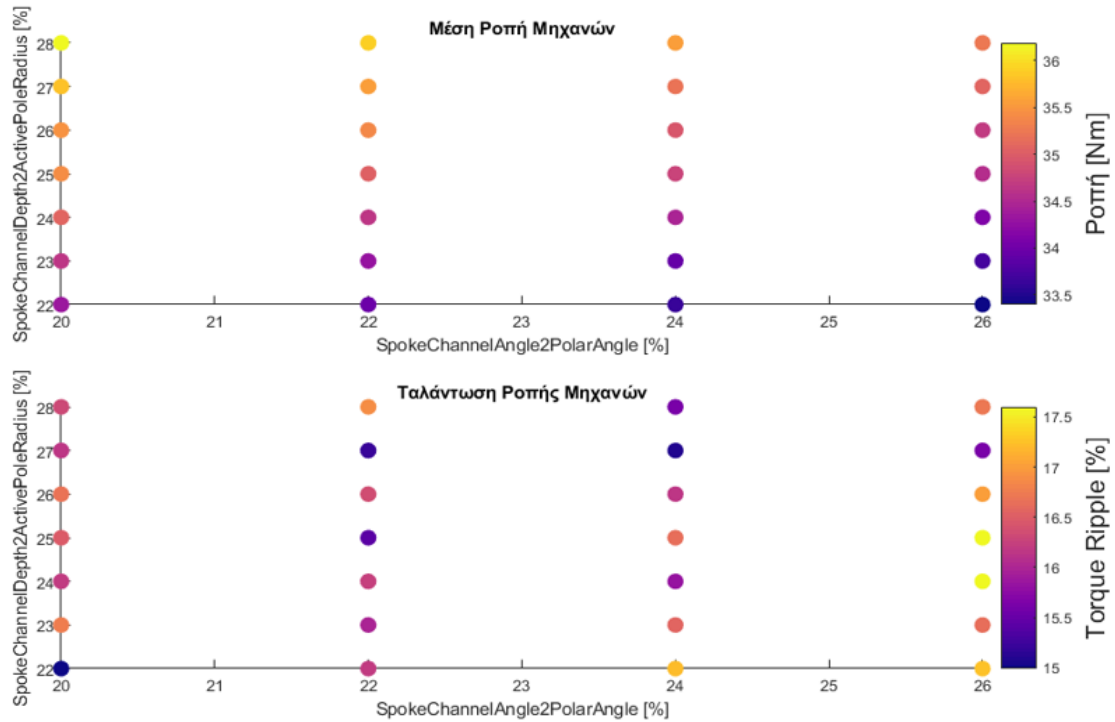
Τιμές Γεωμετρικών Μεταβλητών (Total = 28 machines)							
Spoke Channel Depth 2 Active Pole Radius (v=7)	22	23	24	25	26	27	28
Spoke Channel Angle 2 Polar Angle (%)	20	22	24	26			

Σχ.5.4.2 Πίνακας των τιμών των υπο μελέτη μεταβλητών. Με μπλέ χρώμα είναι οι τιμές της μηχανής που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 5.2.4.

### 5.4.1 ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

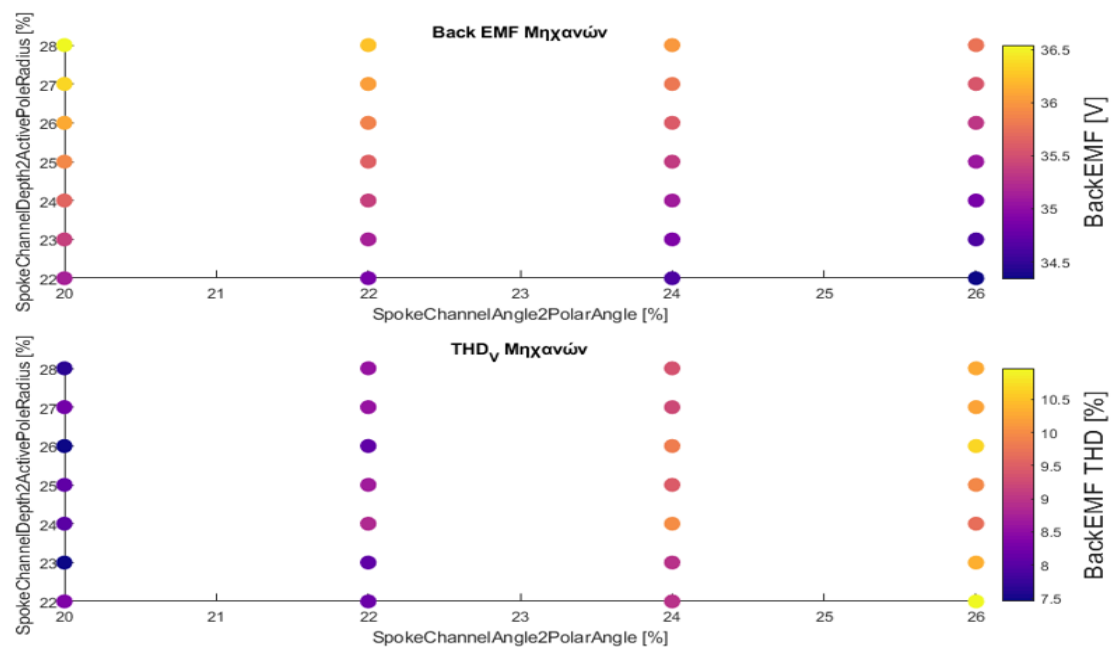
Το πλήθος των αναλυμένων μηχανών είναι 28. Επομένως, είναι δύσκολο να γίνει η διαγραμματική απεικόνιση της ανάλυσης της κάθε μηχανής ξεχωριστά. Για το λόγο αυτό, δίνονται οι επιδόσεις της κάθε μηχανής και τα χαρακτηριστικά της σε ένα διάγραμμα με άξονες τις δύο μεταβλητές της γεωμετρίας και ύψος (άξονας z) το αποτέλεσμα - επίδοση (ροπή ταλάντωση ροπής, Back EMF κλπ.). Σημειώνεται, πως όλες οι μηχανές τροφοδοτούνται με ρεύμα 42.25A σε συχνότητα 55 ηλ. Hz.

Η ροπή της κάθε μηχανής δίνεται στη συνέχεια μαζί με την ταλάντωση ροπής που έχει.



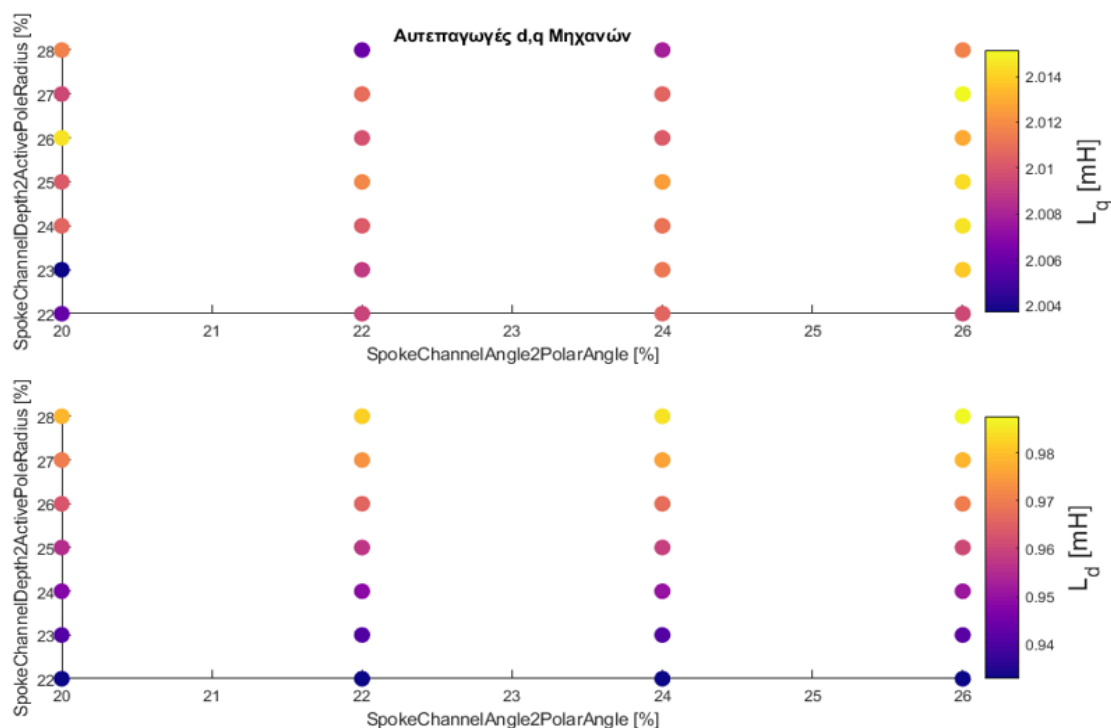
Σχ.5.4.1.1 Ροπή και ταλάντωση ροπής των 28 μηχανών σε συνάρτηση με τις τροποποιηθήσες μεταβλητές.

Στη συνέχεια, δίνονται για την κάθε μηχανή η τιμή της Back EMF και η τιμή του THD<sub>v</sub>:



Σχ.5.4.1.2 Back EMF και η τιμή του THD<sub>v</sub> των 28 μηχανών σε συνάρτηση με τις τροποποιηθήσες μεταβλητές.

Ακολουθούν, για την κάθε μηχανή οι τιμές των αυτεπαγωγών των αξόνων d,q:



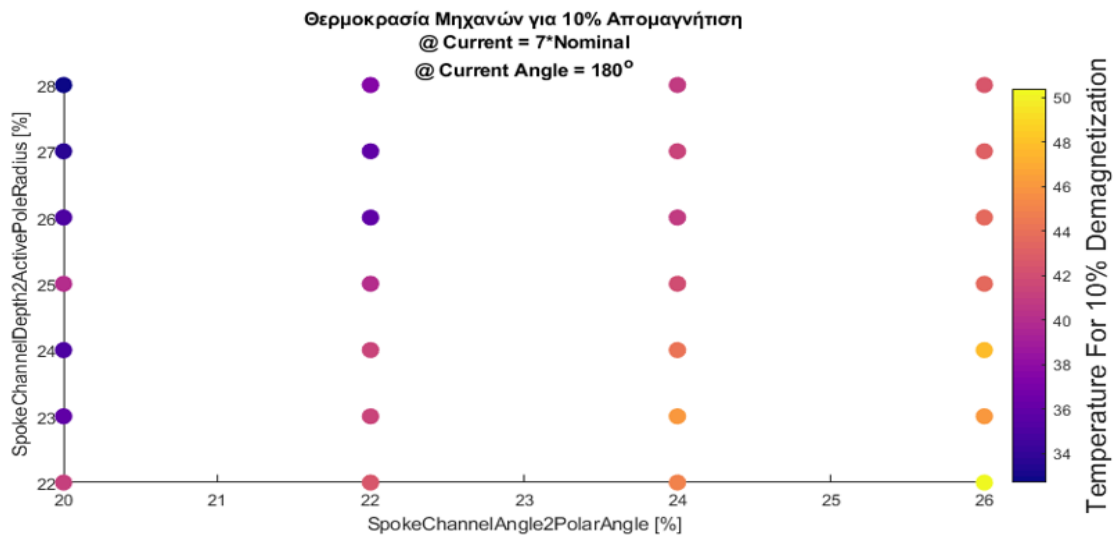
Σχ.5.4.1.3 Οι τιμές των αυτεπαγωγών των αξόνων d,q των 28 μηχανών σε συνάρτηση με τις τροποποιηθής μεταβλητές.

Παρατηρούμε πως κυρίως η ροπή μεταβάλλεται, από τη διαφοροποίηση αυτών των γεωμετρικών μεταβλητών. Ορισμένες μηχανές έχουν ροπή πάνω από 35.5Nm ενώ άλλες είναι κάτω από 34Nm. Ακόμη αλλάζει και το ποσοστό της ταλάντωσης ροπής. Η τιμή των αυτεπαγωγών ωστόσο δεν τροποποιείται πολύ, όπως και η τιμή της Back EMF.

Η βελτιστοποίηση ως προς τις επιδόσεις αποτελεί ένα αρκετά ενδιαφέρον αντικείμενο το οποίο χρησιμοποιεί και ερευνητικά αντικείμενα άλλων κλάδων όπως εξελικτικοί αλγόριθμοι, αλγόριθμοι εύρεσης αρχικού πεδίου ορισμού (grid search) κλπ. Η επεξεργαστική ισχύς απαιτείται να είναι αρκετά μεγάλη και η παραλληλοποίηση εκτέλεσης κώδικα είναι αναγκαία.

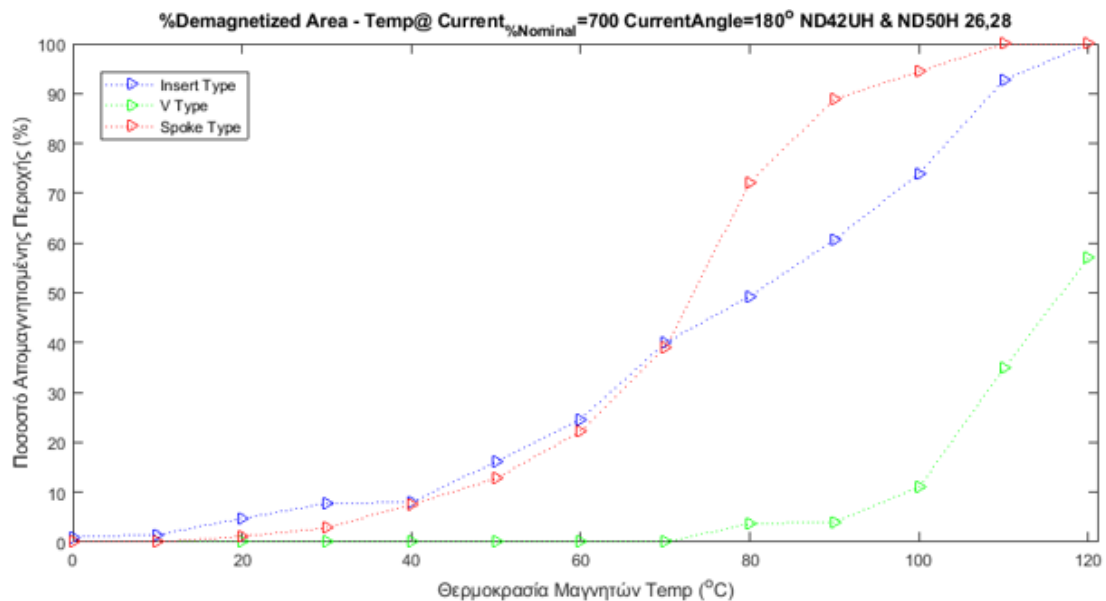
## 5.4.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 7 ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ

Σε αυτή την ενότητα αναλύονται οι μηχανές ως προς την απομαγνήτισή τους με βάση το περιοριστικό μοντέλο. Όπως είδαμε και παραπάνω, η απομαγνήτιση αφορά ξεχωριστά το κάθε είδος (spoke, insert, V-type) και συνεπώς, όταν επιθυμούμε η απομαγνήτιση να είναι κάτω από 10% εννοείται πως όλοι οι μαγνήτες ξεχωριστά οφείλουν να έχουν απομαγνητισμένη περιοχή λιγότερη από το 10% της ολικής τους. Για το λόγο αυτό, ένας τρόπος ανάδειξης της επίπτωσης που έχει στην απομαγνήτιση η τροποποίησή των γεωμετρικών μεταβλητών, είναι η εύρεση της θερμοκρασίας στην οποία όλοι οι μαγνήτες έχουν το πολύ 10% απομαγνητισμένη περιοχή. Η μελέτη αυτή γίνεται, όταν η μηχανή διαρρέεται από ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό και η γωνία ρεύματος είναι 180° μοίρες με αναφορά τον άξονα d. Η εύρεση ωστόσο της τιμής της θερμοκρασίας όταν η ανάλυση της μηχανής έχει γίνει με διακριτό βήμα γίνεται με γραμμική παρεμβολή. Τα αποτελέσματα των μηχανών, όσον αφορά την θερμοκρασία που οδηγεί στο 10% απομαγνήτισης, δίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχ.5.4.2.1 Διάγραμμα της θερμοκρασίας που οδηγεί σε 10% μέγιστη απομαγνήτιση των μαγνητών της κάθε μηχανής που εξετάστηκε με βάση την τροποποίηση των χαρακτηριστικών της γεωμετρίας.

Παρατηρούμε πως η μηχανή που απομαγνητίζεται σε υψηλότερη θερμοκρασία είναι αυτή που οι μεταβλητές είναι {26,22}. Ωστόσο η τεράστια μείωση που παρουσιάζει η συγκεκριμένη μηχανή στη ροπή, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της ροπής, δεν μας οδηγεί να την επιλέξουμε για περαιτέρω διερεύνηση. Η μηχανή που κρίθηκε εν τέλει, κατάλληλη είναι η μηχανή με χαρακτηριστικά {26,28}.



Σχ.5.4.2.2 %Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180° μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H&ND42UH {26,28}

## 5.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΠΑΧΟΣ ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (Η ΜΗΧΑΝΗ ND42UH ΜΕ 7ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ ΡΕΥΜΑ)

Η προηγούμενη μηχανή που επιλέχθηκε ( {Spoke\_Channel\_Angle\_2\_Polar\_Angle, Spoke\_Channel\_Depth\_2\_Active\_Pole-Radius} = {26% ,28%} ) διερευνάται ως προς την εξάρτηση των επιδόσεων και της συμπεριφορά της στην απομαγνήτιση από το πάχος του εκάστοτε μαγνήτη. Όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές είναι σταθερές και



δίνονται στον πίνακα (5.3.4.1) .Οι μεταβλητές, που μεταβάλλουμε, είναι τρεις και για αυτό τα διαγράμματα δίνονται σε τρισδιάστατη μορφή.

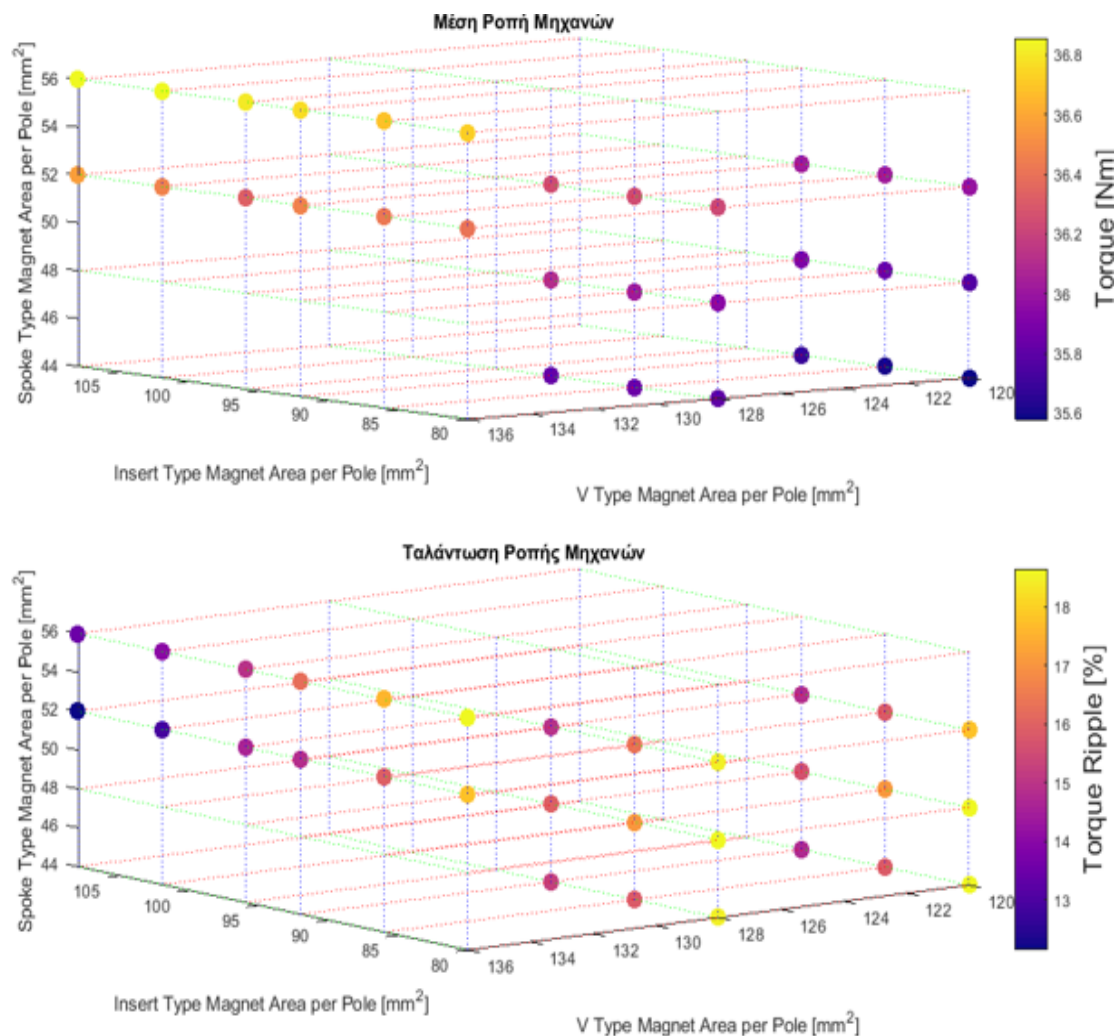
Οι τιμές των μεταβλητών δίνονται σε πίνακα:

Τιμές Επιφάνειας Μαγνητών ανα Πόλο (Α) (Total = 18 machines)						
Spoke Type (mm <sup>2</sup> )	44	48	52			
Insert Type (mm <sup>2</sup> )	80	86	92			
V Type (mm <sup>2</sup> )	120	128				
Τιμές Επιφάνειας Μαγνητών ανα Πόλο (Β) (Total = 12 machines)						
Spoke Type (mm <sup>2</sup> )	52	56				
Insert Type (mm <sup>2</sup> )	80	86	92	96	102	108
V Type (mm <sup>2</sup> )	136					

Σχ.5.5.1 Πίνακας των τιμών των υπο μελέτη μεταβλητών. Οι τιμές αναφέρονται στην εγκάρσια στον άξονα επιφάνεια που καταλαμβάνουν οι μαγνήτες ανα πόλο.

### 5.5.1 ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

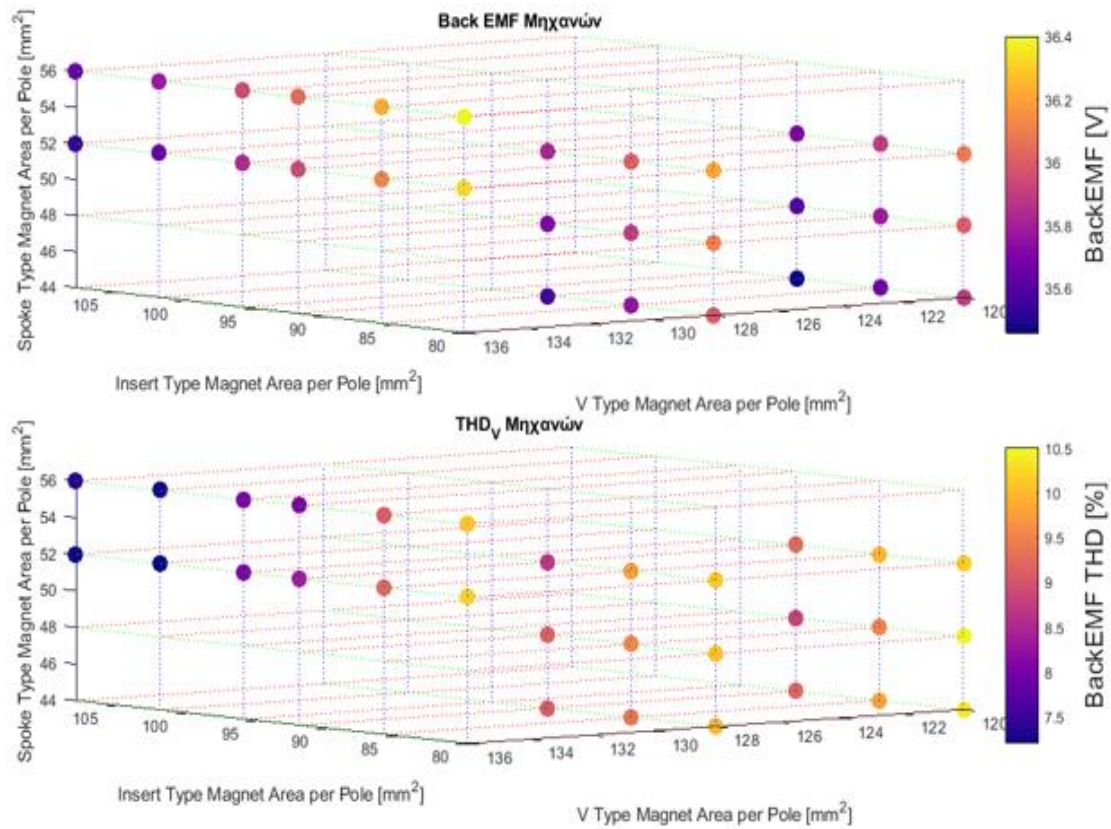
Σε αυτή την ανάλυση επιλέγεται να ακολουθηθεί πάλι η παραπάνω απεικόνιση των χαρακτηριστικών και των επιδόσεων. Πιο κάτω φαίνεται ένα διάγραμμα της ροπής και της ταλάντωσης της με βάση το πάχος – επιφάνεια που καταλαμβάνουν οι μαγνήτες της μηχανής.



Σχ.5.5.1.1 Ροπή και ταλάντωση ροπής των 30 μηχανών σε συνάρτηση με την επιφάνεια των μαγνητών ανά πόλο

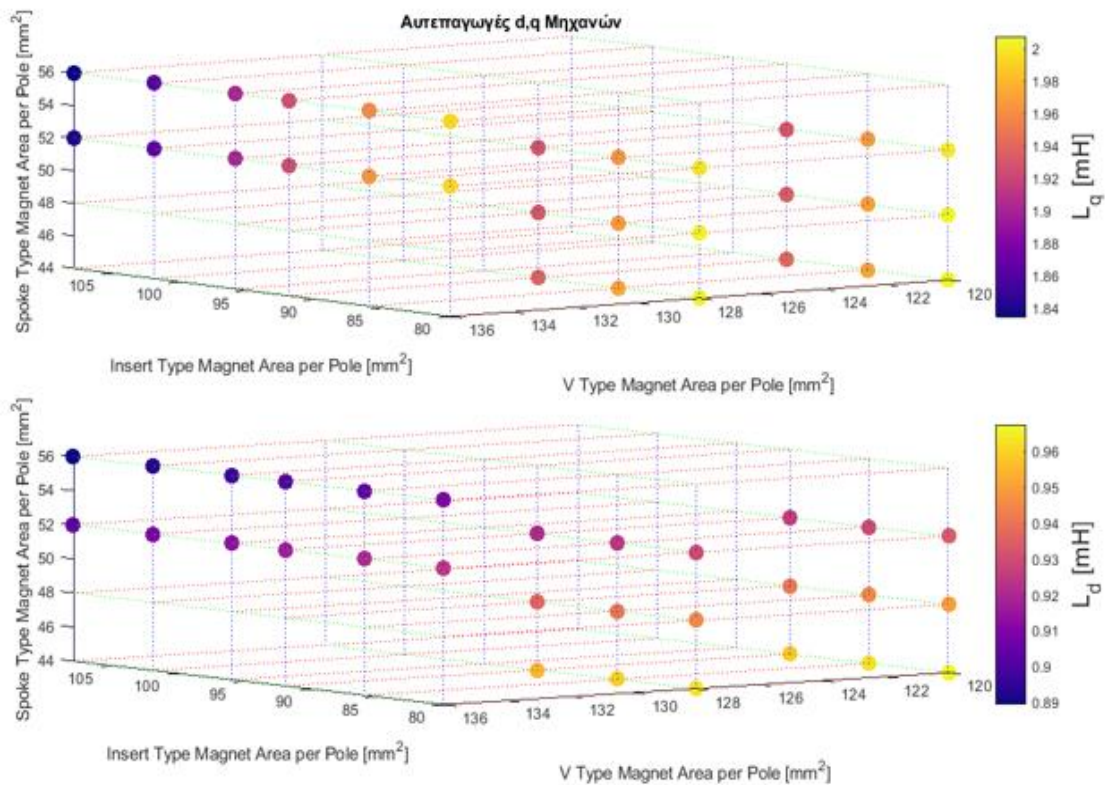


Ακολουθεί η επίπτωση στην Back EMF και στο THD<sub>v</sub>:



Σχ.5.5.1.2 Back EMF και η τιμή του THD<sub>v</sub> των 30 μηχανών σε συνάρτηση με την επιφάνεια των μαγνητών ανά πόλο

Τέλος, δίνονται και οι τιμές των αυτεπαγωγών των αξόνων d,q:

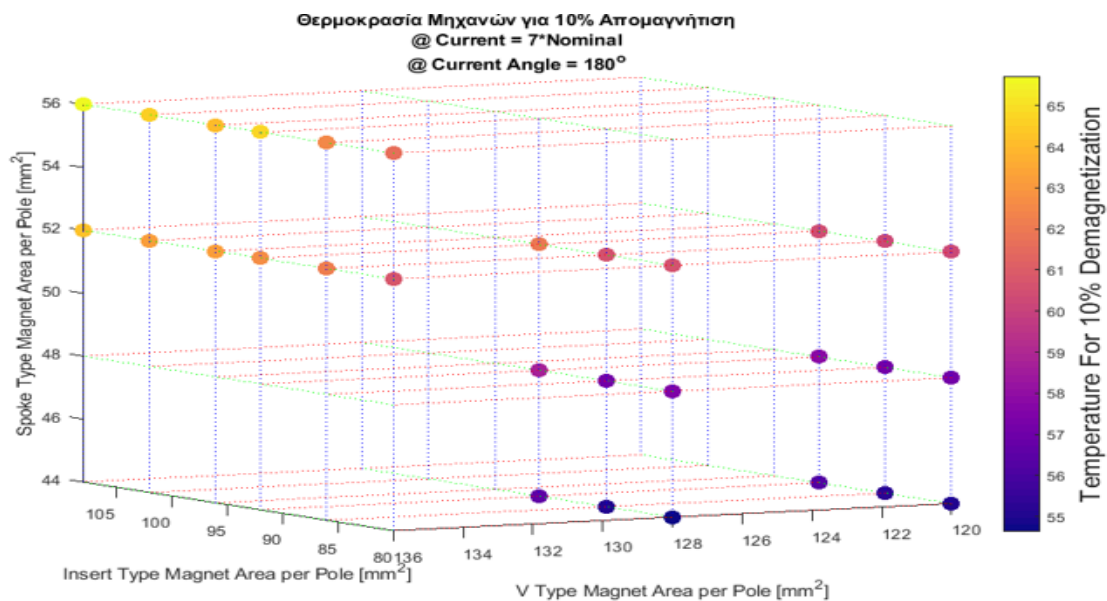


Σχ.5.5.1.3 Οι τιμές των αυτεπαγωγών των αξόνων d,q των 30 μηχανών σε συνάρτηση με την επιφάνεια των μαγνητών

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, παρατηρούμε πως η μεταβολή στο πάχος των μαγνητών επιφέρει διαφοροποιημένα χαρακτηριστικά στη ροπή. Η μηχανή με την μεγαλύτερη τιμή ροπής είναι αυτή με το μεγαλύτερο όγκο μαγνητών. Η συμπεριφορά της ποιότητας της ροπής ωστόσο είναι αρκετά μειωμένη, όταν η τιμή των μαγνητών insert Type είναι η μικρότερη από αυτές που τέθηκαν προς μελέτη (80 mm<sup>2</sup> /pole).

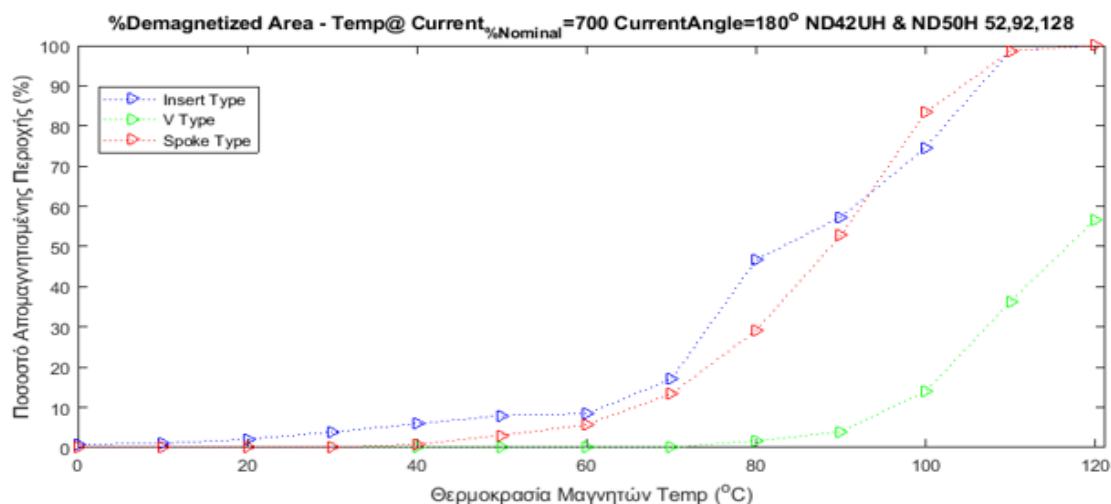
### 5.5.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΑΠΟΜΑΓΝΗΤΙΣΗ ΜΕ ΡΕΥΜΑ 7 ΦΟΡΕΣ ΤΟ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ

Στην απομαγνήτιση αναμένουμε μια αύξηση της ανθεκτικότητας των μαγνητών όσο αυξάνεται ο όγκος τους. Αυτό γίνεται εύκολα εμφανές και στο διάγραμμα της θερμοκρασίας που απαιτείται για να απομαγνητιστούν έως 10%. Το διάγραμμα αυτό παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχ.5.5.2.1 Διάγραμμα της θερμοκρασίας που οδηγεί σε 10% μέγιστη απομαγνήτιση των μαγνητών της κάθε μηχανής που εξετάστηκε με βάση την επιφάνεια των μαγνητών ανά πόλο.

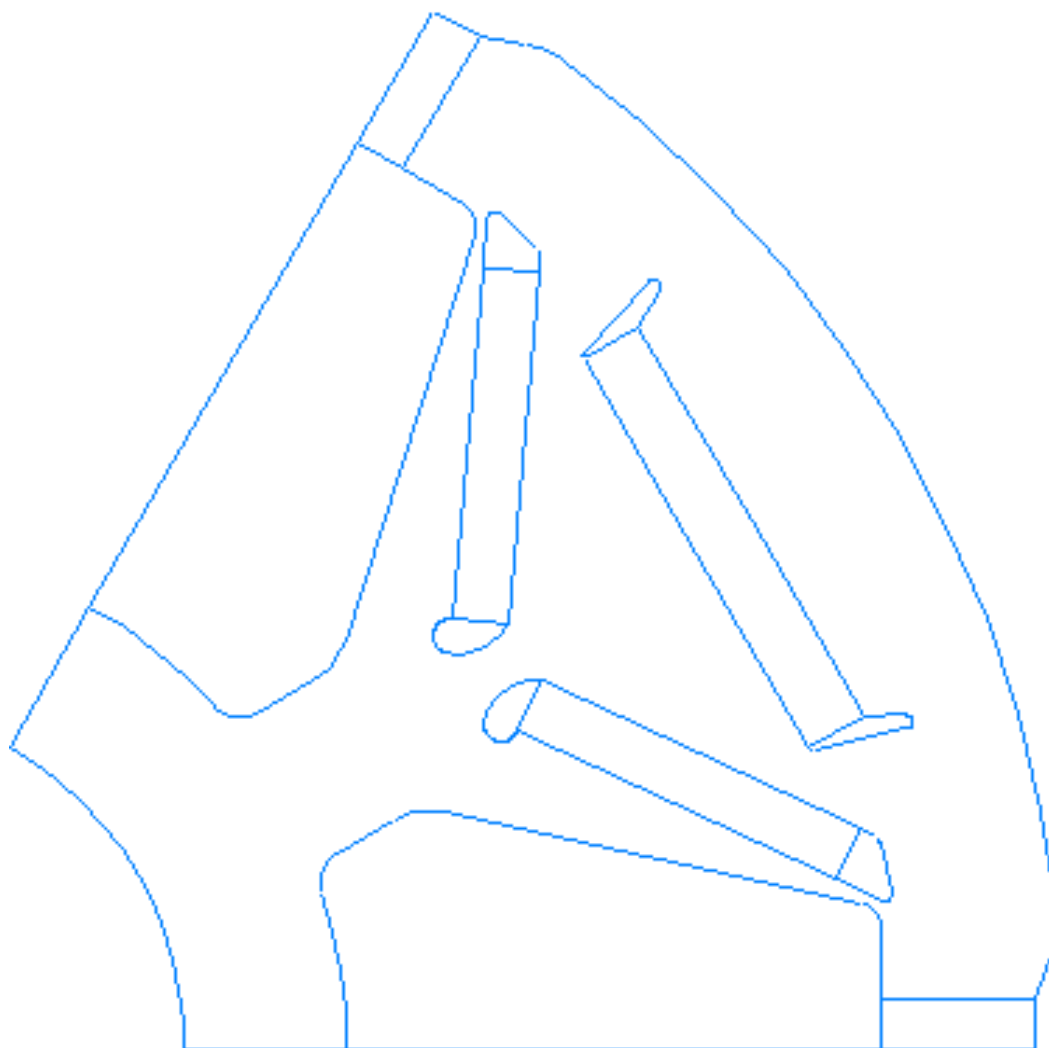
Μία αρκετά καλή επιλογή είναι η μηχανή που έχει επιφάνεια ανά πόλο μαγνητών {spoke, insert, v-type} = {52, 92, 128}. Παρακάτω δίνεται ένα διάγραμμα της απομαγνήτισης της συγκεκριμένης μηχανής.



Σχ.5.5.2.2 %Απομαγνητισμένη περιοχή μαγνητών – Θερμοκρασία. Για ρεύμα 7 φορές το ονομαστικό σε γωνία 180° μοίρες με αναφορά τον άξονα d, για την μηχανή με μαγνήτες τύπου ND50H&ND42UH {52,92,128}

Η επιλογή της παραπάνω μηχανής έγινε με στόχο την εύρεση της γεωμετρίας που μπορεί να είναι ανθεκτική σε ακραίες συνθήκες σφάλματος με το ελάχιστο δυνατό όγκο μαγνητών χωρίς την υπέρμετρη απόκλιση από τις αρχικές τιμές ροπής και χαρακτηριστικών.

Συμπερασματικά, λοιπόν, καταλήγουμε στη σημασία που έχει τόσο το είδος του μαγνήτη όσο και το πάχος και η θέση του σε μία γεωμετρία μηχανής στο φαινόμενο της απομαγνήτισης. Αυτό υποστηρίζεται μέσα από τις παραπάνω προσομοιώσεις και αποτελέσματα.



Σχ.5.5.2.3 Εικόνα γεωμετρίας δρομέα της επιλεγμένης μηχανής

Στην συγκεκριμένη εργασία, οι μηχανές αυτές αναλύθηκαν παράλληλα σε πολλά Virtual machines με αρκετούς επεξεργαστικούς πυρήνες το κάθε ένα. Η εκτέλεση βελτιστικών αλγορίθμων δεν έγινε καθώς στην εργασία θεωρήθηκε σκόπιμο να αναδειχθούν οι τρόποι και μέθοδοι της ανάλυσης της απομαγνήτισης.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

### **ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

#### **6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε ανάλυση ηλεκτρικών μηχανών μονίμων μαγνητών ως προς το φαινόμενο της απομαγνήτισης σε συνθήκες υψηλού ρεύματος στάτη και διαφορετικών θερμοκρασιών. Τα αποτελέσματα, των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν, οδηγούν σε κατάλληλη επιλογή γεωμετρίας και είδους μαγνητών με γνώμονα τη μείωση υλικού μαγνήτη και την αύξηση της αντοχής σε σφάλματα.

#### **6.2 ΣΥΝΟΨΗ**

Στην παρούσα διπλωματική επιχειρήθηκε αρχικά μελέτη του επιστημονικού πεδίου των ηλεκτρικών μηχανών μονίμων μαγνητών. Επιλέχθηκε το είδος της τοπολογίας του δρομέα που κρίθηκε ότι θα αναδείκνυε με βέλτιστο τρόπο το φαινόμενο της απομαγνήτισης. Ακολουθεί, στη συνέχεια, μια λεπτομερής ανασκόπηση επιστημονικών άρθρων και δημοσιεύσεων που μελετούν και αναλύουν την απομαγνήτιση μονίμων μαγνητών. Για τη δημιουργία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν στην παρούσα εργασία, απαιτήθηκε η ανάπτυξη αλγορίθμων στο MATLAB, οι οποίοι συστηματικά αναλύουν παραμετροποιημένη τη γεωμετρία αλλά και αλληλεπιδρούν με το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων FEMM για την επίτευξη του περιοριστικού μοντέλου απομαγνήτισης. Οι αλγόριθμοι αυτοί, χρησιμοποιηθήκαν σαν μέθοδος βελτιστοποίησης ως προς την επιλογή του είδους των μαγνητών, ως προς ορισμένες τιμές γεωμετρικών μεταβλητών και ως προς το πάχος του εκάστοτε μαγνήτη με γνώμονα την αποδοτικότερη χρήση κάθε μαγνητικού υλικού λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο της απομαγνήτισης.

Τα στάδια που οδήγησαν στην τελική βελτιστοποιημένη γεωμετρία είναι:

- Η επιλογή του είδους μαγνήτη που αντέχει έως ένα βαθμό την απομαγνήτιση σε θερμοκρασία λειτουργίας της μηχανής επί ένα συντελεστή απόκλισης (π.χ. 130%)
- Η μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ώστε οι μαγνήτες να απομαγνητίζονται με παρόμοια συμπεριφορά, δηλαδή στην ίδια θερμοκρασία να έχουν παρόμοιο ποσοστό απομαγνήτισης.
- Αύξηση του πάχους των μαγνητών προκειμένου να επιτευχθεί πλήρης αντοχή στην απομαγνήτισή τους, σε αυτή τη συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Παρατηρούμε, ότι η πιο κρίσιμη γωνία ρεύματος για την απομαγνήτιση είναι η γωνία επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου 180 μοιρών ως προς τη μαγνήτιση των μονίμων μαγνητών. Όταν αυτή παραμένει σταθερή και ίση με 180 μοίρες, τότε η απομαγνήτιση κρίνεται εξ ολοκλήρου από τη θερμοκρασία. Ωστόσο, όταν υπάρχουν μεγάλες αλλαγές στις γεωμετρικές μεταβλητές, θεωρείται θεμιτό να ελέγχεται αν η κρίσιμη γωνία επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου παραμένει στις 180 μοίρες.

#### **6.3 ΚΥΡΙΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Τα κυριότερα συμπεράσματα που εξάγονται από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι :

- Η μέθοδος, που αναλύθηκε και χρησιμοποιήθηκε, δίνει τη δυνατότητα εύκολης και γρήγορης ανάλυσης απομαγνήτισης μηχανής οποιασδήποτε διαμόρφωσης εσωτερικών μόνιμων μαγνητών καθώς και κάθε είδους τυλίγματος και γεωμετρίας στάτη.
- Η αύξηση της πυκνότητας ισχύος της μηχανής, όταν οι μαγνήτες που χρησιμοποιούνται έχουν υψηλότερη παραμένουσα μαγνήτιση. Αυτό γίνεται εμφανές, αφού καθώς αλλάζουμε το είδος των μαγνητών, προκύπτει η ανάγκη για μεταβολή του ενεργού μήκους της μηχανής με σκοπό τη διατήρηση των επιδόσεων της ονομαστικής

ροπής στα 35 Nm. Με αυτόν τον τρόπο, μεταβάλουμε έμμεσα την πυκνότητα ισχύος της μηχανής.

- Η απομαγνήτιση μεταβάλλεται έντονα με την αύξηση της θερμοκρασίας και καθοριστικό ρόλο σε αυτό διαδραματίζουν οι συντελεστές θερμοκρασίας της συνεχουσας δύναμης των μαγνητών.
- Δευτερεύοντα αλλά όχι αμελητέο ρόλο στην απομαγνήτιση έχει η γωνία των ρευμάτων του στάτη, επειδή η μέγιστη απομαγνήτιση δεν απαντάται σε όλους τους μαγνήτες σε επιβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο με γωνία 180 μοίρες ως προς τη μαγνήτιση των μονίμων μαγνητών.
- Η γεωμετρία του δρομέα και ο κορεσμός του πυρήνα δίνουν την ικανότητα στο σχεδιαστή ομοιόμορφης κατανομής της απομαγνήτισης.
- Ο σχεδιασμός φραγμάτων ροής στα άκρα των μαγνητών είναι απαραίτητος για την αύξηση της αντοχής της απομαγνήτισης μέσω της μείωσης του πεδίου κοντά στο μαγνήτη.
- Σημαντική συνεισφορά στην αύξηση αντοχής σε συνθήκες απομαγνήτισης δίνει και το πάχος των μαγνητών, αφού όσο αυξάνεται τόσο πιο πολύ αντιστέκονται οι μαγνήτες στην απομαγνήτιση.
- Οι βελτιώσεις των χαρακτηριστικών που επιτεύχθηκαν κατά τη βελτιστοποίηση της τελικής γεωμετρίας εσωτερικών μονίμων μαγνητών, δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε σχέση με εκείνα που προέκυψαν από την προκαταρκτική σχεδίαση.

#### **6.4 Η ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗ**

Τα κυριότερα σημεία συνεισφοράς της διπλωματικής εργασίας στην Επιστήμη είναι τα ακόλουθα:

- Συγκέντρωση βιβλιογραφικών αναλύσεων για τα μοντέλα της απομαγνήτισης, την επίπτωση της γωνίας του πεδίου στην απομαγνήτιση και την επίπτωση της θερμοκρασίας στη μεταβολή των χαρακτηριστικών μεταβλητών των μαγνητών.
- Ανάπτυξη γενικευμένων μοντέλων ανάλυσης ηλεκτρικών κινητήρων με βάση το συνδυασμό των προγραμμάτων FEMM και MATLAB.
- Αξιοποίηση δυνατότητας επεξεργασίας μεγάλου πλήθους μηχανών σε παραλληλία επεξεργαστικών πυρήνων, μέσω Παραλληλοποίησης Κώδικα.
- Ανάπτυξη πρακτικού αλγορίθμου απομαγνήτισης με βάση κατάλληλο περιοριστικό μοντέλο.
- Εφαρμογή των αλγορίθμων για την εύρεση αριθμητικών αποτελεσμάτων σε μηχανή με τρία είδη τοποθέτησης μαγνητών (spoke, insert, v-type).
- Αποξευγμένη ανάλυση της απομαγνήτισης από το ενεργό μήκος της μηχανής.
- Ανάδειξη της πυκνότητας ισχύος ανάλογα με τα είδη των μαγνητών που χρησιμοποιούνται.
- Εξάρτηση της απομαγνήτισης από το είδος των μονίμων μαγνητών που χρησιμοποιούνται όπως διάφορα είδη μαγνητών Νεοδυμίου.
- Εξάρτηση της απομαγνήτισης από τη γεωμετρία της μηχανής.
- Εξάρτηση της απομαγνήτισης από το πάχος των μαγνητών.
- Τοποθέτηση οδηγικού κύκλου ως συνάρτηση πυκνότητας – πιθανότητας στους άξονες T-ω.

## **6.5 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ**

Τα κυριότερα σημεία, τα οποία αναδεικνύονται μέσα από την παρούσα εργασία, ότι χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης είναι :

- Πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων της επιλεγείσας μηχανής όσον αφορά τα χαρακτηριστικά και τις επιδόσεις της καθώς και την αντοχή της στην απομαγνήτιση.
- Περαιτέρω ανάλυση ευαισθησίας των λοιπών γεωμετρικών χαρακτηριστικών της μηχανής και την επίδραση τους στην απομαγνήτιση και στην επίδοση.
- Χρήση των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν στη διάρκεια εκπόνησης της μελέτης σε συνδυασμό με αλγορίθμους προσομοίωσης βραχυκυκλωμάτων.
- Ανάλυση υπολοίπων μεθόδων απομαγνήτισης που περιγράφηκαν λεπτομερώς στο θεωρητικό μέρος της διπλωματικής, όπως γραμμικό και εκθετικό μοντέλο απομαγνήτισης.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

**Design of Rotating Electrical Machines** [Βιβλίο] / συγγρ. Juna Pyrhonen Tapani Jokinen and Valeria Hrabovcova. - [s.l.] : John Wiley & Sons, Ltd, 2008. - σ. 512. - 978-0-470-69516-6.

**Electrical Machine Analysis Using Finite Elements** [Βιβλίο] / συγγρ. Bianchi Nicola / επιμ. Group Taylor and Francis. - [s.l.] : CRC Press, 2005. - σ. 272. - 978-1-4200-5787-4.

**Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications** [Βιβλίο] / συγγρ. F.Gieras Jacek. - [s.l.] : Taylor & Francis CRC Press Group, 1997. - 3η Έκδοση : σ. 1089. - 978-1-4200-6440-7.

**Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά** [Βιβλίο] / συγγρ. Μανιάς Στέφανος Ν.. - Αθήνα : Εκδόσεις Συμείων, 2016. - 2η Έκδοση : σ. 512. - 978-960-9400-59-6.

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ** [Βιβλίο] / συγγρ. Βουρνάς Κ. Κονταξής Γ.. - Αθήνα : Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 2010. - σ. 311. - 978-960-266-304-2.

**ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ : ΗΛΕΚΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ** [Βιβλίο] / συγγρ. Μιχ.Π.Παπαδόπουλος. - Αθήνα : Έκδοση Εθνικού Μετσόβειου Πολυτεχνείου, 1995.

**ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ** [Βιβλίο] / συγγρ. Τεγόπουλος Ι.Α.. - Αθήνα : Εκδόσεις ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, 1991. - Τόμ. Β : 2 : σ. 315. - 978-960-266-196-3.

**Ηλεκτρικές Μηχανές** [Βιβλίο] / συγγρ. Charman Stephen J. / μεταφρ. Θεοδουλίδης Θεόδωρος Π.. - Αθήνα : Εκδόσεις Τζιόλα, 2004. - 4η έκδοση : σ. 899. - 978-960-418-192-6.

**Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία : Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία και Κύματα** [Βιβλίο] / συγγρ. Ι.Τσαλαμέγκας Ι.Ρουμελιώτης. - Αθήνα : Εκδόσεις Τζιόλα, 2015. - Τόμ. Α : σ. 851. - 978-960-418-241-5.

**Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία: Στατικά και Μόνιμα Πεδία** [Βιβλίο] / συγγρ. Ι.Ρουμελιώτης Ι.Τσαλαμέγκας. - Αθήνα : Εκδόσεις Τζιόλα, 2014. - Τόμ. Β : σ. 855. - 978-960-418-292-3.

**Ηλεκτρονικά Ισχύος** [Βιβλίο] / συγγρ. Μανιάς Στέφανος Ν.. - Αθήνα : Εκδόσεις Συμείων, 2017. - 2η Έκδοση : σ. 840. - 978-960-9400-60-2.

**Θεωρία Πεδίου** [Βιβλίο] / συγγρ. L.D. Landau E.M.Lifshitz / επιμ. Φικιώρης Γιώργος / μεταφρ. Μαυρογορδάτος Θεμιστοκλής. - Αθήνα : Εκδόσεις Συμμετρία, 2016. - 5η Έκδοση : Τόμ. 2ος : σ. 829. - 978-960-266-395-0.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1]. Yulong, Pei, Andrea Cavagnino, Silvio Vaschetto, Chai Feng, and Alberto Tenconi. **"Flywheel Energy Storage Systems for Power Systems Application."** 2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP): IEEE, 2017.
- [2]. Cavagnino, A., M. Lazzari, F. Profumo, and A. Tenconi. **"A Comparison between the Axial Flux and the Radial Flux Structures for Pm Synchronous Motors."** *IEEE Transactions on Industry Applications* 38, no. 6 (2002): 1517-24.
- [3]. Manolas, Iakovos, Antonios Kladas, Dmitry SvechKarenko, and Robert Chin. **"Magnetization Regulation in Variable Flux Pm-Assisted Synchronous Reluctance Machines."** 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM): IEEE, 2018.
- [4]. Finken, Thomas, Marco Hombitzer, and Kay Hameyer. **"Study and Comparison of Several Permanent-Magnet Excited Rotor Types Regarding Their Applicability in Electric Vehicles"**, 2010.
- [5]. Laskaris, Konstantinos I, and Antonios G Kladas. **"Permanent-Magnet Shape Optimization Effects on Synchronous Motor Performance."** *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 58, no. 9 (2010): 3776-83.
- [6]. Κ. Λάσκαρης, **"Σχεδιασμός και Κατασκευή Κινητήρων Μόνιμων Μαγνητών για Ηλεκτρικά Οχήματα"**, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2011.
- [7]. Μ. Μπενιακάρ, **"Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση κινητήρων με θεώρηση των απωλειών των μόνιμων μαγνητών για εφαρμογές ηλεκτροκίνησης"**, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2014.
- [8]. Janaszek, Michał. **"Extended Clarke Transformation for N-Phase Systems."** *Proceedings of Electrotechnical Institute* 63, no. 0 (2016): 5-26.
- [9]. Si, Jikai, Song He, Wenping Cao, Xiaozhuo Xu, and Gaoming Feng. **"Electromagnetic Characteristics Analysis of Surface-Mounted and Interior Hybrid Pmsm Based on Equivalent Magnetic Circuit Method."** 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS): IEEE, 2014.
- [10]. Deshpande, Yateendra, Hamid A Toliyat, and Xiaoyan Wang. **"Standstill Position Estimation of Spmsm."** IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society: IEEE, 2012.
- [11]. Π. Ροβολής, **"Μοντελοποίηση Μαγνητικών Υλικών για Βελτιστοποίηση Κατασκευής και Λειτουργίας Ηλεκτρικών Μηχανών"**, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010.
- [12]. Ruoho, Sami, Emad Dlala, and Antero Arkkio. **"Comparison of Demagnetization Models for Finite-Element Analysis of Permanent-Magnet Synchronous Machines."** *IEEE Transactions on Magnetics* 43, no. 11 (2007): 3964-68
- [13]. Katter, M. **"Angular Dependence of the Demagnetization Stability of Sintered Nd-Fe-B Magnets."** *IEEE Transactions on Magnetics* 41, no. 10 (2005): 3853-55.
- [14]. Givord, D, P Tenaud, and T Viadieu. **"Angular Dependence of Coercivity in Sintered Magnets."** *Journal of magnetism and magnetic materials* 72, no. 3 (1988): 247-52.
- [15]. Ruoho, S., and A. Arkkio. **"Partial Demagnetization of Permanent Magnets in Electrical Machines Caused by an Inclined Field."** *IEEE Transactions on Magnetics* 44, no. 7 (2008): 1773-78.
- [16]. Bianchi, Nicola, Silverio Bolognani, and Michele Dai Pre. **"Design of a Fault-Tolerant Ipm Motor for Electric Power Steering."** 2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference: IEEE, 2005.



- [17]. Staton, David. **“Improving Motor Efficiency and Motor Miniaturization The Role of Thermal Simulation.”** 2019 22th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS): IEEE, 2019.
- [18]. Tsunata, Ren, Masatsugu Takemoto, Satoshi Ogasawara, and Koji Orikiawa. **“A Proposal of a Delta-Type Salient Pole Variable Flux Memory Motor Having Large Flux Barrier for Traction Applications.”** 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE): IEEE.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

### Παράρτημα 1: Θεωρητική ανάλυση Βραχυκυκλώματος μηχανής μονίμων μαγνητών

Αρχικά δίνονται οι τυπικές ονομαστικές τιμές των μηχανών:

%% Nominal Values

p=6;	%Poles (n)
UOp=25;	%Voltage (V)
wOp=(700/RPM)*p/2;	%Ang Velocity (r/sec)
fOp=wOp/(2*pi);	%Electric frequency (Hz)
IOp=120;	%Current (A)
Jm=1.0;	%Inertia (kg-m^2)
Ld0=2.4368*10^-4;	% induction d (H)
Lq0=2.29758*10^-4;	% induction q(H)
L00=1.2184*10^-4;	% induction 0 (H)
R=0.0005;	%Resistance (Ω)

Στη συνέχεια υπολογίζεται μια τυπική τιμή της ροής του μαγνήτη  $\Lambda_m$ .

%% Typical Value for  $\Lambda_m$

LambdaMagnet= (UOp-R\*IOp/2-wOp\*Ld0\*IOp/2)/wOp; % $\Lambda_m$  (Vs)

Καθορίζουμε τη λειτουργική κατάσταση που βρίσκεται η μηχανή αμέσως πριν το σφάλμα και μετά το σφάλμα.

%% Before & After Sc Conditions

ud=0;	%Voltage d (V)	(t>0)
uq=0;	%Voltage q (V)	(t>0)
f0=fOp;	%Electric frequency (Hz)	(t<0)
wr0=2*pi*f0;	%Ang Velocity (r/sec)	(t<0)
CurrentAnlge=90;	%Current Angle (deg)	(t<0)
IO=120;	%Total Current (A)	(t<0)
id0=IO*cosd(CurrentAnlge);	%Current d (A)	(t<0)
iq0=IO*sind(CurrentAnlge);	%Current q (A)	(t<0)

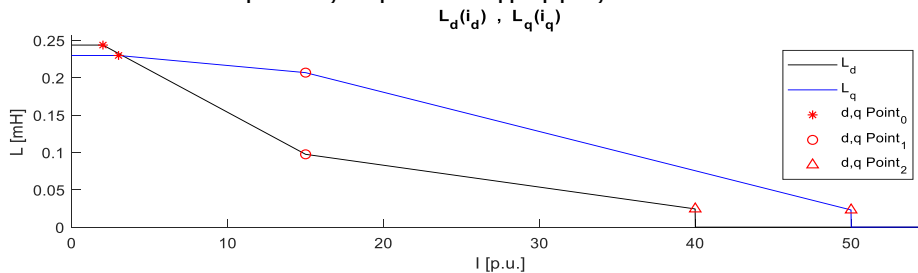
Ακόμη καθορίζουμε τις τυπικές συμπεριφορές των αυτεπαγωγών  $L_d$   $L_q$  με υπόθεση γραμμικής εξάρτησης από την τιμή του ρεύματος. Τοποθετώντας κατάλληλες τιμές στις παρακάτω σταθερές:

%%  $L_d(i_d)$   $L_q(i_d)$  functions parameters

Cid0=2*IOp;	%d Point0 Current (A)
CLd1=4/10;	%d Point1 Inductance (p.u.)
Cid1=16*IOp;	%d Point1 Current (A)
CLd2=1/10;	%d Point2 Inductance (p.u.)
Cid2=40*IOp;	%d Point2 Current (A)

Ciq0=3*IOp;	%q Point0 Current (A)
CLq1=9/10;	%q Point1 Inductance (p.u.)
Ciq1=15*IOp;	%q Point1 Current (A)
CLq2=1/10;	%q Point2 Inductance (p.u.)
Ciq2=50*IOp;	%q Point2 Current (A)

Παρακάτω δίνεται ένα ενδεικτικό διάγραμμα που αναδεικνύει τις θέσεις των σημείων που τοποθετούμε στις παραπάνω γραμμές κώδικα:



Σχ.Π1.1 Εξάρτηση των  $L_d$ ,  $L_q$  από την τιμή του ρεύματος.

Με αυτό τον τρόπο θέτουμε συναρτήσεις των  $L_d$ ,  $L_q$  και τις παραγώγους αυτών ως προς το ρεύμα  $i_d, i_q$  αντίστοιχα.

```
% Define functions Ld, Lq
Ld= @(id) Ld0*(1-sign(abs(id)-Cid0))/2 + (Ld0 -((Ld0-(CLd1)*Ld0)/(Cid1-Cid0)).*(abs(id)-Cid0)).*((1-sign(-abs(id)...
+Cid0))/2.*(1-sign(abs(id)-Cid1))/2)+((CLd1)*Ld0 -(((CLd1)*Ld0-(CLd1)*(CLd2)*Ld0)/(Cid2-Cid1)).*(abs(id)-Cid1...
)).*((1-sign(-abs(id)+Cid1))/2.*(1-sign(abs(id)-Cid2))/2);           %@Inductance d-axis (id) [H]

Lq= @(iq) Lq0*(1-sign(abs(iq)-Ciq0))/2 + (Lq0 -((Lq0-(CLq1)*Lq0)/(Ciq1-Ciq0)).*(abs(iq)-Ciq0)).*((1-sign(-abs(iq)...
+Ciq0))/2.*(1-sign(abs(iq)-Ciq1))/2)+((CLq1)*Lq0 -(((CLq1)*Lq0-(CLq1)*(CLq2)*Lq0)/(Ciq2-Ciq1)).*(abs(iq)-Ciq1...
)).*((1-sign(-abs(iq)+Ciq1))/2.*(1-sign(abs(iq)-Ciq2))/2);           %@Inductance q-axis (iq) [H]

% Define functions Ldd, Lqq
Ldd=@(id) diff (Ld (id),id);           %@d(Inductance d-axis)/d(id) (id) [H/A]
Lqq=@(iq) diff (Lq (iq),iq);           %@d(Inductance q-axis)/d(iq) (iq) [H/A]
```

Πριν γράψουμε τις εξισώσεις υπολογίζουμε τις τιμές των τάσεων προ σφάλματος και την ροπή που παράγει η μηχανή.

```
%Initial Conditions
ud0= (R*id0-wr0*(Lq0)*iq0);           %Initial Voltage d (V)
uq0= (R*iq0+wr0*(Ld0)*id0+wr0*LamdaMagnet);           %Initial Voltage q (V)

TL0= 3*p*(Ld0*id0*iq0 - Lq0*id0*iq0+LamdaMagnet*iq0)/4;           %Initial Torque (Nm)
```

Σε αυτό το σημείο γίνεται η θεώρηση πως η δύναμη της τριβής είναι πολύ μικρή ενώ η δύναμη που αντιπύεται στην κίνηση του δρομέα είναι της μορφής  $-B \cdot \omega$  (τύπου απόσβεσης). Έτσι υπολογίζεται η τιμή του  $B$  για την οποία ο κινητήρας έχει σταθερή ονομαστική ταχύτητα όταν παράγει ροπή ίση με την ονομαστική του.

```
%% Air Resistance coef
B=TL0/wr0;           %ST=0 =>TL0+wr0*B=0 (Nm), B [N*s/rad]
```

Παρακάτω γράφονται οι εξισώσεις του συστήματος ΣΔΕ που περιγράφηκαν στη θεωρία. Στην συνέχεια μετατρέπονται σε πίνακες διανυσματικού πεδίου και επιλύονται αριθμητικά μέσω της μεθόδου Runge-Kutta 45 για σταθερό δοσμένο βήμα και με δοσμένες αρχικές συνθήκες.

```
%% Differential Eq.s
Te=@(id,iq) 3*p*(Ld*id*iq - Lq*id*iq+LamdaMagnet*iq)/4;           %Torque Equation Eq (2.8)

syms id(T) iq(T) wr(T) t(T) T Y           %System Variables
ode1= diff(id(T),T)==(ud-R*id+wr*Lq*iq)/(id*Ldd+Ld);           %diff Eq (2.28)
ode2= diff(iq(T),T)==(uq-wr*LamdaMagnet-R*iq-wr*Ld*id)/(iq*Lqq+Lq);           %diff Eq (2.29)
ode3= diff(wr(T),T)==((p/2)*(3*p*(Ld*id*iq - Lq*id*iq+LamdaMagnet*iq)/4-B*wr))/Jm;           %diff Eq (2.30)
odes = [ode1; ode2; ode3;];           %ODE System

[DEsys,Subs] = odeToVectorField(odes);           %ODE System → Vector Field
DEFcn = matlabFunction(DEsys, 'Vars',{T,Y});           %Formal Variable Names

tspan = [0:0.0005:5];           %Discrete Step
y0 = [iq0 id0 wr0 ];           %Initial Values

[T,Y] = ode45(DEFcn, tspan, y0);           %Solver Runge-Kutta-Fehlberg (RKF45)
```

Για απλότητα τοποθετούμε τις τιμές των λύσεων που υπάρχουν στους πίνακες  $Y$ ,  $T$  σε άλλες μεταβλητές:

```
time=T;           %Time Values
id=Y(:,2);           %id Values (Electric current d-axis)
iq=Y(:,1);           %iq Values (Electric current q-axis)
wr=Y(:,3);           %wr Values (Electrical Angular Velocity)
Torque=double(subs(Te));           %Calculate Electrical Torque As defined on %Eq (2.8) for result values of id,iq %considering the functions Ld(id), Lq(iq)
```

Στην συνέχεια μπορούμε να υπολογίσουμε και την τιμή των τριφασικών ρευμάτων. Για να γίνει αυτό οφείλουμε να βρούμε την γωνία  $\theta$  που ο μετασχηματισμός Park χρησιμοποιεί. Για τον λόγο αυτό ολοκληρώνουμε την συνάρτηση του wr. Σημαντικό είναι ακόμη να συλλογιστούμε και την αρχική τιμή της γωνίας που έχει η γωνία  $\theta$ . Ο παρακάτω κώδικας δίνει την τιμή της  $\theta$  σε συνάρτηση του χρόνου (time).

```
Timestep=time(2)-time(1); %Time Step (dt)
theta(1)=CurrentAnlge; %theta initial value (θ0)
for i=2:1:length(wr) %Loop for integration
    w=(180/pi)*wr(i) %Function wr current value (rad->deg)
    theta(i)=theta(i-1)+w*Timestep; %integral(t+dt)=integral(t)+w*dt (Riemann)
end %End integration loop
```

Για τον μετασχηματισμό Park δίνονται οι παρακάτω συναρτήσεις :

```
function [DQO]=Park(ABC,theta)
ABC=ABC'; %Raw to columns
theta=theta*pi/180; %deg to rad
TRANS=(2/3)*...
[ cos(theta), cos(theta-2*pi/3), cos(theta-4*pi/3) ;...
 -sin(theta), -sin(theta-2*pi/3), -sin(theta-4*pi/3) ;...
 1/2, 1/2, 1/2 ]; %Park Matrix
DQO = TRANS*ABC; % DQ Results
End
```

```
function [ABC]=InversePark(DQO,theta)
DQO = DQO'; %Raw to Columns
theta=theta*pi/180; %deg to rad
TRANS=(2/3)*...
[ cos(theta), cos(theta-2*pi/3), cos(theta-4*pi/3) ;...
 -sin(theta), -sin(theta-2*pi/3), -sin(theta-4*pi/3) ;...
 1/2, 1/2, 1/2 ]; %Park Matrix
ABC = inv(TRANS)* DQO; % ABC Results
end
```

Τελικά, οι τιμές των τριφασικών ρευμάτων υπολογίζονται ως εξής:

```
i0=zeros(1, length(id)); %i0 = 0 3pSc is Symmetrical
for i=1:1:length(id) %Loop for all moments on (time)
[la(i), lb(i), lc(i)]=InversePark([id(i),iq(i),i0(i)],theta(i)); % Inverse Park Transformation
End %End time loop
```

Σημαντικό είναι ακόμα να γίνει και μια σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα που δίνουν οι εξισώσεις (2.31) έως (2.40). Για το λόγο αυτό δίνονται οι παρακάτω γραμμές κώδικα:

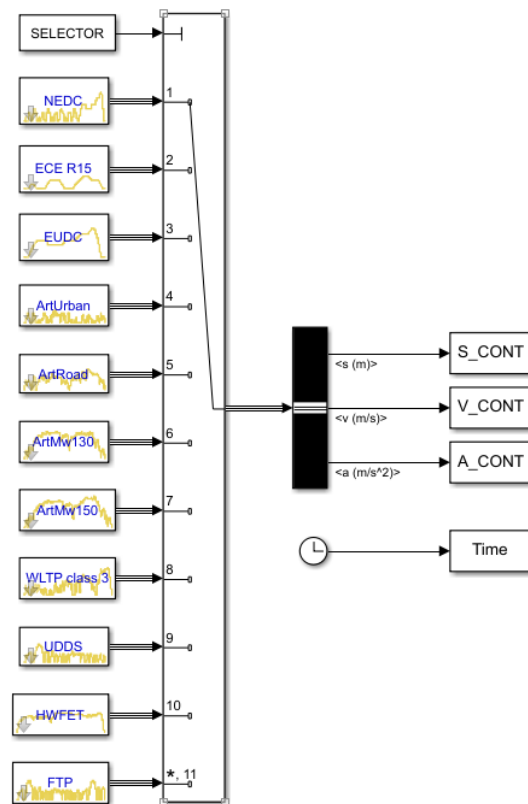
```
%Analytical Calculuations
ldmin = - (LamdaMagnet)/Ld0 -sqrt((id0+(LamdaMagnet/Ld0))^2+(Lq0/Ld0*iq0)^2); % Eq (2.33)
Tbrk = - (3/2)*p*R*LamdaMagnet^2 *wr0*(R^2+wr0^2*Lq0^2)/(R^2+wr0^2*Ld0*Lq0)^2; % Eq (2.34)
lsc = sqrt((wr0^2*Lq0*LamdaMagnet)^2+(wr0*R*LamdaMagnet)^2)/(R^2+wr0^2 *Ld0*Lq0); % Eq (2.35)
Xe = Lq0/Ld0; % Eq (2.36)
X = (1/2)*(3*(xe-1)+sqrt(9*(xe-1)^2+4*xe)); % Eq (2.37)
Fxe = sqrt(x)*((1+x)/(1+x/x)^2); % Eq (2.38)
Wstar = (wr0-(R/Lq0)*sqrt(x))/wr0; % Eq (2.39)
Tbrkmax = - (3/2)*p*(LamdaMagnet^2/Lq0)*fxe; % Eq (2.40)
```

Οι παραστάσεις του σχήματος 2.5.1 είναι συνέπεια διαδοχικών εκτελέσεων του παραπάνω κώδικα χωρίς σφάλμα δηλαδή  $(u_d, u_q) = (u_{d0}, u_{q0})$  την χρονική περίοδο  $[0 - 1]$  sec ενώ το βραχυκύκλωμα γίνεται στην διάρκεια  $[1 - 5]$  sec.

Ο τρόπος που συνθέτονται τα διαγράμματα αυτά δεν δείχνει να παρουσιάζει ενδιαφέρον σε επίπεδο ανάλυσης μηχανών και για το λόγο αυτό το κομμάτι του κώδικα αυτού δεν δίνεται αναλυτικά.

## Παράρτημα 2: Ανάλυση Οδηγικών Κύκλων

Δίνονται αρχικά στο Simulink έτοιμοι οδηγικοί κύκλοι. Για την αποκόμιση αυτών δημιουργείται το παρακάτω μοντέλο με τεχνικό όνομα 'DrivingCycle'.



Σχ. Π2.1 Simulink diagram για την αποκόμιση των οδηγικών κύκλων.

Στη συνέχεια δημιουργείται ο κώδικας που λαμβάνει αυτά τα στοιχεία στο MATLAB και δέχεται μόνο την πρώτη περίοδο του κύκλου.

```

SELECTOR=1;%1....11
class={{'NEDC'}};{'ECER15'}};{'EUDC'}};{'ArtUrban'}};{'ArtRoad'}};{'ArtMw130'}};...
{'ArtMw150'}};{'WLTP class 3'}};{'UDDS'}};{'HWFET'}};{'FTP'}};
%% simulink SELECTOR
simIn = Simulink.SimulationInput('DrivingCycle');
simIn = simIn.setVariable('SELECTOR', SELECTOR);
simIn = simIn.setModelParameter('StartTime', '0');
simIn = simIn.setModelParameter('StopTime', '10e3' );
simIn = simIn.setModelParameter('Solver', 'ode23t' );
simIn = simIn.setModelParameter('ReturnWorkspaceOutputs', 'on');
simOut = sim(simIn);
A_CONTin=simOut.A_CONT;
V_CONTin=simOut.V_CONT;
S_CONTin=simOut.S_CONT;
Timein=simOut.Time;
%% Sub struct only one period
locs=find(V_CONTin>=max(V_CONTin));
locs=locs(find(diff(locs)>1));
Period=round((1/1)*mean(diff(locs)));
A_CONT=A_CONTin(1:Period);
V_CONT=V_CONTin(1:Period);
S_CONT=S_CONTin(1:Period);
Time=Timein(1:Period);
    
```

Στην πορεία θέτουμε τις παραδοχές στις παραμέτρους των εξισώσεων.

```
g=9.81; %m/s^2
%mass(kg)
VehicleMass=250;
DriverMass=50;
TotalMass=VehicleMass+DriverMass;
%Vehicle Wheel Radius (m)
VehicleWheelRadius=0.18;
%GearRatio
GearRatio=1.2;
%Air Resistance
b=8;
%ground slope
SlopeProp=0.1; %Probability
GroundSlope=5/100;
%Friction Type Losses
FrictionLosses=15; %Newton
```

Εφαρμόζουμε τις εξισώσεις των δυνάμεων, ροπών και τη σχέση του κιβωτίου

```
%Motion Equations
%Velocity KM/h
VelocityKmh=V_CONT*60*60/1000;
%MotorAngVelocity(r/s)
WheelAngVelocity=V_CONT/VehicleWheelRadius;
%MotorRPM
MotorRPM=WheelAngVelocity*GearRatio*60/(2*pi);
%SF=M*A
SF=TotalMass*A_CONT;
%F=SF+B*V+T
F1=SF+b*V_CONT+FrictionLosses;
F1(F1<0)=0;
%F2 force due to slope
F2=g*(TotalMass)*sin(atan(GroundSlope));
F2=F2*(1-sign(WheelAngVelocity-max(WheelAngVelocity)/20))/2;
F2=g*(TotalMass)*sin(atan(GroundSlope));
% what is the probability to be on that slope ?
SlopePDF1= rand(1,length(Time));
SlopePDF=zeros(1,length(SlopePDF1));
SlopePDF(SlopePDF1>=1-1*SlopeProp)=-1;
SlopePDF(SlopePDF1<=1*SlopeProp)=1;
%F2 force due to slope with slopes PDF
F2=F2.*SlopePDF';
%T=Ftot*R ,MotorT=Gear Ratio*T
MotorTorque=(F1+F2)*VehicleWheelRadius/GearRatio;
```

Τέλος, παράγουμε την ΣΠΠ του οδηγικού κύκλου στο επίπεδο T-ω

```
%PDF Maker (3d plot)
% Generate some normally distributed data
x = MotorRPM;
y = MotorTorque;
% Estimate a continuous pdf from the discrete data
[pdfx xi]= ksdensity(x);
[pdfy yi]= ksdensity(y);
% Create 2-d grid of coordinates and function values, suitable for 3-d plotting
[xxi,yyi] = meshgrid(xi,yi);
[pdfxx,pdfyy] = meshgrid(pdfx,pdfy);
% Calculate combined pdf, under assumption of independence
pdfxy = pdfxx.*pdfyy;
```

Η εξαγωγή των παραστάσεων γίνεται με τη βοήθεια της συνάρτησης 'datamap' που δίνεται στο διαδίκτυο. Ακόμα ο σχετικός κώδικας δίνεται παρακάτω:

```

figure;
subplot(3,1,2);
plot(Time,A_CONT);
title(['Acceleration -Time @' char(class(SELECTOR))])
ylabel('Acceleration [m/s^2]')
xlabel('Time [s]')
subplot(3,1,1);
plot(Time,V_CONT);
title(['Velocity -Time @' char(class(SELECTOR))])
ylabel('Velocity [m/s]')
xlabel('Time [s]')
subplot(3,1,3);
plot(Time,S_CONT);
title(['Distance - Time @' char(class(SELECTOR))])
ylabel('Distance [m]')
xlabel('Time [s]')

figure;
mesh(xxi,yyi,100*pdfxy)
set(gca,'XLim',[0 max(xi)])
set(gca,'YLim',[0 max(yi)])
ylabel('Torque [Nm]')
xlabel('Rotor Speed [RPM]')
zlabel('Propability Density Function [%]');
title(['PDF(RPM,Torque) @' char(class(SELECTOR))])

figure;
plot(MotorRPM,MotorTorque);
title(['Torque-RPM @' char(class(SELECTOR))])
ylabel('Torque [Nm]')
xlabel('Rotor Speed [RPM]')
set(gca,'XLim',[0 max(xi)])
set(gca,'YLim',[0 max(yi)])

c=1;
for i=1:length(xi)
    for j=1:length(yi)
        xNew(c)=xi(i);
        yNew(c)=yi(j);
        pdfxyNew(c)=pdfxy(j,i);
        c=c+1;
    end
end

datamap([xNew',yNew',100*pdfxyNew'],'interp','n','plot',{ 'contour' },'xy_ratio',[23 1],...
'contourLine',10,'background',-10,'barlabel','PDF [%]','xlabel','Rotor Speed [RPM]','ylabel','Motor Torque[Nm]',...
'title',['Probability Density Function (RPM,Torque)', newline, '@', char(class(SELECTOR))]);

```