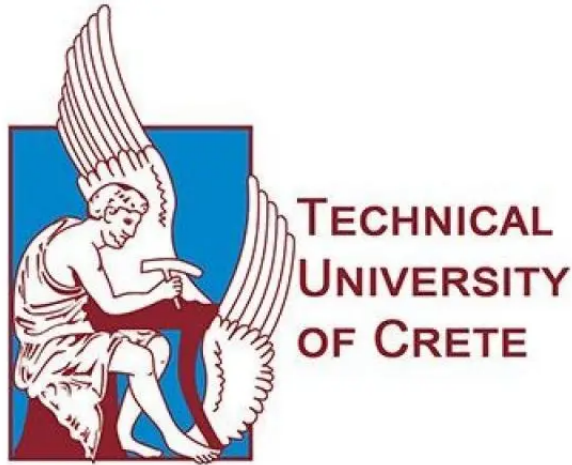


TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE



DIPLOMA THESIS

---

**STATOR INTER-TURN FAULT DIAGNOSIS IN  
DIRECT-ONLINE STARTING PERMANENT  
MAGNET MOTORS**

---

Author:

Chris Emmanouil Apanomeritakis

Thesis committee:

Associate Professor Konstantinos Gyftakis (Supervisor)

Assistant professor Georgios Peppas

Doctor Eleftheria Sergaki

School of Electrical and Computer Engineering

Chania, April, 2025

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΚΡΗΤΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

**ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ  
ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΣΕ ΚΙΝΗΤΗΡΕΣ ΜΟΝΙΜΩΝ  
ΜΑΓΝΗΤΩΝ ΜΕ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΕΚΚΙΝΗΣΗ**

---

Συγγραφέας:

Χρήστος Εμμανουήλ Απανωμεριτάκης

Εξεταστική επιτροπή:

Αναπληρωτής Καθηγητής Κωνσταντίνος Γυφτάκης (Επιβλέπων)

Επίκουρος Καθηγητής Γεώργιος Πέππας

Δόκτωρ Ελευθερία Σεργάκη

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Χανιά, Απρίλιος, 2025

## Περίληψη

---

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε ηλεκτρομαγνητική ανάλυση, με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, ενός σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών με εκκίνηση γραμμής (Line start permanent magnet synchronous motor), όταν αυτός λειτουργεί με σφάλμα εσωτερικού βραχυκυκλώματος στα πηνία του στάτη. Η ισχύς του κινητήρα ήταν 750 watt και σε όλες τις περιπτώσεις που προσομοιώθηκαν λειτουργούσε υπό ονομαστικό φορτίο.

Αρχικά, παρουσιάζεται μια ιστορική αναδρομή για την ανακάλυψη των ηλεκτρικών μηχανών και στη συνέχεια γίνεται κατηγοριοποίηση και ανάλυση χαρακτηριστικών των κινητήρων μόνιμων μαγνητών. Έπειτα, παρουσιάζονται τα σφάλματα που μπορούν να εμφανιστούν στους σύγχρονους κινητήρες μόνιμων μαγνητών και επειδή η συγκεκριμένη μελέτη βασίζεται στα εσωτερικά βραχυκυκλώματα, ακολουθεί ένα κεφάλαιο ανάλυσης των μεθόδων διάγνωσης τους.

Εν συνεχεία, παρουσιάζεται ο τρόπος σχεδίασης της γεωμετρίας του κινητήρα μέσα στο περιβάλλον του SimCenter Magnet, όπως επίσης και το μοντέλο του τροποποιημένου στάτη που δημιουργεί το εσωτερικό βραχυκύκλωμα μεταξύ τυλιγμάτων δύο πηνίων της ίδιας φάσης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της κάθε περίπτωσης σφάλματος, εισάγονται στη matlab και αναλύονται συγκριτικά με αυτά της κατάστασης υγιούς λειτουργίας, έτσι ώστε να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα.

Για την διάγνωση των σφαλμάτων έγινε ανάλυση του αρμονικού περιεχομένου του ρεύματος στάτη χρησιμοποιώντας τις μεθόδους MCSA, EPVA, Negative Sequence Current, όπως επίσης και φασματική ανάλυση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής του κινητήρα. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος stray flux monitoring, η οποία βασίζεται στην παρακολούθηση της μαγνητικής ροής εξωτερικά του κινητήρα, κάνοντας χρήση αισθητήρων και ανάλυση του φάσματος συχνοτήτων των σημάτων τους.

# Abstract

---

In this thesis, an electromagnetic analysis was carried out using the finite element method on a line-start permanent magnet synchronous motor (LSPMSM) operating under an inter-turn short circuit fault in the stator windings. The motor had a power rating of 750 watts and in all simulated cases, it operated under nominal load.

Initially, a historical overview of the discovery of electric machines is presented, followed by a classification and analysis of the characteristics of permanent magnet motors. Then, the faults that can occur in permanent magnet synchronous motors are discussed, and since this study focuses on internal short circuits, a chapter is dedicated to the analysis of their diagnostic methods.

Subsequently, the design process of the motor geometry within the SimCenter Magnet environment is presented, along with the model of the modified stator that induces an internal short circuit between the windings of two coils of the same phase. The simulation results of each fault scenario are imported into MATLAB and analyzed comparatively against those of healthy operation, in order to draw conclusions.

For fault diagnosis, harmonic analysis of the stator current was performed using the MCSA, EPVA, and Negative Sequence Current methods, as well as spectral analysis of the motor's electromagnetic torque. Finally, the stray flux monitoring method was employed, which is based on tracking the magnetic flux outside the motor using sensors and analyzing the frequency spectrum of their signals.



## Ευχαριστίες

---

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, για όλη την στήριξη που μου πρόσφεραν και τις θυσίες που έκαναν στα χρόνια των σπουδών μου αλλά και γενικά για την ευκαιρία που μου έδωσαν να σπουδάσω στην σχολή των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κοπέλα μου, τον αδερφό μου και τους φίλους μου που ήταν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια σε όποια στιγμή τους χρειάστηκα.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους όσους βοήθησαν για να ολοκληρωθεί η παρούσα διπλωματική εργασία. Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Γυφτάκη για την πολύτιμη καθοδήγηση του, τη συνεχή διαλεύκανση των αποριών μου, αλλά και συνολικά την άψογη συνεργασία μας όλη αυτήν την περίοδο, καθώς η πόρτα του γραφείου του ήταν πάντα ανοιχτή. Έπειτα θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ την Ναταλία Φατσέα για όλη την βοήθεια που μου πρόσφερε αυτούς τους μήνες, αλλά και την υπομονή που έδειξε στις συνεχείς απορίες μου. Όπως επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον Νίκο Γκιολέκα για την βοήθεια του σε όσες ερωτήσεις του έκανα.

# Contents

<b>1</b>	<b>Κεφάλαιο: Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1	Ιστορική Αναδρομή [1] - [6]	1
1.2	Χρήσιμοι Ορισμοί [107] - [111]	3
<b>2</b>	<b>Κινητήρες Μόνιμων Μαγνητών</b>	<b>6</b>
2.1	Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμων Μαγνητών [7] - [22]	7
2.2	Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμων Μαγνητών Με Εκκίνηση Γραμμής [23] - [37]	12
2.3	Κινητήρες Μόνιμων Μαγνητών Συνεχούς Ρεύματος με Ψήκτρες [38] - [40]	14
2.4	Κινητήρες Μόνιμων Μαγνητών Συνεχούς Ρεύματος χωρίς Ψήκτρες [41] - [48]	16
2.5	Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμων Μαγνητών Ακτινικής Ροής [49] - [53]	18
2.6	Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμων Μαγνητών Αξονικής Ροής [54] - [63]	19
<b>3</b>	<b>Κεφάλαιο: Σφάλματα Των Σύγχρονων Κινητήρων Μόνιμων Μαγνητών</b>	<b>20</b>
3.1	Ηλεκτρικά Σφάλματα [64] - [75],[101],[103],[105]	21
3.2	Μηχανικά Σφάλματα [76] - [83],[103]	24
3.3	Μαγνητικά Σφάλματα [84] - [86]	27
<b>4</b>	<b>Κεφάλαιο: Μέθοδοι Διάγνωσης Σφαλμάτων</b>	<b>28</b>
	[92],[69],[101],[106]	
4.1	Motor Current Signature Analysis (MCSA) [87] - [88]	30
4.2	Συμμετρικές Συνιστώσες [89] - [92], [67]	31
4.3	Park Vector Approach / Extended Park Vector Approach [93] - [96]	32
4.4	Stray Flux Monitoring [97] - [99]	33
4.5	Torque Monitoring [100],[102],[104]	34
4.6	Σύνοψη [69]	34
<b>5</b>	<b>Κεφάλαιο: Ανάλυση και Μοντελοποίηση του Κινητήρα</b>	<b>37</b>
5.1	Ονομαστικά Χαρακτηριστικά του Κινητήρα	37
5.2	Μοντελοποίηση του κινητήρα στο περιβάλλον του SimCenter MAGNET	38
<b>6</b>	<b>Κεφάλαιο: Μοντελοποίηση Σφάλματος και Ανάλυση Αποτελεσμάτων</b>	<b>50</b>
6.1	Μοντελοποίηση του Σφάλματος	50
6.2	Χαρακτηριστικά Υγιούς Κατάστασης Κινητήρα	53
6.3	Χαρακτηριστικά Σφαλμάτων	57
6.4	Ανάλυση Αποτελεσμάτων	64
6.4.1	Ανάλυση Ρεύματος Στάτη Στο Πεδίο Του Χρόνου	64
6.4.2	Motor Current Signature Analysis (MCSA)	75

6.4.3	EPVA . . . . .	81
6.4.4	Ρεύμα Στάτη Αρνητικής Ακολουθίας . . . . .	84
6.4.5	Ανάλυση Της Ηλεκτρομαγνητικής Ροπής . . . . .	90
6.4.6	Ανάλυση Της Εξωτερικής Μαγνητικής Ροής . . . . .	96
<b>7</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>104</b>
7.1	Συμβάσεις Μελέτης Κινητήρα . . . . .	104
7.2	Σύνοψη Αποτελεσμάτων . . . . .	105
<b>8</b>	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>106</b>

## List of Figures

1.1	a) Μηχανή Siemens [2],[113] b) Μηχανή Gramme [4] . . . . .	1
1.2	a) AC motor by Ferraris [6] b) Tesla's AC System [6] . . . . .	2
1.3	Επιδερμικό Φαινόμενο. [109] . . . . .	4
1.4	Αγώγιμη επιφάνεια σε σχέση με την αυξανόμενη συχνότητα. [111] . . . . .	5
1.5	Γεωμετρία . [108] . . . . .	5
2.1	Κατηγοριοποίηση Κινητήρων Μόνιμων Μαγνητών. [8] . . . . .	6
2.2	Κινητήρας Μόνιμων Μαγνητών. [21] . . . . .	8
2.3	Στάτης Κινητήρα Μόνιμων Μαγνητών με κατανομημένο τύλιγμα (αριστερά) και συγκεντρωμένο τύλιγμα (δεξιά). [22] . . . . .	8
2.4	Δρομέας σύγχρονου κινητήρα επιφανειακού μόνιμου μαγνήτη. [22] . . . . .	9
2.5	Δρομέας σύγχρονου κινητήρα εσωτερικού μόνιμου μαγνήτη. [22] . . . . .	9
2.6	Σύγκριση μεταξύ SPMSM και IPMSM . [8] . . . . .	11
2.7	Διάγραμμα ροπών-ταχύτητας σε LSPMSM . [30] . . . . .	13
2.8	Johnson Electric HC885G dc motor. [40] . . . . .	14
2.9	Brushed DC Motor. [38] . . . . .	15
2.10	Όψη της διατομής ενός Brushed DC Motor. [38] . . . . .	15
2.11	Brushless DC Motor Structure. [48] . . . . .	16
2.12	Brushless DC Motor Structure. [42] . . . . .	17
2.13	Brushless DC motor block diagram. [42] . . . . .	17
2.14	Κατασκευαστική δομή κινητήρων ακτινικής και αξονικής ροής. [62] . . . . .	18
2.15	Different Topologies Of Axial Flux Permanent Magnet Motors. [54] . . . . .	19
3.1	Faults in Line Start Permanent Magnets Synchronous Motors. [70] . . . . .	20
3.2	Ποσοστά σφαλμάτων σε εξαρτήματα ηλεκτρικών μηχανών α) χαμηλής τάσης (αριστερά), β) υψηλής τάσης (δεξιά) . [69] . . . . .	21
3.3	Stator Winding Faults. [72] . . . . .	22
3.4	Inter-turn Short Circuit Fault. [71] . . . . .	22
3.5	Squirrel-Cage Rotor with one Broken Bar.[74] . . . . .	23
3.6	Δομικά Χαρακτηριστικά Εδράνου. [77] . . . . .	24
3.7	Έδρανα α) σε υγιή κατάσταση β) με σφάλμα στον εσωτερικό δακτύλιο γ) με σφάλμα στον εξωτερικό δακτύλιο δ) με σφάλμα λίπανσης. [76] . . . . .	25
3.8	α)παράδειγμα στατικής εκκεντρότητας (πάνω), b) παράδειγμα δυναμικής εκκεντρότητας (Κάτω). [81] . . . . .	26
4.1	Μέθοδοι επεξεργασίας σήματος για την διάγνωση σφαλμάτων. [69] . . . . .	28
4.2	Αισθητήρες αξονικής και ακτινικής εξωτερικής μαγνητικής ροής. [99] . . . . .	33
5.1	a)Dropdown menu b)Αρχικό σχέδιο στάτη . . . . .	38
5.2	a)Rotate Edges . b)Rotate Edges window . . . . .	39
5.3	Σχεδιασμός θέσεων αλλαγών στάτη. . . . .	39

5.4	a)Μοντέλο αυλακώσεων-δοντιών στάτη b)Ολοκληρωμένο μοντέλο στάτη . . .	40
5.5	a)Τυλίγματα μέσα στις αυλακώσεις b)Μοντελο στάτη - τυλιγμάτων . . . . .	40
5.6	Αρχικό σχέδιο δρομέα. . . . .	41
5.7	διαφορετικές γεωμετρίες μπαρών δρομέα. . . . .	41
5.8	θέσεις τοποθέτησης μαγνητών(αριστερά) , Μαγνήτες (δεξιά). . . . .	42
5.9	Window of Make Component in A Line. . . . .	42
5.10	Χαρακτηριστική καμπύλη B/H του υλικού του στάτη και του δρομέα. . . . .	43
5.11	Χαρακτηριστική καμπύλη απωλειών σιδήρου του υλικού του στάτη και του δρομέα. . . . .	43
5.12	Πηνία στάτη (αριστερά), Κυκλωματική συνδεση πηνίων στάτη (δεξιά). . . . .	44
5.13	Μπάρες δρομέα (αριστερά), Κυκλωματική συνδεση μπαρών δρομέα (δεξιά). . .	44
5.14	Ιδιότητες πηγής τάσης V1 (αριστερά), Ιδιότητες πηγής τάσης V2 (κέντρο), Ιδιότητες πηγής τάσης V3 (δεξιά). . . . .	45
5.15	αρίθμηση αυλακώσεων στάτη. . . . .	46
5.16	συνδεσμολογία πηνίων φάσης A. . . . .	46
5.17	συνδεσμολογία πηνίων φάσης B. . . . .	47
5.18	συνδεσμολογία πηνίων φάσης C. . . . .	47
5.19	Κυκλωματική Σύνδεση Αισθητήρων. . . . .	48
5.20	Ολοκληρωμένο Μοντέλο Κινητήρα. . . . .	48
5.21	Παράθυρο εισαγωγής παραμέτρων προσομοίωσης. . . . .	49
5.22	a)επιλογή έναρξης προσομοίωσης b)παράθυρο προσομοίωσης . . . . .	49
6.1	Διαχωρισμός τυλιγμάτων πηνίου. . . . .	50
6.2	Κυκλωματική σύνδεση στάτη με βραχυκύκλωμα μίας σπείρας με μία σπείρας και αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ . . . . .	51
6.3	Κυκλωματική σύνδεση στάτη με βραχυκύκλωμα μίας σπείρας με μία σπείρας και αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ . . . . .	51
6.4	Κυκλωματική σύνδεση στάτη με βραχυκύκλωμα δύο σπειρών με δύο σπείρες και αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ . . . . .	52
6.5	Κυκλωματική σύνδεση στάτη με βραχυκύκλωμα δύο σπειρών με δύο σπείρες και αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ . . . . .	52
6.6	Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής σε υγιή λειτουργία κατα την μόνιμη κατά- σταση. . . . .	53
6.7	Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής σε υγιή λειτουργία κατα την εκκίνηση. . . . .	54
6.8	Χωρική κατανομή της πυκνότητας ρεύματος σε υγιή λειτουργία κατα την εκκίνηση. . . . .	55
6.9	Χωρική κατανομή της πυκνότητας ρεύματος σε υγιή λειτουργία κατα την μόνιμη κατάσταση. . . . .	56
6.10	a) Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής σε υγιή λειτουργία b) Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής στην περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντί- σταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ . . . . .	57

6.11	a) Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής σε υγιή λειτουργία b) Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής στην περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ . . . . .	57
6.12	a) Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής σε υγιή λειτουργία b) Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής στην περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ . . . . .	58
6.13	a) Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής σε υγιή λειτουργία b) Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής στην περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ . . . . .	58
6.14	Πυκνότητα ρεύματος στις μία προς μία βραχυκυκλωμένες σπείρες με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ . . . . .	60
6.15	Πυκνότητα ρεύματος στις μία προς μία βραχυκυκλωμένες σπείρες με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ . . . . .	61
6.16	Πυκνότητα ρεύματος στις δύο προς δύο βραχυκυκλωμένες σπείρες με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ . . . . .	62
6.17	Πυκνότητα ρεύματος στις δύο προς δύο βραχυκυκλωμένες σπείρες με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ . . . . .	63
6.18	Ρεύμα φάσης Α στην υγιή κατάσταση σε συνάρτηση με το χρόνο. . . . .	64
6.19	Διάγραμμα ρεύματος σε υγιή και εσφαλμένη κατάσταση με μία σπείρα βραχυκυκλωμένη και αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ . . . . .	65
6.20	Διάγραμμα ρεύματος σε υγιή και εσφαλμένη κατάσταση με μία σπείρα βραχυκυκλωμένη και αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ . . . . .	66
6.21	Διάγραμμα ρεύματος σε υγιή και εσφαλμένη κατάσταση με δύο σπείρες βραχυκυκλωμένες και αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ . . . . .	66
6.22	Διάγραμμα ρεύματος σε υγιή και εσφαλμένη κατάσταση με δύο σπείρες βραχυκυκλωμένες και αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ . . . . .	67
6.23	Διάγραμμα των ρευμάτων φάσης όλων των περιπτώσεων (υγιής και εσφαλμένων) εστιασμένο σε μία κορυφή. . . . .	67
6.24	Κυκλωματική αναπαράσταση εσωτερικού βραχυκυκλώματος . . . . .	69
6.25	Διάγραμμα των ρευμάτων φάσης και του ρεύματος που διέρχεται απο τις βραχυκυκλωμένες σπείρες για την περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ . . . . .	69
6.26	Διάγραμμα των ρευμάτων φάσης και του ρεύματος που διέρχεται απο την αντίσταση σφάλματος για την περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ . . . . .	70
6.27	Διάγραμμα των ρευμάτων φάσης και του ρεύματος που διέρχεται απο τις βραχυκυκλωμένες σπείρες για την περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ . . . . .	70

6.28	Διάγραμμα των ρευμάτων φάσης και του ρεύματος που διέρχεται απο την αντίσταση σφάλματος για την περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ .	71
6.29	Διάγραμμα των ρευμάτων φάσης και του ρεύματος που διέρχεται απο τις βραχυκυκλωμένες σπείρες για την περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ .	71
6.30	Διάγραμμα των ρευμάτων φάσης και του ρεύματος που διέρχεται απο την αντίσταση σφάλματος για την περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ .	72
6.31	Διάγραμμα των ρευμάτων φάσης και του ρεύματος που διέρχεται απο τις βραχυκυκλωμένες σπείρες για την περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ .	72
6.32	Διάγραμμα των ρευμάτων φάσης και του ρεύματος που διέρχεται απο την αντίσταση σφάλματος για την περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ .	73
6.33	Φάσμα συχνοτήτων των ρευμάτων, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ .	77
6.34	Φάσμα συχνοτήτων των ρευμάτων, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ .	78
6.35	Φάσμα συχνοτήτων των ρευμάτων, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ .	79
6.36	Φάσμα συχνοτήτων των ρευμάτων, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ .	80
6.37	EPVA Analysis της περίπτωσης υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ .	81
6.38	EPVA Analysis της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ .	82
6.39	EPVA Analysis της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ .	82
6.40	EPVA Analysis της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ .	83

6.41	Ρεύμα Αρνητικής Ακολουθίας στην υγιή κατάσταση σε συνάρτηση με τον χρόνο.	84
6.42	Ρεύμα Αρνητικής Ακολουθίας της περίπτωσης σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ .	85
6.43	Ρεύμα Αρνητικής Ακολουθίας της περίπτωσης σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ .	85
6.44	Ρεύμα Αρνητικής Ακολουθίας της περίπτωσης σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ .	86
6.45	Ρεύμα Αρνητικής Ακολουθίας της περίπτωσης σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ .	86
6.46	Φάσματική ανάλυση ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ .	88
6.47	Φάσματική ανάλυση ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ .	88
6.48	Φάσματική ανάλυση ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ .	89
6.49	Φάσματική ανάλυση ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ .	89
6.50	Σήμα ροπής της κατάστασης υγιούς λειτουργίας στον χρόνο.	90
6.51	Φασματική ανάλυση της ροπής της κατάστασης υγιούς λειτουργίας.	91
6.52	Φάσματική ανάλυση ροπής, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ .	92
6.53	Φάσματική ανάλυση ροπής, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ .	93
6.54	Φάσματική ανάλυση ροπής, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ .	94
6.55	Φάσματική ανάλυση ροπής, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ .	95
6.56	Θέση και αρίθμηση των αισθητήρων .	96
6.57	Σήμα από τον αισθητήρα 1 στην υγιή κατάσταση λειτουργίας ως προς το χρόνο.	96
6.58	Σήματα αισθητήρων(1-3-4) με 120 μηχανικές μοίρες διαφορά μεταξύ τους στην υγιή κατάσταση λειτουργίας.	97



6.59	Σήματα αισθητήρων(1-2-5) με 120 ηλεκτρικές μοίρες διαφορά μεταξύ τους στην υγιή κατάσταση λειτουργίας. . . . .	97
6.60	Φάσματική ανάλυση σήματος αισθητήρα 1, για τις περιπτώσεις α) υγιούς λειτουργίας και β) σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ . . . . .	98
6.61	Φάσματική ανάλυση σήματος αισθητήρα 2, για τις περιπτώσεις α) υγιούς λειτουργίας και β) σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ . . . . .	99
6.62	Φάσματική ανάλυση σήματος αισθητήρα 1, για τις περιπτώσεις α) υγιούς λειτουργίας και β) σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ . . . . .	100
6.63	Φάσματική ανάλυση σήματος αισθητήρα 2, για τις περιπτώσεις α) υγιούς λειτουργίας και β) σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ . . . . .	100
6.64	Φάσματική ανάλυση σήματος αισθητήρα 1, για τις περιπτώσεις α) υγιούς λειτουργίας και β) σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ . . . . .	101
6.65	Φάσματική ανάλυση σήματος αισθητήρα 2, για τις περιπτώσεις α) υγιούς λειτουργίας και β) σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ . . . . .	101
6.66	Φάσματική ανάλυση σήματος αισθητήρα 1, για τις περιπτώσεις α) υγιούς λειτουργίας και β) σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ . . . . .	102
6.67	Φάσματική ανάλυση σήματος αισθητήρα 2, για τις περιπτώσεις α) υγιούς λειτουργίας και β) σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ . . . . .	103

## List of Tables

1	Κατηγοριοποίηση των μεθόδων διάγνωσης εσωτερικών βραχυκυκλωμάτων. .	34
2	Ονομαστικά Στοιχεία Κινητήρα. . . . .	37
3	RMS τιμές ρευμάτων. . . . .	68
4	RMS τιμές και ποσοστά των ρευμάτων φάσης και βραχυκύκλωσης . . . . .	73
5	Prinsipal Slot Harmonics. . . . .	76
6	Υπογραφές για σφάλμα μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με $R_f = 0.1\Omega$ . . . .	77
7	Υπογραφές για σφάλμα μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με $R_f = 0.5\Omega$ . . . .	78
8	Υπογραφές για σφάλμα δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.1\Omega$ . . . . .	79
9	Υπογραφές για σφάλμα δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος $R_f = 0.5\Omega$ . . . . .	80
10	Υπογραφές Ρεύματος Στάτη Αρνητικής Ακολουθίας . . . . .	87
11	Υπογραφές Ρεύματος Στάτη Αρνητικής Ακολουθίας . . . . .	87
12	Υπογραφές φασματικής ανάλυσης της ροπής . . . . .	92
13	Υπογραφές φασματικής ανάλυσης της ροπής . . . . .	93
14	Υπογραφές φασματικής ανάλυσης της ροπής . . . . .	94
15	Υπογραφές φασματικής ανάλυσης της ροπής . . . . .	95

# 1 Κεφάλαιο: Εισαγωγή

---

## 1.1 Ιστορική Αναδρομή [1] - [6]

Το 1820 ο Δανός Hans Christian Ørsted ανακαλύπτει πως το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο, βάζοντας τις πρώτες βάσεις σύνδεσης μεταξύ ηλεκτρισμού και μαγνητισμού. Έπειτα, ο Βρετανός Michael Faraday, το 1821 ανακάλυψε την αρχή λειτουργίας του ηλεκτροκινητήρα, αποδεικνύοντας πειραματικά ότι το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να προκαλέσει μηχανική κίνηση. Δέκα χρόνια αργότερα, στις 29 Αυγούστου του 1831, ανακαλύπτει και αποδεικνύει πειραματικά τον νόμο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, ο οποίος αναφέρει πως το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

Το 1866 ο Γερμανός Werner Siemens, κάνοντας την πρωτοποριακή κίνηση να τοποθετήσει τυλίγματα μέσα σε αυλακώσεις, δημιουργεί το δυναμό (ηλεκτρική γεννήτρια συνεχούς ρεύματος). Το 1871 ο Zénobe Théophil Gramme εφευρίσκει την μηχανή Gramme, η οποία παράγει ομαλή συνεχή τάση, διορθώνοντας έτσι το μειονέκτημα της μηχανής του Siemens, η οποία παρήγαγε παλμικό συνεχές ρεύμα. Το 1873 ο Gramme και ο συνεργάτης του Hippolyte Fontaine, ανακάλυψαν τυχαία ότι η μηχανή ήταν αναστρέψιμη και μπορούσε να μετατρέψει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Δημιουργώντας έτσι τον πρώτο αποδοτικό ηλεκτρικό κινητήρα.

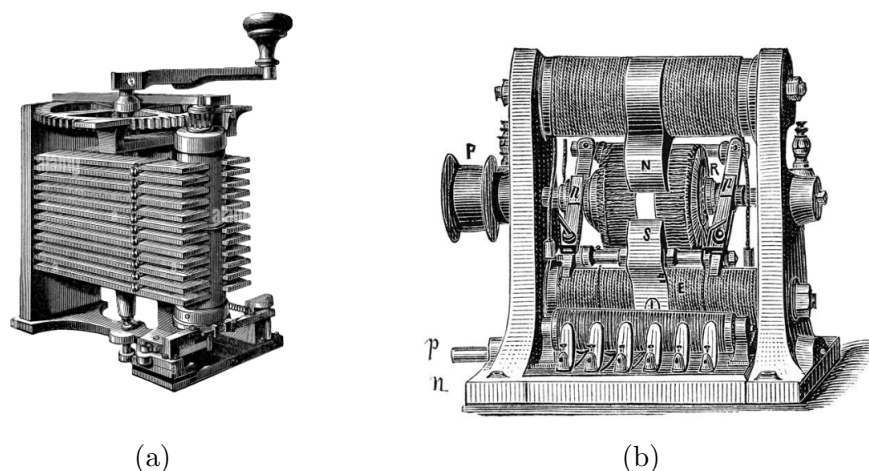
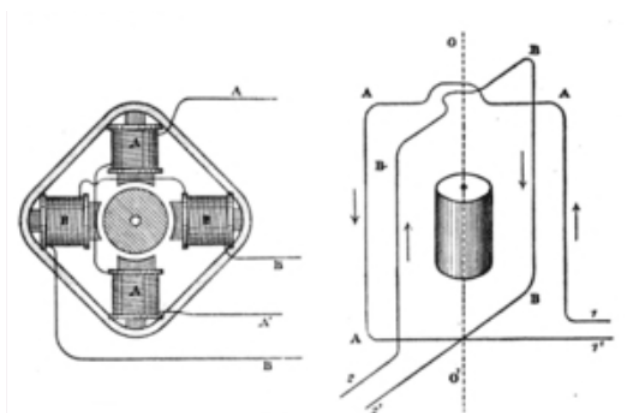
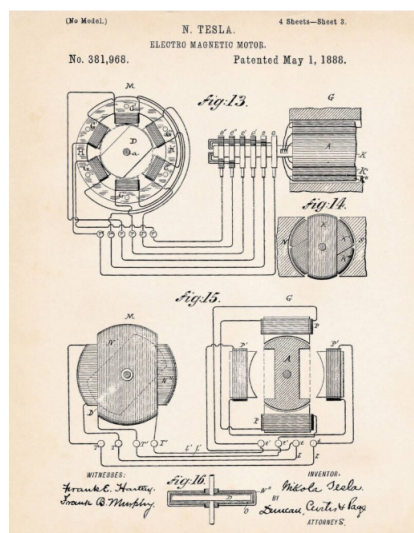


Figure 1.1: a) Μηχανή Siemens [2],[113] b) Μηχανή Gramme [4]

Το 1885 ο Galileo Ferraris φτιάχνει τον πρώτο επαγωγικό κινητήρα, ο οποίος ήταν δι-φασικός. Ωστόσο, πιστεύει εσφαλμένα πως οι κινητήρες αυτοί δεν θα υπερβούν τον βαθμό απόδοσης του 50 τις εκατό και σταματάει να ασχολείται μαζί τους. Το 1887 ο Nikola Tesla μη γνωρίζοντας για την ανακάλυψη του Galileo Ferraris τον "ξανά ανακαλύπτει", παρουσιάζοντας ένα σύστημα δύο φάσεων εναλλασσόμενου ρεύματος το οποίο αποτελείται από μία γεννήτρια, ένα σύστημα μετάδοσης και έναν πολυφασικό κινητήρα.



(a)



(b)

Figure 1.2: a) AC motor by Ferraris [6] b) Tesla's AC System [6]

Το 1955 ο F. W. Merrill πρότεινε ένα μοντέλο σύγχρονου κινητήρα μόνιμων μαγνητών με εκκίνηση γραμμής. Οι μόνιμοι μαγνήτες την εποχή εκείνη κατασκευάζονται από φερρίτες και από κράματα Alnico. Τα κράματα Alnico έχουν μικρή ικανότητα αντοχής σε εξωτερικό πεδίο χωρίς να απομαγνητίζονται αλλά και χαμηλή θερμοκρασιακή σταθερότητα. Οι μαγνήτες από φερρίτη υπέφεραν από χαμηλή παραμένουσα μαγνήτιση και ήταν αρκετά εύθραστοι. Επιπλέον, λόγω των μη γραμμικών χαρακτηριστικών απομαγνήτισης, είχαν την τάση να χάνουν την ικανότητα μόνιμης μαγνήτισης κατά τη λειτουργία. Τα παραπάνω μειονεκτήματα των μόνιμων μαγνητών έβαλαν εμπόδια στο μοντέλο του F. W. Merrill.

Μια σημαντική ανακάλυψη ήρθε στις αρχές της δεκαετίας του 1980, όταν αναπτύχθηκαν οι μαγνήτες σπάνιων γαιών υψηλής απόδοσης. Το υλικό μαγνήτη νεοδυμίου-σιδήρου-βορίου (NdFeB) κατέστησε δυνατή τη σχεδίαση κινητήρων με υψηλή ενεργειακή απόδοση και χαμηλό σχετικά κόστος. Ως εκ τούτου το ενδιαφέρον για τις μηχανές σύγχρονων κινητήρων μόνιμων μαγνητών με εκκίνηση γραμμής (LSPMSM) αυξήθηκε και πάλι .

## 1.2 Χρήσιμοι Ορισμοί [107] - [111]

- **Μαγνητική Ροή**

Ο όρος μαγνητική ροή περιγράφει το πλήθος των μαγνητικών γραμμών που διαπερνούν μια επιφάνεια. Έχει μονάδα μέτρησης το Weber (**W**) και συμβολίζεται με  **$\Phi$** .

- **Μαγνητική Επαγωγή**

Η μαγνητική επαγωγή είναι το μέγεθος που μετράει πόση μαγνητική ροή περνάει ανά μονάδα επιφάνειας, δηλαδή το πόσο ισχυρό είναι το μαγνητικό πεδίο. Η μονάδα μέτρησης της μαγνητικής επαγωγής είναι το Tesla (**T**) και συμβολίζεται με  **$B$** . Η μαγνητική επαγωγή και η μαγνητική ροή συνδέονται από την σχέση :

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

- **Μαγνητική Διαπερατότητα**

Η μαγνητική διαπερατότητα είναι το μέγεθος που περιγράφει την ικανότητα ενός υλικού να επιτρέπει την διέλευση μαγνητικού πεδίου μέσα του. Συμβολίζεται με  $\mu$  και η μονάδα μέτρησής του είναι Henrie/meter (**H/m**).

$$\mu = \mu_r \mu_o$$

Όπου  $\mu_r$  είναι η σχετική μαγνητική διαπερατότητα και  $\mu_o$  η διαπερατότητα του αέρα ( $= 4\pi * 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$ ).

- **Ένταση Μαγνητικού Πεδίου**

Η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι το διανυσματικό μέγεθος που περιγράφει το πόσο ισχυρή είναι η αιτία που δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο και συμβολίζεται με  **$H$** . Η μαγνητική επαγωγή μετράται σε Ampere/meter (**A/m**) και συνδέεται με την ένταση μαγνητικού πεδίου από την σχέση :

$$B = \mu H$$

- **Μαγνητική Αντίσταση ή Μαγνητοαντίσταση**

Η μαγνητική αντίσταση ενός υλικού περιγράφει το μέτρο της δυσκολίας δημιουργίας μαγνητικού πεδίου σε αυτό το υλικό.

$$\mathcal{R} = \frac{1}{\mu A}$$

- **Μαγνητεγερτική Δύναμη**

Μαγνητεγερτική δύναμη (MagnetoMotive Force – MMF) ονομάζεται οποιαδήποτε δύναμη παράγει μαγνητική ροή και έχει μονάδα μέτρησης το Ampere (A).

- **Δινορεύματα**

Τα δινορεύματα (Eddy Currents) ή ρεύματα Foucault είναι ηλεκτρικά ρεύματα που επάγονται εντός του αγωγού λόγω μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου. Τα δινορεύματα ρέουν εντός του αγωγού ακολουθώντας κλειστές διαδρομές σε επίπεδα κάθετα προς το μαγνητικό πεδίο.

- **Επιδερμικό Φαινόμενο**

Όταν εναλλασσόμενο ρεύμα διαρρέει ένα ηλεκτρικό αγωγό, δημιουργείται ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο γύρω και μέσα σε αυτόν. Το μαγνητικό πεδίο αυτό με την σειρά του δημιουργεί δινορεύματα, τα οποία αναιρούν την ροή στο κέντρο του αγωγού και την ενισχύουν κοντά στην επιφάνεια. Στο σχήμα 1.3 φαίνεται το εναλλασσόμενο ρεύμα  $I$ , το μαγνητικό  $H$  που δημιουργείται από το ρεύμα και τα δινορεύματα  $I_w$ .

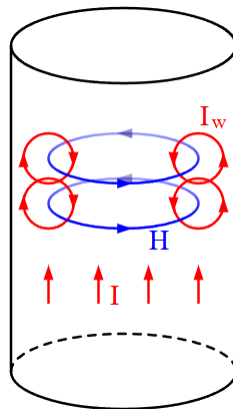


Figure 1.3: Επιδερμικό Φαινόμενο. [109]

Η παρατήρηση ότι η μέγιστη τιμή της πυκνότητας ρεύματος βρίσκεται στην επιφάνεια του αγωγού και μειώνεται προς το βάθος του, ονομάζεται επιδερμικό φαινόμενο και αιτιολογείται από τα παραπάνω. Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος τόσο μικρότερη είναι η αγωγιμή επιφάνεια του αγωγού, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ειδική αντίστασή του (βλέπε σχήμα 1.4).

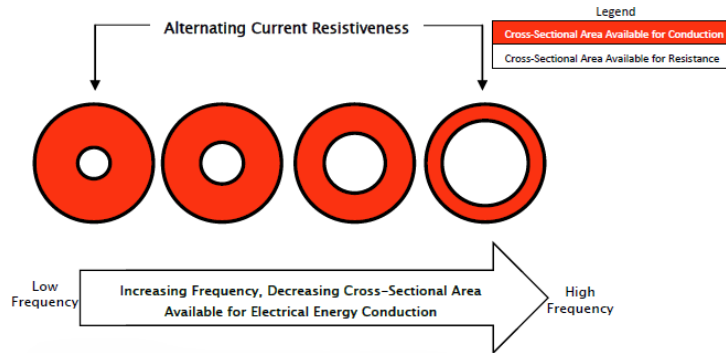


Figure 1.4: Αγωγιμη επιφάνεια σε σχέση με την αυξανόμενη συχνότητα. [111]

Η πυκνότητα ρεύματος καθώς και το επιδερμικό βάθος δίνονται από τούς παρακάτω τύπους:

$$J = J_s * e^{-\frac{d}{\delta}}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$$

Όπου  $J$  είναι η πυκνότητα ρεύματος,  $J_s$  είναι η επιφανειακή πυκνότητα ρεύματος,  $d$  είναι η απόσταση από την επιφάνεια,  $\delta$  είναι το επιδερμικό βάθος,  $\rho$  είναι η ειδική αντίσταση του αγωγού,  $\omega$  η γωνιακή συχνότητα,  $\mu$  η μαγνητική διαπερατότητα.

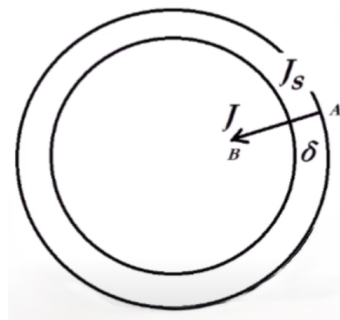


Figure 1.5: Γεωμετρία . [108]

## 2 Κινητήρες Μόνιμων Μαγνητών

Η χρήση των μόνιμων μαγνητών στις ηλεκτρικές μηχανές, αντί της ηλεκτρομαγνητικής διέγερσης έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως την απουσία τυλίγματος διέγερσης που συνεπάγεται με μείωση των απωλειών και απλοποίηση των κατασκευών, μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης, χαμηλό επίπεδο θορύβου αλλά και υψηλή ροπή ή ισχύς ανά μονάδα όγκου.

Οι κινητήρες μόνιμων μαγνητών χωρίζονται σε πληθώρα κατηγοριών ανάλογα με τη δομή και την θέση του δρομέα, την κατεύθυνση του πεδίου του διακένου, τη χρήση αισθητήρων και τις στρατηγικές ελέγχου, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1 . Στην παρούσα ενότητα θα γίνει ανάλυση μερικών από τις πιο δημοφιλείς τοπολογίες, καθώς η περιγραφή όλων δεν είναι εφικτό λόγω του μεγάλου πλήθους τους.

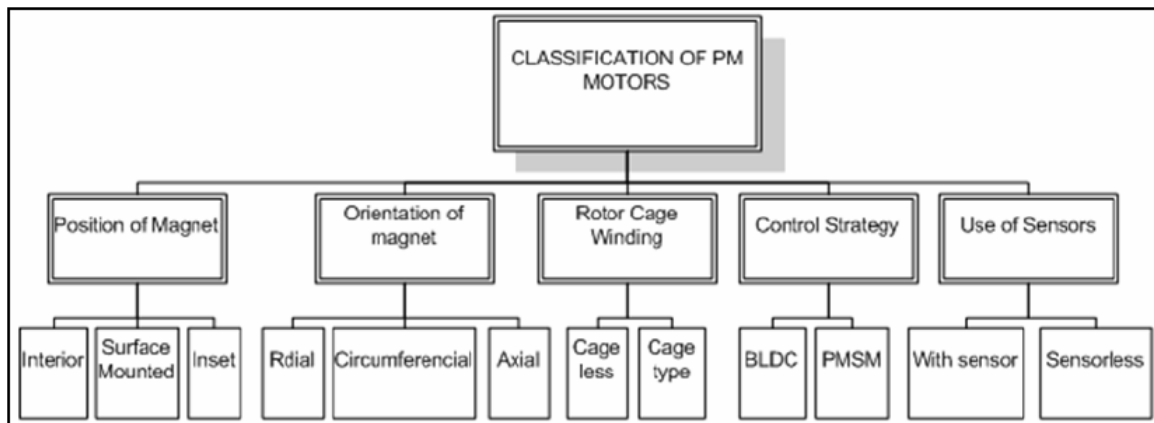


Figure 2.1: Κατηγοριοποίηση Κινητήρων Μόνιμων Μαγνητών. [8]



## 2.1 Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμων Μαγνητών [7] - [22]

Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμων μαγνητών είναι μια κατηγορία ηλεκτρικών μηχανών που χαρακτηρίζεται από την στιβαρή δομή τους, τον υψηλό συντελεστή ισχύος, τα μειωμένα επίπεδα θορύβου, άλλα και από τα υψηλά επίπεδα απόδοσης και πυκνότητας ισχύος.

Η χρήση των μόνιμων μαγνητών αυξάνει την αξιοπιστία και επιτρέπει την μείωση του μεγέθους και του βάρους των κινητήρων αυτών, γεγονός που είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε κάποιες εφαρμογές, όπως τα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα. Επιπλέον, οι κινητήρες αυτοί χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αυτοματισμού και ρομποτικής, ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στην βιομηχανία, αλλά και σε συστήματα ψύξης και κλιματισμού.

Η αρχή λειτουργίας των κινητήρων αυτών έγκειται στην χρήση μόνιμων μαγνητών στον ρότορα για την παραγωγή μαγνητικού πεδίου στο διάκενο, το οποίο αλληλεπιδρά με το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τις περιελίξεις του στάτη, όταν αυτές τροφοδοτούνται από ρεύμα, παράγοντας έτσι ροπή. Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμων μαγνητών λειτουργούν με ημιτονοειδές ρεύμα και ημιτονοειδή ηλεκτρεγερτική δύναμη και η ταχύτητα περιστροφής τους συγχρονίζεται με την ηλεκτρική συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος.

Η απουσία τυλίγματος διέγερσης είναι ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματά τους, αφού συνεπάγεται ότι απουσιάζουν οι απώλειες χαλκού, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο και τον βαθμό απόδοσης και μειώνοντας το κόστος, εφόσον πλέον δεν χρειάζεται να διαθέτει συστήματα ψύξης. Επίσης, από την απουσία θερμότητας στον ρότορα, που θα παραγόταν λόγω των απωλειών χαλκού, συμπεραίνουμε ότι η μέγιστη ισχύς των κινητήρων αυτών περιορίζεται λιγότερο από θερμικά ζητήματα, αλλά κυρίως από τις μαγνητικές ιδιότητες των μόνιμων μαγνητών.

Οι μόνιμοι μαγνήτες κατασκευάζονται από σπάνιες γαίες και από υλικά τα οποία έχουν υψηλά επίπεδα μαγνητικής ενέργειας. Η ευαισθησία τους όμως σε υψηλές θερμοκρασίες και στην αντίδραση του οπλισμού πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, όταν γίνεται σχεδιασμός, διότι υπάρχει πιθανότητα να απομαγνητιστούν.

Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα των κινητήρων μόνιμων μαγνητών, το οποίο αρχικά κατέστησε περιορισμένη την χρήση τους, ήταν το υψηλό κόστος των μόνιμων μαγνητών. Γεγονός που ξεπεράστηκε το 1984 με την ανακάλυψη του κράματος Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου(NdFeB) που αποτελείται από φθηνούς, αλλά πολύ ισχυρούς μαγνήτες, οι οποίοι έχουν μεγάλη μαγνητική απόδοση, αλλά και ένταση κορεσμού, όπως επίσης και μεγάλη αντοχή σε δυνάμεις απομαγνήτισης.

Ανάλογα με την θέση των μαγνητών στο ρότορα μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο ακόμα κατηγορίες, τους σύγχρονους κινητήρες επιφανειακών μόνιμων μαγνητών (βλέπε σχήμα 2.4) και τους συγχρόνους κινητήρες εσωτερικών μόνιμων μαγνητών (βλέπε σχήμα 2.5).

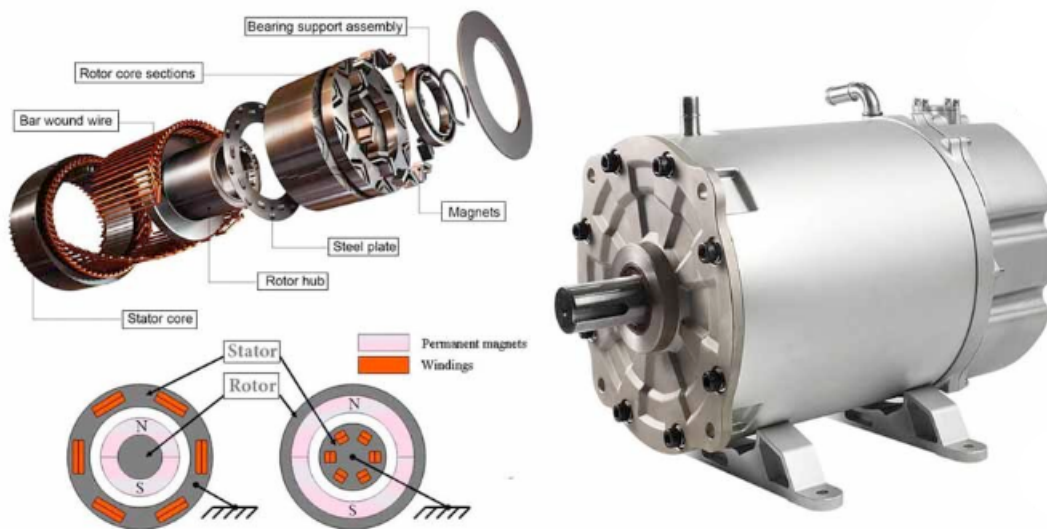


Figure 2.2: Κινητήρας Μόνιμων Μαγνητών. [21]



Figure 2.3: Στάτης Κινητήρα Μόνιμων Μαγνητών με κατανεμημένο τύλιγμα (αριστερά) και συγκεντρωμένο τύλιγμα (δεξιά). [22]

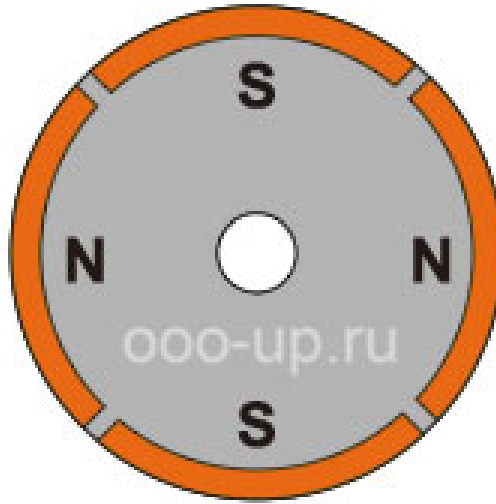


Figure 2.4: Δρομέας σύγχρονου κινητήρα επιφανειακού μόνιμου μαγνήτη. [22]

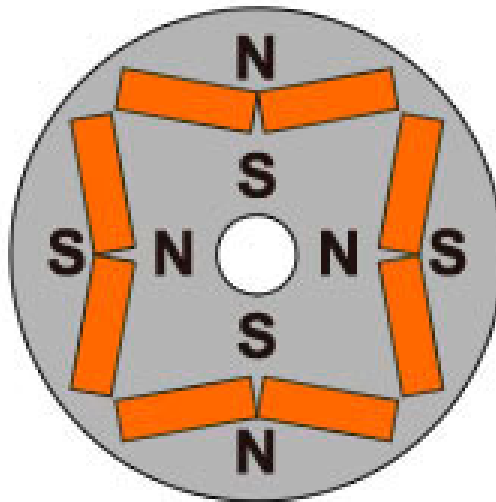


Figure 2.5: Δρομέας σύγχρονου κινητήρα εσωτερικού μόνιμου μαγνήτη. [22]

- **Σύγχρονοι Κινητήρες Επιφανειακού Μόνιμου Μαγνήτη**

Στους Σύγχρονους κινητήρες με επιφανειακούς μόνιμους μαγνήτες (Surface Mounted Permanent Magnet Motors - SPMSM) οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι στην επιφάνεια του ρότορα, γεγονός που τον κάνει πιο εύκολο στην κατασκευή του. Συγκεκριμένα, ο δρομέας απαρτίζεται από έναν πυρήνα σιδήρου, ο οποίος μπορεί να είναι είτε συμπαγής, είτε να αποτελείται από διάτρητα ελάσματα.

Στην συνέχεια, λεπτοί μόνιμοι μαγνήτες τοποθετούνται στην επιφάνεια του πυρήνα με την χρήση συγκολλητικών ουσιών ή κατασκευάζονται και τοποθετούνται σαν δακτύλιος γύρω από τον ρότορα. Η χρήση μόνιμων μαγνητών στην επιφάνεια του ρότορα κάνουν πιο εύκολη την τοποθέτηση τους σε κλίση (skewing) για να ελαχιστοποιηθεί η ροπή ευθυγράμμισης (cogging torque). Η ροπή αυτή αναπτύσσεται από την ελκτική δύναμη μεταξύ των δοντιών του στάτη και των μαγνητών του δρομέα, καθώς τείνουν να ευθυγραμμιστούν.

Η αντίδραση του τυμπάνου είναι αρκετά μικρή, διότι η μαγνητική διαπερατότητα των μόνιμων μαγνητών είναι σχεδόν ίδια με του αέρα. Συνεπώς, το μαγνητικό υλικό γίνεται προέκταση του διάκενου. Αυτή η απευθείας επίδραση του μαγνητικού πεδίου των μόνιμων μαγνητών στο διάκενο ακολουθείται από μειωμένες απώλειες ρότορα.

Η συγκέντρωση του πεδίου στο διάκενο είναι ο λόγος για τα υψηλά επίπεδα απόδοσης, όπως και η σταθερή κατανομή της μαγνητεργετικής δύναμης στην επιφάνεια του ρότορα είναι ο λόγος για την υψηλά παραγόμενη ροπή. Στους κινητήρες αυτής της τοπολογίας η αυτεπαγωγή στον άξονα d και στον άξονα q είναι σχεδόν ίσες.

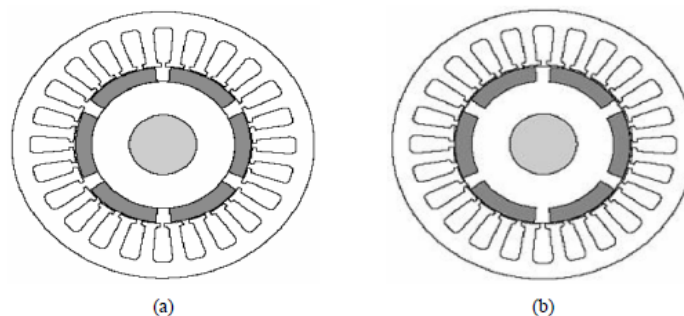
Ωστόσο σε αυτούς τους κινητήρες χρησιμοποιείται μεγάλη ποσότητα μαγνητικού υλικού, το οποίο είναι μειονέκτημα, επειδή αυξάνει το κόστος. Επιπλέον, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές πολύ μεγάλων ταχυτήτων, καθώς πρέπει να παρθούν μέτρα προστασίας των μαγνητών λόγω φυγόκεντρων δυνάμεων, τα οποία προσθέτουν κόστος. Ένα ακόμα αρνητικό χαρακτηριστικό είναι ότι οι μαγνήτες σε αυτήν την τοπολογία κινδυνεύουν περισσότερο από το φαινόμενο της απομαγνήτισης, σε σχέση με τους συγχρόνους κινητήρες εσωτερικού μαγνήτη, λόγω της άμεσης έκθεσής τους στο πεδίο απομαγνήτισης του στάτη.

- Σύγχρονοι Κινητήρες Εσωτερικού Μόνιμου Μαγνήτη

Στην τοπολογία αυτή οι μόνιμοι μαγνήτες είναι θαμμένοι εσωτερικά στον δρομέα έχοντας έτσι μειωμένες πιθανότητες να επηρεαστούν από το φαινόμενο της απομαγνήτισης. Επιπρόσθετα, επειδή οι μαγνήτες είναι θαμμένοι μέσα στα ελάσματα του δρομέα, αποφεύγεται ο κίνδυνος να αποκολληθούν λόγω των φυγόκεντρων δυνάμεων. Οι μαγνήτες που χρησιμοποιούνται έχουν δομή συνήθως ορθογώνια ή τετράγωνη, η οποία είναι πιο εύκολο να φτιαχτεί, σε σχέση με τους μαγνήτες τόξου, που απαιτούνται σε κινητήρες επιφανειακών μαγνητών (SPMSM).

Οι σύγχρονοι κινητήρες με εσωτερικούς μόνιμους μαγνήτες (Interior Permanent Magnet Motors - IPMSM) δημιουργούν ανομοιόμορφο διάκενο, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα ομαλότερη ροπή, αλλά και πιο ημιτονοειδή ρεύματα. Μεγαλύτερος όγκος από τον ρότορα αξιοποιείται για την τοποθέτηση των μόνιμων μαγνητών έχοντας ως αποτέλεσμα να παράγεται με αυτόν τον τρόπο υψηλότερη πυκνότητα ισχύος, όπως επίσης και υψηλότερος λόγος ροπής προς αδράνεια. Η αυτεπαγωγή στον άξονα d και στον άξονα q δεν είναι ίσες.

Επιπλέον, στην μαγνητική ροπή που παράγεται από τους μόνιμους μαγνήτες προστίθεται και η ροπή αντίδρασης, η οποία δυναμώνει το μαγνητικό πεδίο του δρομέα. Συμπληρωματικά, σε αυτού του τύπου τους κινητήρες, χρησιμοποιείται λιγότερο υλικό μόνιμων μαγνητών, με αποτέλεσμα να έχουμε μείωση του κόστους. Αντίθετα όμως οι κινητήρες αυτοί παρουσιάζουν μεγάλες απώλειες δινορευμάτων, κάνοντας αναγκαία την ελασματοποίηση του δρομέα, γεγονός που αυξάνει το κόστος.



<i>Surface permanent magnet motor</i>	<i>Interior permanent magnet motor</i>
Salient	Non-salient
Direct and quadrature axis inductance are nearly equal	Variation in direct and quadrature axis inductance
Large air-gap	Small air-gap
Small saliency ratio	Large saliency ratio

Figure 2.6: Σύγκριση μεταξύ SPMSM και IPMSM . [8]

## 2.2 Σύγχρονοι Κινητήρες Μόνιμων Μαγνητών Με Εκκίνηση Γραμμής [23] - [37]

Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμων μαγνητών με εκκίνηση γραμμής (Line Start Permanent Magnet Synchronous Motors - LSPMSM) κατασκευάζονται από έναν μονοφασικό ή πολυφασικό στάτη και έναν υβριδικό δρομέα, ο οποίος αποτελείται από ζεύγη μαγνητικών πόλων και έναν βραχυκυκλωμένο κλωβό, επιτρέποντας έτσι ασύγχρονη εκκίνηση. Ο βραχυκυκλωμένος κλωβός εκτός από την ικανότητα εκκίνησης γραμμής, παρέχει τη δυνατότητα απόσβεσης των δυναμικών ταλαντώσεων που προκαλούν οι αλλαγές φορτίου, όταν συμβαίνουν σε μικρό χρονικό διάστημα.

Οι κινητήρες αυτοί χαρακτηρίζονται από υψηλή πυκνότητα ισχύος λόγω των μόνιμων μαγνητών, μεγάλη ενεργειακή απόδοση και υψηλό συντελεστή ισχύος. Κατά την εκκίνηση, τα τυλίγματα που είναι τοποθετημένα συμμετρικά στις αυλακώσεις του στάτη και έχουν 120 μοίρες διαφορά φάσης στο χώρο μεταξύ τους, τροφοδοτούνται από εναλλασσόμενη τριφασική τάση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι αγωγοί να διαρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα με 120 μοίρες διαφορά φάσης στο χρόνο, παράγοντας με αυτόν τον τρόπο περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Τάση εξ επαγωγής θα εμφανιστεί στον δρομέα, σύμφωνα με τον νόμο του Faraday, λόγω της μεταβολής της μαγνητικής ροής. Η επαγόμενη τάση θα δημιουργήσει ρεύματα που θα διαρρέουν τον κλωβό. Δυνάμεις Lorents θα εμφανιστούν στις μπάρες του κλωβού, οι οποίες είναι συμμετρικά τοποθετημένες φτιάχνοντας αντιχριστά ζεύγη, προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο ροπή και περιστροφή του δρομέα.

Εν συνεχεία, καθώς ο δρομέας αυξάνει την ταχύτητα του και πλησιάζει την σύγχρονη ταχύτητα γίνεται μαγνητική σύζευξη μεταξύ των μόνιμων μαγνητών και του στάτη "τραβώντας" τον κινητήρα στη σύγχρονη λειτουργία. Κατά τη σύγχρονη λειτουργία, η σχετική ταχύτητα μεταξύ δρομέα και περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου είναι ίση. Επομένως δεν ρέουν ρεύματα στις μπάρες του κλωβού, με αποτέλεσμα οι απώλειες δρομέα να είναι αμελητέες.

Στην πραγματικότητα, η παράλειψη των ηλεκτρικών απωλειών του δρομέα, οι οποίες αποτελούν περίπου το 20 τις εκατό των συνολικών απωλειών του κινητήρα στους επαγωγικούς κινητήρες υψηλής απόδοσης (IE3), επιτρέπει στο βαθμό απόδοσης των κινητήρων LSPMSM να υπερβεί ακόμη και το επίπεδο IE4, το οποίο έχει 15 τις εκατό χαμηλότερες απώλειες σε σύγκριση με το επίπεδο IE3. Ως εκ τούτου, η θερμοκρασία του δρομέα, η οποία εξαρτάται από τις απώλειες και από την ταχύτητα του κινητήρα, είναι περίπου 30 τις εκατό μικρότερη από εκείνη των επαγωγικών κινητήρων με την ίδια ισχύ εξόδου. Αυτό το πλεονέκτημα μπορεί να προστατεύσει τους μόνιμους μαγνήτες από τη θερμοκρασιακή απομαγνήτιση.

Όταν ο κινητήρας βρίσκεται στην ασύγχρονη λειτουργία (εκκίνηση) υπάρχουν δύο συνιστώσες ροπής, η ροπή του κλωβού (ασύγχρονη ροπή) και η ροπή πέδησης του μαγνήτη (Braking Torque). Στη σύγχρονη λειτουργία του κινητήρα υπάρχουν πάλι δύο συνιστώσες της ροπής που προκαλούν την κίνηση, η σύγχρονη ροπή και η ροπή μαγνητικής αντίστασης που παράγεται λόγω της τάσης του μαγνητικού πεδίου να ακολουθεί τη διαδρομή με την χαμηλότερη μαγνητική αντίσταση.

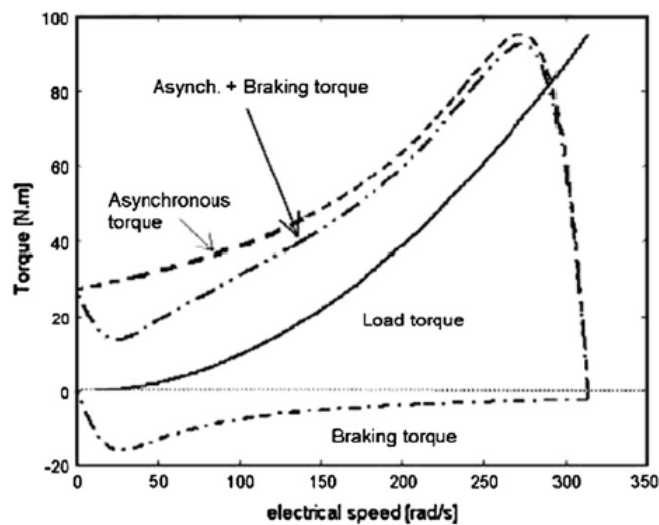


Figure 2.7: Διάγραμμα ροπών-ταχύτητας σε LSPMSM . [30]

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για την αντιμετώπιση της ροπής πέδησης που δημιουργείται από τους μόνιμους μαγνήτες κατά την εκκίνηση, είναι ο σχεδιασμός αυλακώσεων με μεγάλο βάθος. Η διάμετρος του άξονα πρέπει να είναι μικρότερη από εκείνη των κινητήρων επαγωγής, έτσι ώστε να υπάρχει αρκετός χώρος για να τοποθετηθούν οι μόνιμοι μαγνήτες στο εσωτερικό του σώματος του δρομέα.

Εκτός από την ροπή πέδησης που παράγεται λόγω των μόνιμων μαγνητών, η διαδικασία της εκκίνησης των κινητήρων αυτών εξαρτάται και από την τάση εισόδου, την αδράνεια του φορτίου και την αντίσταση του κλωβού. Συγκεκριμένα, η μειωμένη τιμή της τάσης εισόδου οδηγεί σε πιο αργή εκκίνηση, αλλά και σε πιθανότητα αποτυχίας συγχρονισμού. Η αύξηση της αδράνειας του φορτίου κατά την ασύγχρονη λειτουργία συνεπάγεται με υψηλούς παλμούς της ροπής και πιθανότητα να αποτύχει να φτάσει στη σύγχρονη λειτουργία.



## 2.3 Κινητήρες Μόνιμων Μαγνητών Συνεχούς Ρεύματος με Ψήκτρες [38] - [40]

Οι κινητήρες μόνιμων μαγνητών συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες (Brushed DC Permanent Magnet Motors - PMDC) είναι από τις παλαιότερες τεχνολογίες ηλεκτρικών μηχανών και χρησιμοποιούνται ευρέως, λόγω του χαμηλού κόστους τους και της υψηλής ροπής εκκίνησης που παράγουν ( υψηλή ροπή σε χαμηλές ταχύτητες). Επιπλέον χαρακτηρίζονται απο απλή δομή, γεγονός που τους καθιστά εύκολους στην κατασκευή και την συντήρηση. Επιπροσθέτως, μέσω της τάσης τροφοδοσίας, έχουν την δυνατότητα να πραγματοποιείται έλεγχος της ταχύτητάς τους.

Ο στάτης αποτελείται από μόνιμους μαγνήτες και ο ρότορας από διάφορα σύνολα περιελίξεων. Το συνεχές ρεύμα ρέει μέσα από τις ψήκτρες στον μεταγωγέα (συλλέκτη), ο οποίος είναι τοποθετημένος στον ρότορα, προκαλώντας έλξη και απώθηση των τυλίγμάτων του δρομέα από τους μόνιμους μαγνήτες του στάτη με αποτέλεσμα, να περιστρέφεται ο δρομέας. Εφόσον ο δρομέας περιστρέφεται, οι ψήκτρες αλλάζουν τις ηλεκτρικές συνδέσεις των τυλίγμάτων συνεχώς, αντιστρέφοντας το ρεύμα στα τυλίγματα τη σωστή στιγμή, ώστε να διατηρείται η ροπή σταθερή.

Λόγω της συνεχούς επαφής των ψήκτρων με τον μεταγωγέα (συλλέκτη), συχνά προκαλείται θόρυβος, αύξηση της θερμοκρασίας τοπικά, ακόμα και παραγωγή σπινθήρων, ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες. Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε πως οι ψήκτρες υπόκεινται σε συνεχή φθορά, γεγονός που αυξάνει τις απώλειες στον κινητήρα, αλλά και μειώνει τη διάρκεια ζωής τους, δημιουργώντας έτσι την ανάγκη για αντικατάστασή τους μετά από κάποιο χρονικό διάστημα. Αυτές οι απώλειες ευθύνονται για τα χαμηλότερα επίπεδα απόδοσης σε σχέση με αντίστοιχους κινητήρες ίδιου επίπεδου ισχύος.

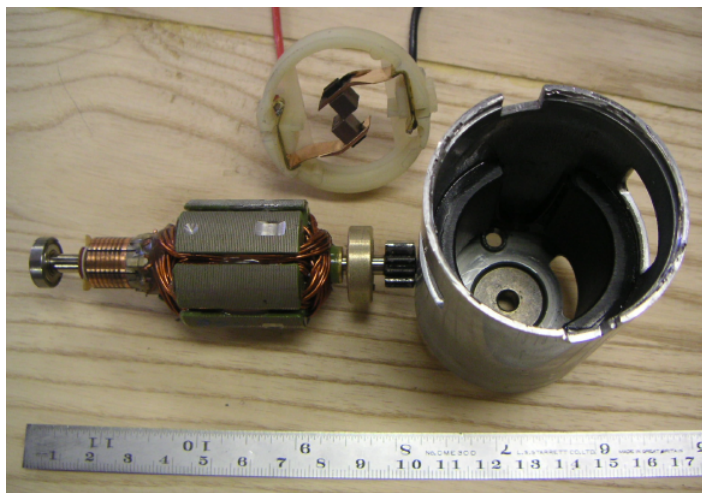


Figure 2.8: Johnson Electric HC885G dc motor. [40]



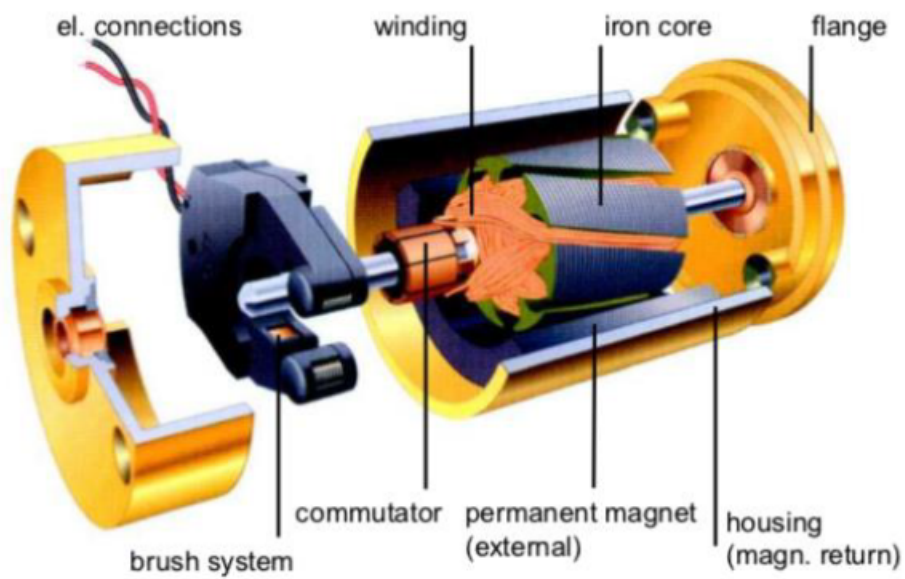


Figure 2.9: Brushed DC Motor. [38]

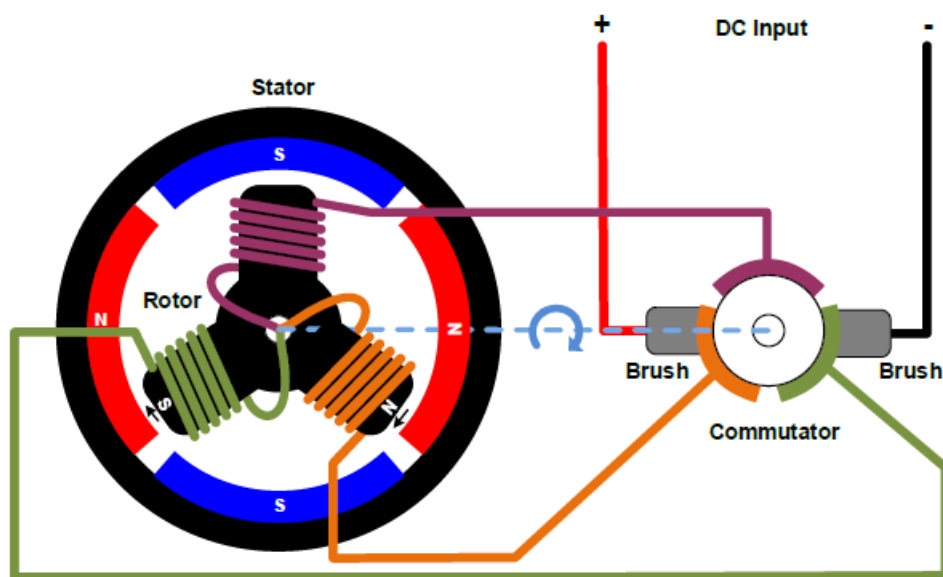


Figure 2.10: Όψη της διατομής ενός Brushed DC Motor. [38]

## 2.4 Κινητήρες Μονίμων Μαγνητών Συνεχούς Ρεύματος χωρίς Ψήκτρες [41] - [48]

Οι κινητήρες μόνιμων μαγνητών συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες (Brushless Permanent Magnet DC Motors - BLDC) είναι μια κατηγορία σύγχρονων ηλεκτρικών κινητήρων που συνδυάζουν την υψηλή πυκνότητα ισχύος και την απόδοση λόγω της χρήσης των μόνιμων μαγνητών από σπάνιες γαίες και την ευελιξία - αξιοπιστία των ηλεκτρονικών συστημάτων ελέγχου. Οι κινητήρες αυτοί έχουν μόνιμους μαγνήτες ενσωματωμένους στον δρομέα, που αλληλεπιδρούν με το μαγνητικό πεδίο το οποίο δημιουργείται στις περιελίξεις, που έχουν τοποθετηθεί στον στάτη, παράγοντας έτσι περιστροφική κίνηση.

Η απουσία των ψηκτρών μειώνει τις απώλειες, αφού δεν υπάρχει η συνεχής τριβή και φθορά. Συνεπώς, μειώνει και τις απαιτήσεις για συνεχή συντήρηση, ενώ ταυτόχρονα τα επίπεδα θορύβου ελαχιστοποιούνται. Η ηλεκτρική μεταγωγή επιτυγχάνεται με την χρήση αισθητήρων (Hall effect sensors), που ανιχνεύουν την θέση των μαγνητικών πόλων των μόνιμων μαγνητών. Τα σήματα εξόδου των αισθητήρων αυτών δίνουν πληροφορίες για την θέση του ρότορα σε έναν ελεγκτή, ο οποίος κατευθύνει την ροή του ρεύματος σε διαφορετικά τυλίγματα.

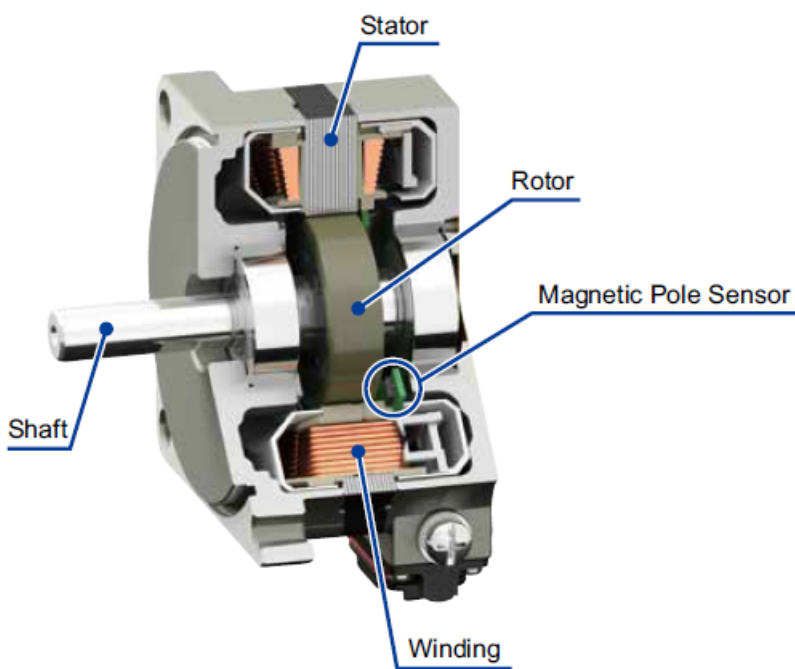


Figure 2.11: Brushless DC Motor Structure. [48]

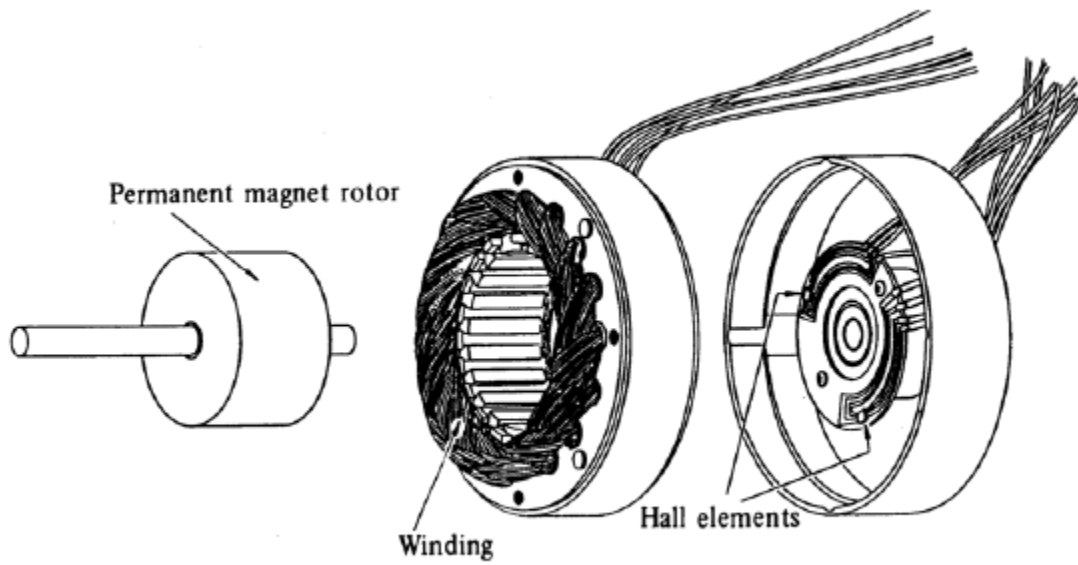


Figure 2.12: Brushless DC Motor Structure. [42]

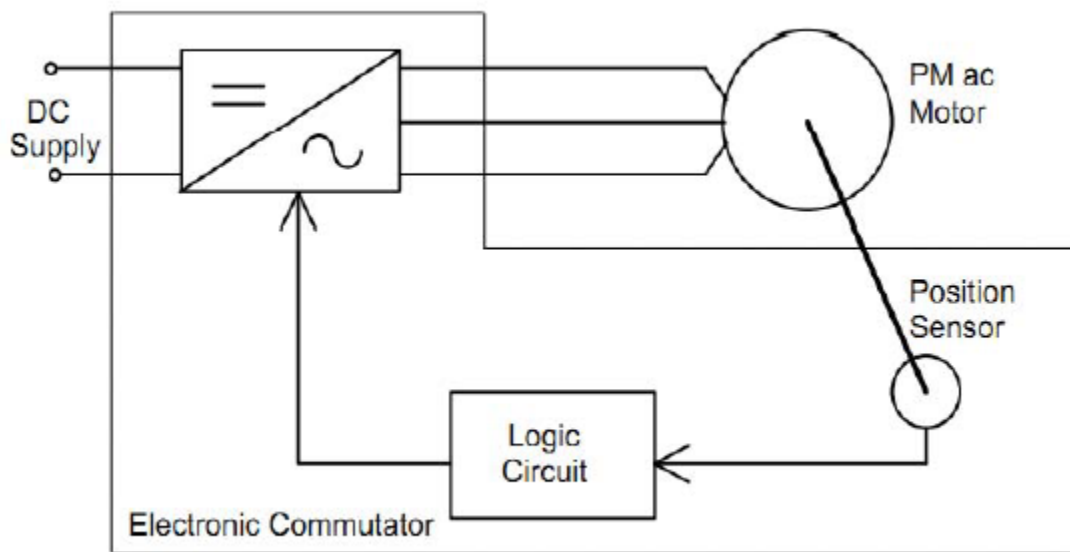


Figure 2.13: Brushless DC motor block diagram. [42]

## 2.5 Σύγχρονοι Κινητήρες Μονίμων Μαγνητών Ακτινικής Ροής [49] - [53]

Οι κινητήρες μονίμων μαγνητών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν επίσης ως προς την φορά του μαγνητικού πεδίου τους σε κινητήρες ακτινικής μαγνητικής ροής και σε κινητήρες αξονικής μαγνητικής ροής.

Μια από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες κατηγορίες σύγχρονων κινητήρων είναι οι κινητήρες ακτινικής μαγνητικής ροής, όπου η μαγνητική ροή είναι κάθετη προς την κατεύθυνση περιστροφής του δρομέα, ο οποίος μπορεί να είναι εσωτερικός ή εξωτερικός, ενώ το ρεύμα διαρρέεται ακτινικά.

Οι κινητήρες αυτοί έχουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως υψηλή τάση εξόδου και υψηλή ισχύ εξόδου, υψηλή απόδοση καθώς και ευκολότερη κατασκευή. Η εξωτερική τους ακτίνα είναι μικρότερη, σε σχέση με τους κινητήρες αξονικής ροής αντίστοιχης ισχύος. Ωστόσο συχνά είναι πιο ογκώδεις λόγω του ότι το ενεργό μήκος των αγωγών βρίσκεται σε ακτινική κατεύθυνση.

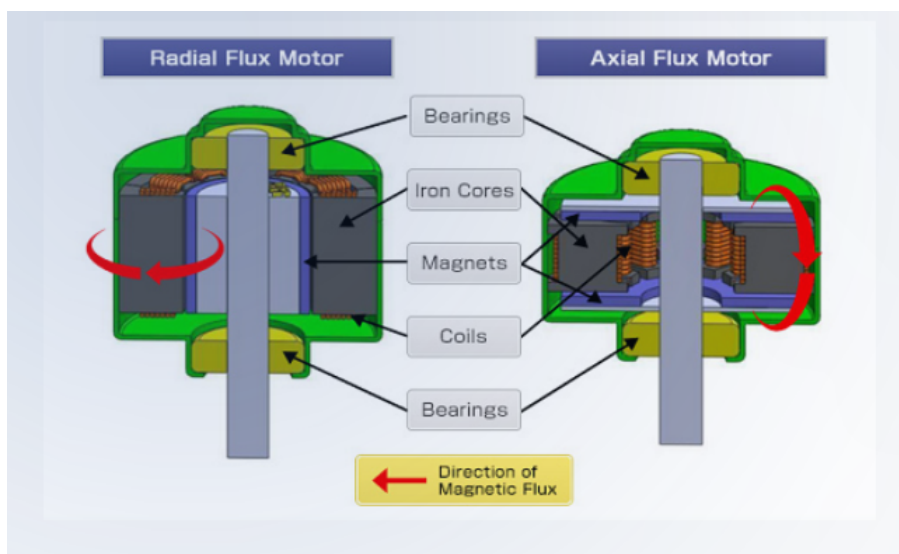


Figure 2.14: Κατασκευαστική δομή κινητήρων ακτινικής και αξονικής ροής. [62]

## 2.6 Σύγχρονοι Κινητήρες Μονίμων Μαγνητών Αξονικής Ροής [54] - [63]

Οι κινητήρες αξονικής μαγνητικής ροής, (Axial Flux Permanent Magnet Motors - AFPM) σε αντίθεση με τους κινητήρες ακτινικής μαγνητικής ροής χαρακτηρίζονται από αισθητά μικρότερο αξονικό μήκος και μεγαλύτερη εξωτερική διάμετρο. Με αυτό τον τρόπο έχουν την ικανότητα παραγωγής υψηλής ροπής και μεγαλύτερου λόγου ισχύος προς βάρος, χρησιμοποιώντας λιγότερο υλικό πυρήνα. Επιπροσθέτως, χρησιμοποιείται λιγότερο μήκος τυλιγμάτων με αποτέλεσμα οι κινητήρες αυτοί να έχουν και λιγότερες απώλειες. Αυτό το γεγονός δικαιολογεί τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης που έχουν σε σχέση με τους κινητήρες ακτινικής ροής.

Στους κινητήρες αυτούς, η κατεύθυνση της μαγνητικής ροής είναι παράλληλη με τον άξονα περιστροφής του ρότορα και το ρεύμα διαρρέεται αξονικά. Λόγω της ελαφριάς κατασκευής τους βρίσκουν εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροδιαστημική αλλά και στην ναυτιλία (προτιμάται σε εφαρμογές που η εξοικονόμηση χώρου είναι σημαντική).

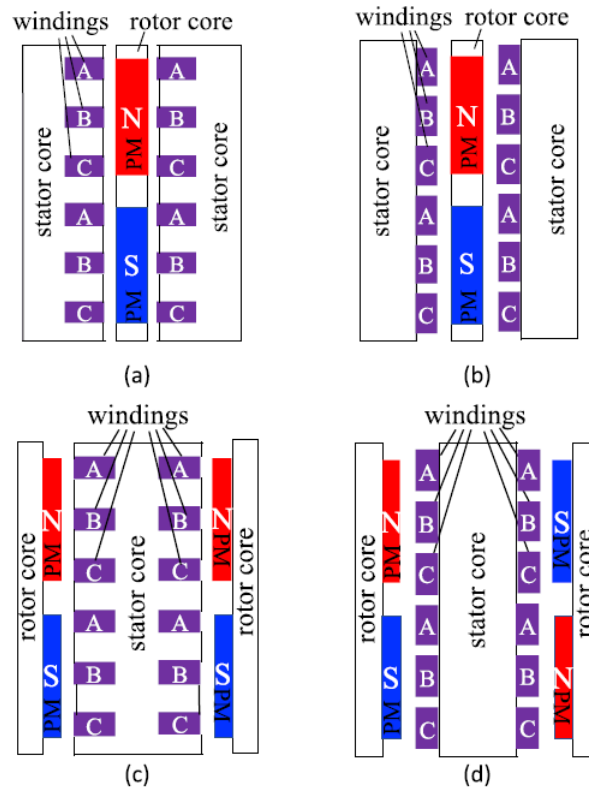


Figure 2.15: Different Topologies Of Axial Flux Permanent Magnet Motors. [54]

### 3 Κεφάλαιο: Σφάλματα Των Σύγχρονων Κινητήρων Μόνιμων Μαγνητών

Απρόοπτα σφάλματα κάνουν την εμφάνισή τους στους ηλεκτροκινητήρες λόγω μηχανικών, ηλεκτρικών και θερμικών καταπονήσεων, επηρεάζοντας την λειτουργία τους, μειώνοντας την απόδοση και προκαλώντας τους σοβαρές βλάβες που μπορούν να εξελιχθούν μέχρι και σε καταστροφικά τελικά αποτελέσματα. Οικονομικοί λόγοι αλλά και λόγοι ασφαλείας αυξάνουν σημαντικά την ανάγκη ανάπτυξης τεχνικών ανίχνευσης των σφαλμάτων.

Τα σφάλματα στους συγχρόνους κινητήρες μόνιμων μαγνητών μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες. Ειδικότερα, διακρίνονται στα ηλεκτρικά, μηχανικά και μαγνητικά σφάλματα (βλέπε σχήμα 3.1). Τα μηχανικά σφάλματα είναι πολύ πιθανά στους ηλεκτρικούς κινητήρες, τα οποία αντιστοιχούν στο 60% των σφαλμάτων, ενώ το 80% των μηχανικών σφαλμάτων οφείλεται στην εκκεντρότητα μεταξύ στάτη και δρομέα. Τα σφάλματα στα τυλίγματα του στάτη είναι ένας από τους πιο συνηθισμένους λόγους για τις βλάβες των κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος και αντιπροσωπεύουν μεταξύ 36% και 66% όλων των βλαβών, ενώ οι βλάβες στα έδρανα αντιπροσωπεύουν μεταξύ 13% και 41%, αντίστοιχα, ανάλογα με τον τύπο και το μέγεθος της μηχανής.

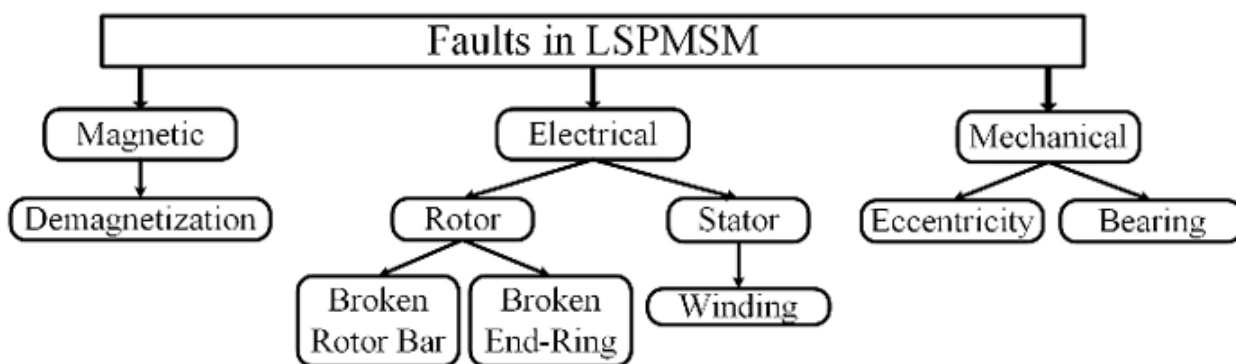


Figure 3.1: Faults in Line Start Permanent Magnets Synchronous Motors. [70]

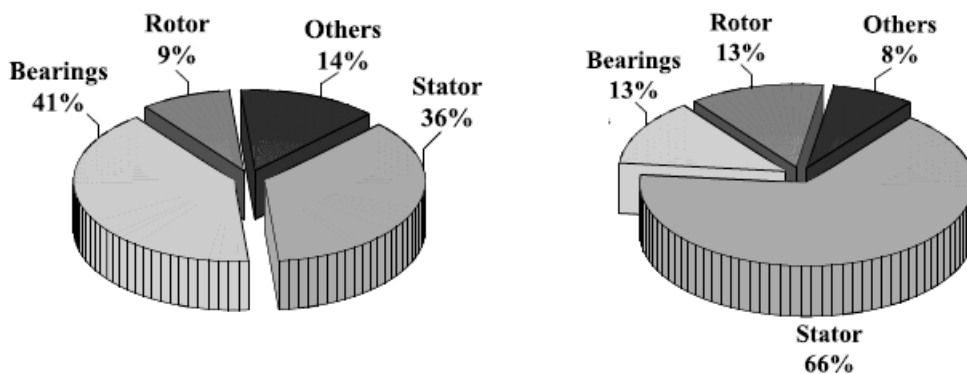


Figure 3.2: Ποσοστά σφαλμάτων σε εξαρτήματα ηλεκτρικών μηχανών α) χαμηλής τάσης (αριστερά), β) υψηλής τάσης (δεξιά) . [69]

### 3.1 Ηλεκτρικά Σφάλματα [64] - [75],[101],[103],[105]

Τα τυλίγματα του στάτη, τα οποία είναι σπείρες σύρματος τυλιγμένες γύρω από τους πόλους, όταν βρίσκονται σε υγιή κατάσταση δεν έρχονται σε άμεση επαφή μεταξύ τους, καθώς χρησιμοποιούνται στρώματα μόνωσης για να προστατεύονται από τα ηλεκτρικά σφάλματα. Ως ηλεκτρικά σφάλματα χαρακτηρίζουμε το βραχυκύκλωμα μεταξύ γειτονικών σπειρών μιας φάσης, μεταξύ πηνίων μιας φάσης, μεταξύ δύο φάσεων, μεταξύ φάσης και γης, αλλά και το ανοιχτοκύκλωμα. Έχει παρατηρηθεί πειραματικά πως τα βραχυκυκλώματα γειτονικών σπειρών που δεν αντιμετωπίστηκαν έγκαιρα ευθύνονται για τις υπόλοιπες κατηγορίες των ηλεκτρικών σφαλμάτων.

Τα ηλεκτρικά σφάλματα συνήθως προκαλούνται από την φθορά της μόνωσης, είτε μετά από τριβή λόγω μηχανικής καταπόνησης, είτε μετά από υπερθέρμανση των τυλιγμάτων λόγω υπερφόρτωσης του κινητήρα.

Τα εσωτερικά βραχυκυκλώματα δημιουργούνται όταν υπάρξει διάσπαση του συστήματος της μόνωσης δύο γειτονικών σπειρών φτιάχνοντας έτσι κάποιο κλειστό κύκλωμα στο οποίο επάγεται τάση, σύμφωνα με τον νόμο του Faraday και επομένως ρέει και ρεύμα. Το ρεύμα στη βραχυκυκλωμένη διαδρομή είναι πολύ μεγαλύτερο από το ρεύμα φάσης, παράγοντας έτσι μεγάλα επίπεδα θερμότητας, με αποτέλεσμα εάν δεν ανακαλυφθεί και διορθωθεί εγκαίρως υπάρχει πιθανότητα να προκαλέσει ζημιά και στις μονώσεις των γειτονικών σπειρών, οδηγώντας σε σφάλμα βραχυκύκλωσης, είτε φάσης με φάση, είτε φάσης προς γείωση, είτε και σε σφάλμα ανοιχτοκύκλωσης.

Επιπροσθέτως τα υψηλά ρεύματα που παράγονται στην βραχυκυκλωμένη διαδρομή παράγουν υψηλής έντασης μαγνητικά πεδία που σε συνδυασμό με την αυξημένη θερμοκρασία αυξάνουν τις πιθανότητες μη αναστρέψιμης απομαγνήτισης των μόνιμων μαγνητών. Τα εσωτερικά βραχυκυκλώματα έχουν πολύ καταστροφικό χαρακτήρα, διότι εξαπλώνονται πολύ γρήγορα και θεωρούνται πολύ δύσκολα στην διάγνωση τους, καθώς η διάγνωση έχει νόημα μόνο στο αρχικό στάδιο της βλάβης. Τα συστήματα ασφαλείας που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία δεν ανιχνεύουν εύκολα τα σφάλματα εσωτερικών βραχυκυκλωμάτων, επειδή δεν προκαλούν σημαντικές μεταβολές στα φασικά ρεύματα.

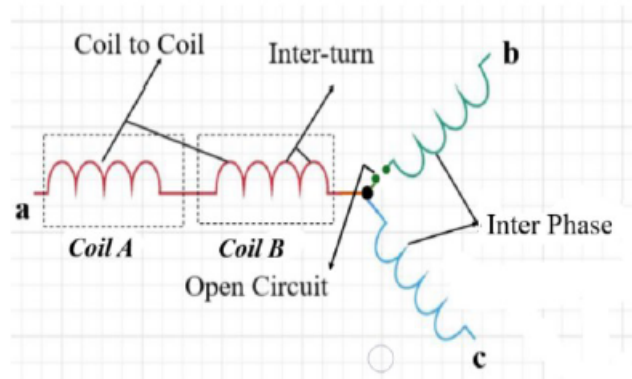


Figure 3.3: Stator Winding Faults. [72]

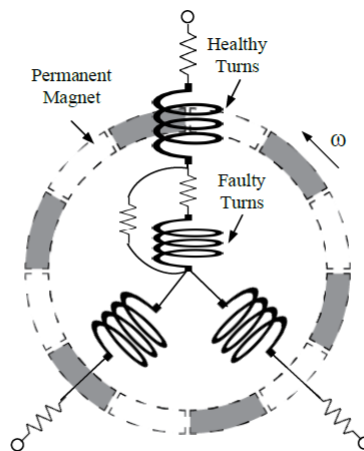


Figure 3.4: Inter-turn Short Circuit Fault. [71]



Ένα ακόμα σφάλμα το οποίο μπορεί να εμφανιστεί στους σύγχρονους κινητήρες μονίμων μαγνητών με εκκίνηση γραμμής (line start permanent magnet synchronous motors) είναι αυτό της σπασμένης μπάρας του δρομέα, καθώς φέρουν βραχυκυκλωμένο κλωβό. Αυτά τα σφάλματα συνήθως οφείλονται σε κατασκευαστικά ελαττώματα και σε συνδυασμό με την ύπαρξη του επιδερμικού φαινομένου, που οφείλεται στο ότι η πυκνότητα του ρεύματος σε έναν αγωγό είναι μεγαλύτερη στην επιφάνεια από ότι στο εσωτερικό του, κάνουν τις μπάρες πιο ευάλωτες σε σημεία που υπάρχουν ρωγμές και τρύπες.

Κατά την εκκίνηση της μηχανής, ειδικότερα όταν το μηχανικό φορτίο είναι μεγάλο, υψηλό ρεύμα διαρρέει τις μπάρες του δρομέα αυξάνοντας έτσι πολύ την θερμοκρασία τους με κίνδυνο αυτές που έχουν ελαττώματα να ραγίσουν ή και να σπάσουν. Στη συνέχεια, όταν μια μπάρα σπάσει, το ρεύμα της μοιράζεται στις γειτονικές, πράγμα που σημαίνει ότι περισσότερο ρεύμα ρέει σε αυτές, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα, ακόμα και να μην έχουν κάποιο κατασκευαστικό ελάττωμα, να σπάσουν.

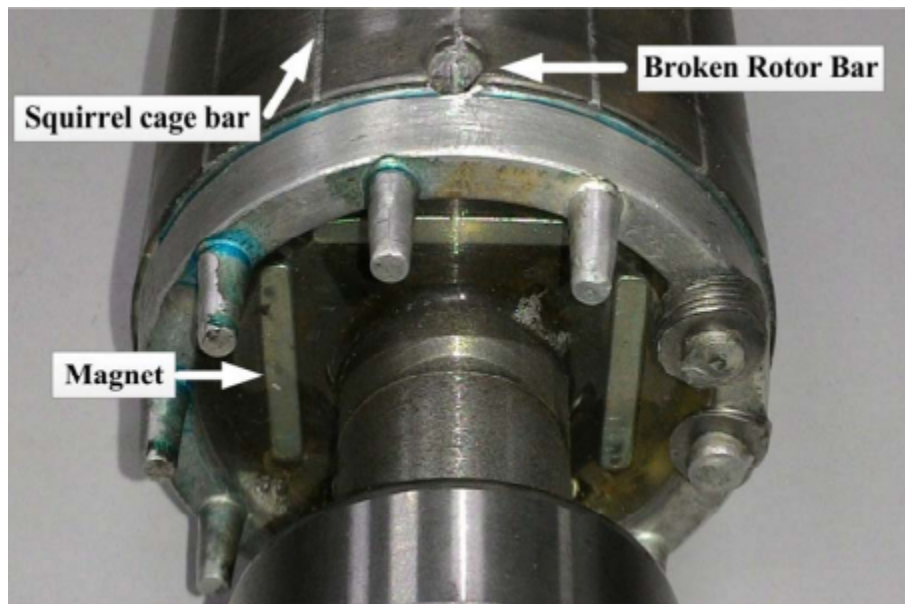


Figure 3.5: Squirrel-Cage Rotor with one Broken Bar.[74]

### 3.2 Μηχανικά Σφάλματα [76] - [83],[103]

Τα μηχανικά σφάλματα οφείλονται σε δυσλειτουργίες που προέρχονται από τα κινούμενα τμήματα της μηχανής και αφορούν κυρίως βλάβες στα έδρανα (ρουλεμάν), την εκκεντρότητα και λύγισμα του άξονα λόγω ανομοιόμορφης κατανομής του βάρους του δρομέα .

Τα ρουλεμάν στηρίζουν τον δρομέα, έτσι ώστε να μην πέσει εξαιτίας της βαρύτητας, προσφέροντας του την ικανότητα της ομαλής περιστροφής. Κάθε ρουλεμάν αποτελείται από διάφορα μέρη: έναν εξωτερικό δακτύλιο, έναν εσωτερικό δακτύλιο, στοιχεία κύλισης που έρχονται σε επαφή υπό βαριά δυναμικά φορτία και σχετικά υψηλές ταχύτητες, και προαιρετικά έναν κλωβό γύρω από αυτά τα στοιχεία κύλισης, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.6. Η πλειοψηφία των ηλεκτρικών μηχανών χρησιμοποιεί ρουλεμάν με κυλινδρικά στοιχεία.

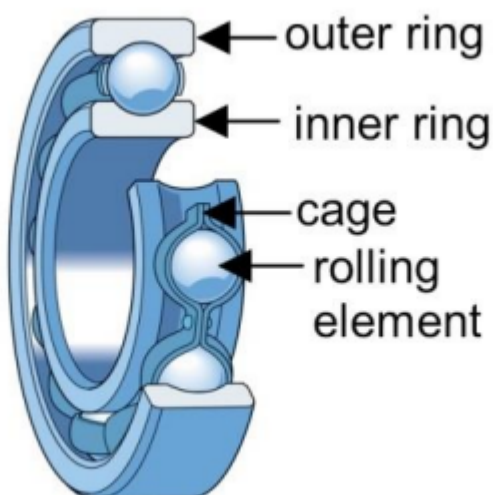


Figure 3.6: Δομικά Χαρακτηριστικά Εδράνου. [77]

Ακόμη και υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας με ισορροπημένο φορτίο και καλή ευθυγράμμιση, μπορεί να προκύψουν σφάλματα εξαιτίας της καταπόνησης και του γήρατος των ρουλεμάν. Η λίπανση παίζει σημαντικό ρόλο για την ομαλή λειτουργία των εδράνων και είναι το πρώτο πράγμα που ελέγχεται κατά την εξέταση ενός ρουλεμάν που έχει παρουσιάσει βλάβη. Η ελλιπής λίπανση αυξάνει τον κίνδυνο επαφής μετάλλου με μέταλλο, ενώ η υπερβολική λίπανση προκαλεί συσσώρευση θερμότητας και τριβές, καθώς τα στοιχεία κύλισης προσπαθούν συνεχώς να σπρώξουν το επιπλέον γράσο. Το περιβάλλον συμβάλλει ως παράγοντας ενίσχυσης των σφαλμάτων, καθώς ρύποι όπως σκόνη, χώμα, υγρασία και χημικές - διαβρωτικές ουσίες επηρεάζουν την λειτουργία τους.

Επιπροσθέτως, η μη ορθή ευθυγράμμιση του άξονα κατά την συναρμολόγηση ή η καμπύλωση του έπειτα από υπερθέρμανσης ή υπερφόρτωσης οδηγεί σε δονήσεις που προκαλούν μεγάλη φθορά στα έδρανα. Η υπερφόρτωση μπορεί να φέρει ράγισμα ή και καταστροφή στα στοιχεία κύλισης, το οποίο συνεπάγεται με την εμφάνιση υψηλού επιπέδου δυναμικής εκκεντρότητας. Μερικές φορές οι βλάβες των ρουλεμάν μπορεί να εκδηλώνονται ως βλάβες ασυμμετρίας του ρότορα, οι οποίες συνήθως καλύπτονται από την κατηγορία των βλαβών που σχετίζονται με την εκκεντρότητα.

Τέλος ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας πρόκλησης σφαλμάτων στα έδρανα είναι η διάβρωση ηλεκτρικού τόξου (Electric Arc Erosion), όπου ρεύμα διέρχεται μέσα από το ρουλεμάν και σταματάει στην επιφάνεια επαφής μεταξύ των δακτυλίων και των στοιχείων κύλισης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή υψηλών θερμοκρασιών τοπικά με κίνδυνο να εμφανιστούν βαθουλώματα, είτε στους δακτύλιους, είτε στα στοιχεία κύλισης.

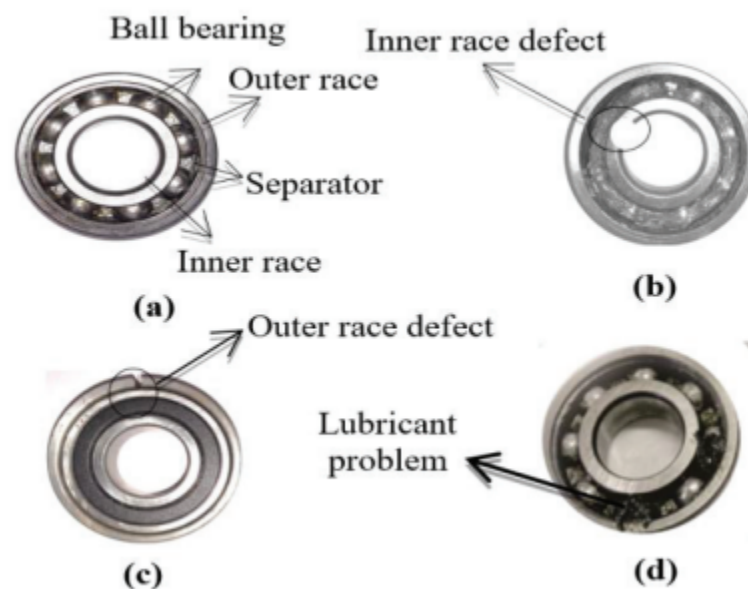


Figure 3.7: Έδρανα α) σε υγιής κατάσταση β) με σφάλμα στον εσωτερικό δακτύλιο γ) με σφάλμα στον εξωτερικό δακτύλιο δ) με σφάλμα λίπανσης. [76]

Όταν μια ηλεκτρική μηχανή βρίσκεται σε υγιή κατάσταση λειτουργίας, τότε το κέντρο του άξονα περιστροφής του δρομέα είναι ίδιο με το γεωμετρικό κέντρο του στάτη και επομένως το διάκενο είναι ίσο σε όλα τα σημεία της μηχανής. Η ανομοιόμορφη κατανομή του διάκενου μεταξύ στάτη και δρομέα ονομάζεται σφάλμα εκκεντρότητας και ταξινομείται σε τρεις τύπους την στατική, δυναμική και την μικτή.

Στατική εκκεντρότητα παρουσιάζεται όταν το κέντρο του άξονα περιστροφής του ρότορα είναι ίδιο με το γεωμετρικό του κέντρο και έχει υποστεί μετατόπιση σε σχέση με το γεωμετρικό κέντρο του στάτη. Όμως το σημείο με το μικρότερο διάκενο παραμένει σταθερό όσο ο δρομέας περιστρέφεται.

Δυναμική εκκεντρότητα εμφανίζεται όταν το κέντρο του άξονα περιστροφής του ρότορα αποκλίνει από το γεωμετρικό του κέντρο, αλλά το γεωμετρικό κέντρο του στάτη και το κέντρο του άξονα περιστροφής του ρότορα ευθυγραμμίζονται. Σε αυτήν την περίπτωση, το σημείο με το μικρότερο διάκενο αλλάζει συνεχώς καθώς ο ρότορας περιστρέφεται. Στην πραγματικότητα αυτά τα δύο φαινόμενα συχνά συνυπάρχουν, γεγονός που οδηγεί στη μικτή εκκεντρότητα.

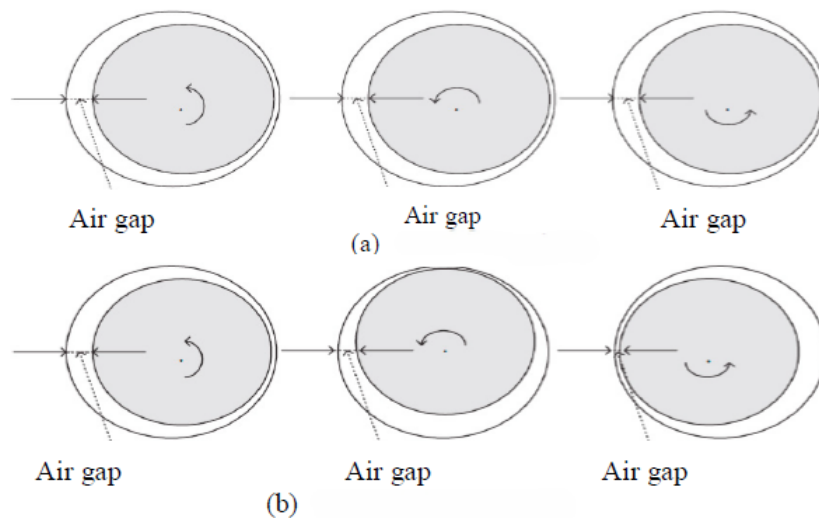


Figure 3.8: a) παράδειγμα στατικής εκκεντρότητας (πάνω), b) παράδειγμα δυναμικής εκκεντρότητας (Κάτω). [81]

Τα σφάλματα εκκεντρότητας είναι ικανά να προκαλέσουν κραδασμούς, θόρυβο και κυμάτωση της ροπής και αν γίνει μεγάλο το επίπεδο του σφάλματος υπάρχει η πιθανότητα να προκαλέσει τριβή μεταξύ του στάτη και του δρομέα με αποτέλεσμα να προκληθεί ηλεκτρική ή μαγνητική βλάβη του κινητήρα.

### 3.3 Μαγνητικά Σφάλματα [84] - [86]

Τα μαγνητικά σφάλματα εμφανίζονται μόνο στις μηχανές μόνιμων μαγνητών και αποτελούνται από τα σφάλματα μη αναστρέψιμης απομαγνήτισης και από αυτά της μηχανικής φύσης, όπου οι μόνιμοι μαγνήτες έχουν υποστεί υλική φθορά . Οι κύριοι παράγοντες για να εμφανιστούν αυτά τα σφάλματα είναι η αντίδραση του σπλισμού , τα αντικρουόμενα μαγνητικά πεδία, το να έρθουν σε επαφή οι μαγνήτες με ξένα σώματα που θα τους προκαλέσουν ζημιά, η διάβρωση , η γήρανση των μόνιμων μαγνητών και οι υψηλές θερμοκρασίες.

Η θερμοκρασία των μόνιμων μαγνητών αυξάνεται όταν ο κινητήρας λειτουργεί με υψηλή ροπή φορτίου σε δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες, αλλά και όταν υπάρχουν σφάλματα εσωτερικών βραχυκυκλωμάτων στα τυλίγματα του στάτη, εφόσον εκεί το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι μεγάλο και προκαλεί τοπική αύξηση της θερμοκρασίας (όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 3.1).

Ως απομαγνήτιση μπορεί να οριστεί η απώλεια της πυκνότητας ροής των μόνιμων μαγνητών, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση των επιδόσεων των μηχανών μόνιμων μαγνητών. Η απομαγνήτιση διακρίνεται σε δύο κατηγορίες την ομοιόμορφη απομαγνήτιση που συμβαίνει σταθερά σε όλο τον πόλο και την μερική απομαγνήτιση, όπου μόνο συγκεκριμένες περιοχές του υλικού επηρεάζονται.

Στο φαινόμενο της μη αναστρέψιμης απομαγνήτισης η απόδοση των μόνιμων μαγνητών αποδυναμώνεται με αποτέλεσμα να απαιτείται υψηλότερο ρεύμα στον στάτη, για να παράγεται σταθερή ροπή εξόδου. Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται αύξηση των απωλειών χαλκού και της θερμοκρασίας, το οποίο συμβάλλει στην περαιτέρω απομαγνήτιση, στην εκ νέου αύξηση του ρεύματος στάτη και στη μείωση της απόδοσης του κινητήρα.

Εν κατακλείδι συμπεραίνεται ότι η απομαγνήτιση μπορεί να οδηγήσει σε ανισόρροπη ροή στο δρομέα, υπερφορτώσεις , ανεπιθύμητο θόρυβο και καταστροφικές δονήσεις που δύναται να επιφέρουν φθορά στα ρουλεμάν και βλάβη στον ρότορα.

## 4 Κεφάλαιο: Μέθοδοι Διάγνωσης Σφαλμάτων [92],[69],[101],[106]

Λόγω της καταστροφικής φύσης των ηλεκτρικών σφαλμάτων στάτη, αυτά πρέπει να ανιχνεύονται σε πρώιμο στάδιο για να αποφευχθεί η εξάπλωση του σφάλματος, η οποία μπορεί να οδηγήσει είτε σε σημαντική αύξηση του κόστους επισκευής, είτε ακόμα και σε καταστροφή του κινητήρα και ανάγκη αντικατάστασης του.

Η βασική αρχή των μεθόδων διάγνωσης σφαλμάτων βασίζεται στο ότι η μηχανή είναι ακόμα λειτουργική και το σφάλμα σε χαμηλό επίπεδο σοβαρότητας. Επομένως, μπορεί αφότου διαγνωστεί να διορθωθεί. Αυτός είναι και ο λόγος που στα ηλεκτρικά σφάλματα μπορούμε να διαγνώσουμε μόνο τα εσωτερικά βραχυκυκλώματα μεταξύ τυλιγμάτων, καθώς τα ανοιχτοκυκλώματα και τα βραχυκυκλώματα φάσης με φάση και φάση με γη είναι καταστροφικά για τον κινητήρα.

Οι μέθοδοι διάγνωσης σφαλμάτων που επεξεργάζονται ψηφιακά σήματα για να εξαγάγουν τα χαρακτηριστικά συμπτώματα για κάθε έναν συγκεκριμένο τύπο σφάλματος χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες : στις μεθόδους που βασίζονται στο πεδίο της συχνότητας , στις μεθόδους που βασίζονται στο πεδίο του χρόνου και στις μεθόδους που βασίζονται στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας ( βλέπε το σχήμα 4.1 ).

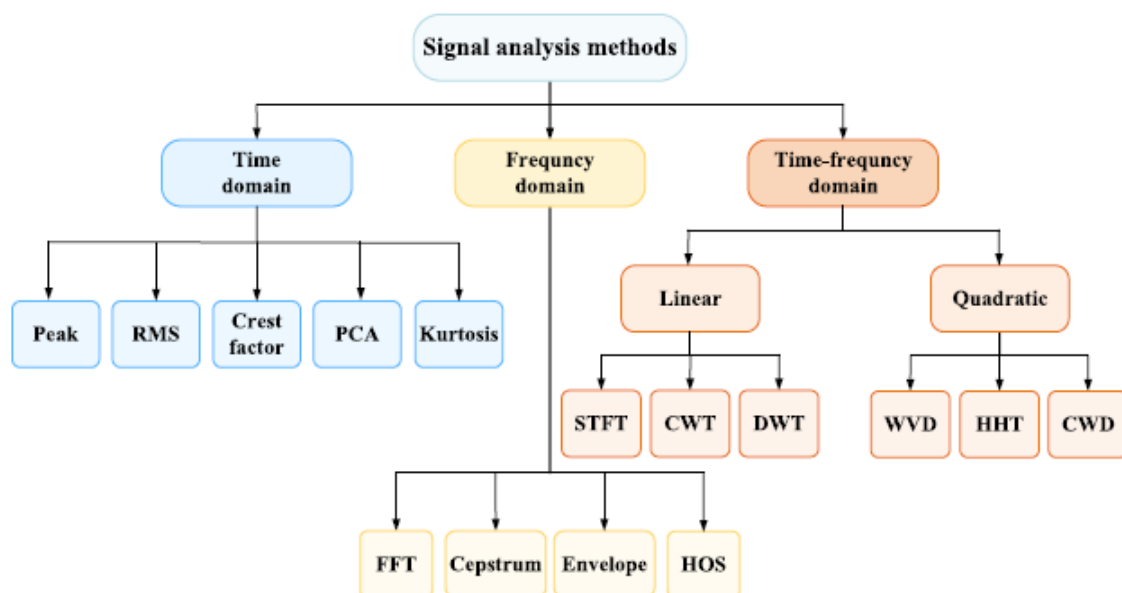


Figure 4.1: Μέθοδοι επεξεργασίας σήματος για την διάγνωση σφαλμάτων. [69]

- **Ανάλυση σήματος στο πεδίο του χρόνου**

Καθώς η παρακολούθηση του συστήματος είναι μια συνεχής δυναμική διαδικασία είναι φυσικό να εμφανίζονται χαρακτηριστικά στο πεδίο του χρόνου που είναι χρήσιμα για την διάγνωση των σφαλμάτων. Οι μέθοδοι στο πεδίο του χρόνου βασίζονται κυρίως στη στατιστική ανάλυση και χρησιμοποιούν παραμέτρους του συστήματος όπως τις μέγιστες τιμές, τις RMS τιμές, τη μέση τιμή, τη μέση τετραγωνική ρίζα, τις τιμές κύρτωσης κ.λπ.

- **Ανάλυση σήματος στο πεδίο της συχνότητας**

Η πιο συνήθης μέθοδος ανάλυσης σήματος στο πεδίο της συχνότητας είναι ο μετασχηματισμός Fourier ο οποίος αναπαριστά ένα σήμα ως υπέρθεση πολλών ημιτονοειδών ή συνημιτονοειδών συναρτήσεων. Η δυνατότητα του να αποτυπώνει με σαφήνεια την κατανομή συχνότητας του σήματος είναι πολύ σημαντική, καθώς οποιαδήποτε αλλαγή στο πλάτος και τη συχνότητα των αρμονικών συνιστωσών μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως χαρακτηριστικά των διαφόρων σφαλμάτων.

- **Ανάλυση σήματος στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας**

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα που έχουν οι μέθοδοι ανάλυσης στο πεδίο της συχνότητας με βάση τον μετασχηματισμό Fourier έχουν αρκετά και σημαντικά μειονεκτήματα. Το πιο σημαντικό είναι ότι απαιτείται τα σήματα να είναι σταθερά, γεγονός που πολλές φορές δεν είναι εφικτό. Η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας μπορεί να εντοπίσει τις συνιστώσες της συχνότητας του σήματος και να αναδείξει τα χρονικά μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά τους, κάνοντας τη σημαντικό εργαλείο για την παρακολούθηση και τη διάγνωση σφαλμάτων μέσω σημάτων των συστημάτων που βρίσκονται σε μεταβαλλόμενες καταστάσεις.

Η πιο δημοφιλής μέθοδος είναι αυτή του μετασχηματισμού Fourier σύντομου χρόνου (STFT), η οποία πραγματοποιεί ανάλυση του σήματος σε μικρά χρονικά παράθυρα τύπου rectangle, Hamming, Hanning και άλλα. Ακόμα μια αρκετά δημοφιλής μέθοδος είναι ο μετασχηματισμός κυματομορφών (Wavelet transform), ο οποίος χρησιμοποιεί μια τεχνική παραθύρων μεταβλητού μεγέθους, χωρίζοντας μια συνάρτηση συνεχούς χρόνου σε κυματομορφές μέσα από τις οποίες ανιχνεύει τοπικά χαρακτηριστικά στα σήματα που άλλες τεχνικές ανάλυσης σήματος δεν τα εντοπίζουν.

Παρακάτω θα αναλυθούν κάποιες τεχνικές διάγνωσης σφαλμάτων των εσωτερικών βραχυκυκλωμάτων που χρησιμοποιούν τις παραπάνω μεθόδους ανάλυσης των σημάτων που εξάγονται από τον κινητήρα.

## 4.1 Motor Current Signature Analysis (MCSA) [87] - [88]

Το ρεύμα φάσης του στάτη είναι ένα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα σήματα για τη διάγνωση σφαλμάτων, καθώς η ανάλυση των υπογραφών του στο πεδίο της συχνότητας είναι μια μέθοδος που χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος, υψηλή αξιοπιστία, τις ελάχιστες απαιτήσεις εξοπλισμού, από τον μη επεμβατικό της χαρακτήρα και τη δυνατότητα εφαρμογής χωρίς να πρέπει να αποσυνδεθεί η μηχανή.

Συγκεκριμένα, η μέθοδος αυτή βασίζεται στην καταγραφή των σημάτων των ρευμάτων κάθε φάσης και ανάλυσης τους στην μόνιμη κατάσταση κάνοντας χρήση του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform - FFT). Στην περίπτωση σφαλμάτων εσωτερικών βραχυκυκλωμάτων (ITSC), οι συνιστώσες της συχνότητας των οποίων τα πλάτη αυξάνονται εμφανίζονται :

$$f_{itsc1} = f_s * (1 \pm \frac{k}{P_p})$$

όπου  $f_s$  είναι η συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας,  $k$  αντιπροσωπεύει διαδοχικούς θετικούς ακέραιους αριθμούς ( $k = +1, +2, +3, \dots$ ) και  $P_p$  αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ζευγών πόλων.

Η αύξηση του πλάτους της συνιστώσας  $3 * f_s$  είναι μια σημαντική ένδειξη σφάλματος, η οποία αποδίδεται στην ασυμμετρία του μαγνητικού πεδίου λόγω του σφάλματος του εσωτερικού βραχυκυκλώματος που οδηγεί σε ανισορροπίες στα φασικά ρεύματα και εμφάνιση - αύξηση της τρίτης αρμονικής.

Επιπροσθέτως, τα σφάλματα των εσωτερικών βραχυκυκλωμάτων δημιουργούν αύξηση του πλάτους των χωρικών αρμονικών, οι οποίες είναι αρμονικές συνιστώσες που οφείλονται στις αυλακώσεις του πυρήνα του στάτη και του δρομέα και εμφανίζονται στις συχνότητες :

$$f_{itsc2} = (\frac{N_{ss}}{P_p} \pm 1) * f_s$$

όπου  $N_{ss}$  είναι ο αριθμός των αυλακώσεων .



## 4.2 Συμμετρικές Συνιστώσες [89] - [92], [67]

Οι σύγχρονοι κινητήρες μόνιμων μαγνητών όταν λειτουργούν υπό υγιείς συνθήκες έχουν συμμετρικά τυλίγματα στον στάτη που παράγουν ισορροπημένα ρεύματα, όταν συνδέονται με τριφασική πηγή ισχύος. Ωστόσο, όταν υπάρχει βραχυκύκλωμα μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη δημιουργούνται ασυμμετρίες με αποτέλεσμα τα πλάτη των τριών φάσεων του ρεύματος να μην είναι ισορροπημένα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω έχει δημιουργηθεί ένας δείκτης για το πόσο ισορροπημένα είναι τα φασικά ρεύματα, ο οποίος υπό υγιείς συνθήκες είναι κοντά στην τιμή μηδέν.

$$f_i = |I_a - I_b| + |I_b - I_c| + |I_c - I_a|$$

Όπου  $I_a$ ,  $I_b$  και  $I_c$  είναι τα ρεύματα στάτη της φάσης α, φάσης β και της φάσης γ αντίστοιχα.

Το ρεύμα φάσης, επίσης, μπορεί να αναλυθεί στο ρεύμα θετικής ακολουθίας ( $I_{ps}$ ), αρνητικής ακολουθίας ( $I_{ns}$ ) και μηδενικής ακολουθίας ( $I_{zs}$ ). Κάτω από υγιείς συνθήκες λειτουργίας του κινητήρα, το ρεύμα θετικής ακολουθίας θα είναι ίσο με το φασικό ρεύμα, ενώ το ρεύμα μηδενικής και αρνητικής ακολουθίας θα είναι μηδέν. Όταν εμφανίζεται το βραχυκύκλωμα μεταξύ των τυλιγμάτων του στάτη δημιουργείται ασυμμετρία μεταξύ των φάσεων, καθώς η μία φάση έχει μικρότερη σύνθετη αντίσταση, με αποτέλεσμα την αλλαγή της τιμής της αρνητικής ακολουθίας (πλέον δεν είναι μηδέν).

Κάνοντας χρήση του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier στο ρεύμα αρνητικής ακολουθίας, μπορούμε να διαγνώσουμε την ύπαρξη εσωτερικού βραχυκυκλώματος, αν υπάρχει σημαντική αύξηση του πλάτους της βασικής συνιστώσας fs, ενώ το ρεύμα θετικής ακολουθίας δεν δίνει κάποια πληροφορία σε αυτό το είδος σφάλματος.

$$I_{ps} = \frac{i_a + \alpha * i_b + \alpha^2 * i_c}{3},$$

$$I_{ns} = \frac{i_a + \alpha^2 * i_b + \alpha * i_c}{3},$$

$$I_{zs} = \frac{i_a + i_b + i_c}{3},$$

$$\alpha = 1 \angle 120^\circ$$

### 4.3 Park Vector Approach / Extended Park Vector Approach [93] - [96]

Η μέθοδος Park Vector Approach (PVA) είναι ένα πολύ σημαντικό διαγνωστικό εργαλείο για σφάλματα εσωτερικών βραχυκυκλωμάτων μεταξύ τυλιγμάτων του στάτη, διότι ανιχνεύει ασυμμετρίες. Η τεχνική αυτή βασίζεται στον μετασχηματισμό του τριφασικού συστήματος ρευμάτων σε δύο ισοδύναμα ρεύματα ως συνιστώσες πάνω στον direct άξονα (d-axis) και τον quadrature άξονα (q-axis).

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}i_a - \frac{1}{\sqrt{6}}i_b - \frac{1}{\sqrt{6}}i_c \\ i_q &= \frac{1}{\sqrt{2}}i_b - \frac{1}{\sqrt{2}}i_c \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow \begin{aligned} i_d &= \frac{\sqrt{6}}{2}I_M \cos(\omega t) \\ i_q &= \frac{\sqrt{6}}{2}I_M \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \end{aligned}$$

Όπου  $I_a$ ,  $I_b$  και  $I_c$  είναι τα ρεύματα της κάθε φάσης,  $I_M$  η μέγιστη τιμή του ρεύματος θετικής ακολουθίας και  $\omega$  η γωνιακή συχνότητα.

Όταν ο κινητήρας λειτουργεί υπό κανονικές συνθήκες, οι συνιστώσες αναπαριστώνται στον γεωμετρικό τόπο ως κύκλος, σε αντίθεση με την περίπτωση που λειτουργεί υπό την επίδραση σφάλματος εσωτερικού βραχυκυκλώματος, όπου τότε η αναπαράσταση στον γεωμετρικό τόπο έχει την μορφή έλλειψης.

Η μέθοδος Park Vector Approach (PVA) μπορεί επιπλέον να επεκταθεί στην Extended Park Vector Approach (EPVA) κάνοντας φασματική ανάλυση των συνιστωσών του διανύσματος Park. Συγκεκριμένα, το εσωτερικό βραχυκύκλωμα των τυλιγμάτων θα προκαλέσει ασυμμετρία των τριών φάσεων, η οποία θα εμφανίσει ανώτερες αρμονικές με σημαντικότερη ένδειξη σφάλματος τη αύξηση του πλάτους της συνιστώσας συχνότητας  $2 * f_s$ .

$$I_{mod} = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$$

Όταν ο κινητήρας είναι υγιής, οι συνιστώσες του ρεύματος  $i_d$  και  $i_q$  έχουν διαφορά φάσης  $90^\circ$  και επομένως το  $I_{mod}$  έχει μόνο την dc συνιστώσα.

#### 4.4 Stray Flux Monitoring [97] - [99]

Η παρακολούθηση της μαγνητικής ροής του διάκενου ή της "αδέσποτης"- εξωτερικής μαγνητικής ροής (stray flux), αποτελεί μια ισχυρή μέθοδο διάγνωσης των εσωτερικών βραχυκυκλωμάτων, αφού εκτός από την ύπαρξη τους, μπορεί να διαγνώσει και σε ποιο πηνίο βρίσκονται. Ως "αδέσποτη"-εξωτερική μαγνητική ροή (stray flux) θεωρούμε τις γραμμές του μαγνητικού πεδίου που εκπέμπονται εξωτερικά από τον πυρήνα του στάτη, δημιουργώντας ένα μαγνητικό πεδίο ίδιο με αυτό του διάκενου, απλά εξασθενημένο.

Το μαγνητικό πεδίο είναι πολύ σημαντικό μέγεθος για τον έλεγχο της υγείας ενός κινητήρα, διότι στο διάκενο γίνεται η μετατροπή της ενέργειας. Όταν στον κινητήρα υπάρχει εσωτερικό βραχυκύκλωμα, το ρεύμα που ρέει στις βραχυκυκλωμένες σπείρες είναι αρκετά μεγάλο αυξάνοντας την μαγνητεγερτική δύναμη στο σημείο αυτό, με αποτέλεσμα να επηρεαστεί η μαγνητική ροή κοντά στο βραχυκύκλωμα.

Η παρακολούθηση της εξωτερικής μαγνητικής ροής έχει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως ότι είναι φθηνή και μη παρεμβατική μέθοδος. Κάνει χρήση αισθητήρων που αποτελούνται από πηνία με πολλές περιελίξεις ή τύπου Hall effect, οι οποίοι τοποθετούνται πάνω στον κινητήρα σε θέση που υπολογίζεται είτε η ακτινική μαγνητική ροή, είτε η αξονική μαγνητική ροή, είτε σε θέση που συνδυάζει και τις δύο κατευθύνσεις.

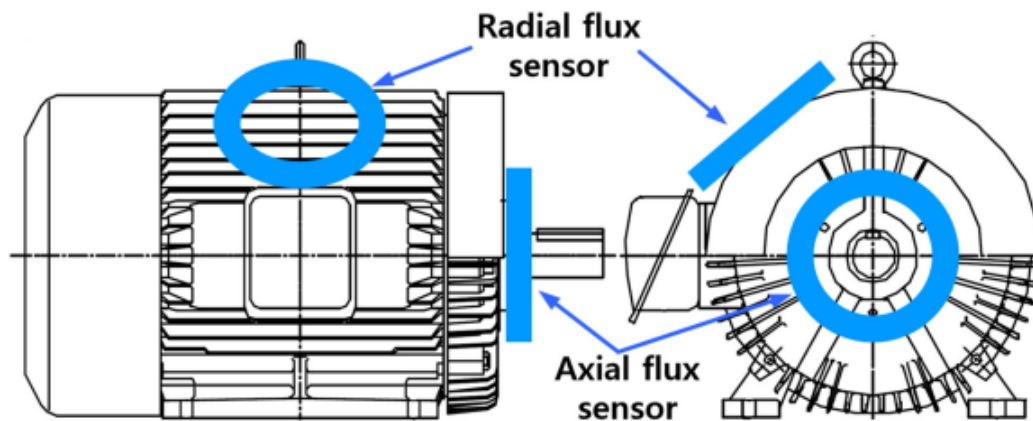


Figure 4.2: Αισθητήρες αξονικής και ακτινικής εξωτερικής μαγνητικής ροής. [99]

## 4.5 Torque Monitoring [100],[102],[104]

Η παρακολούθηση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής αποτελεί ένα ακόμα σημαντικό διαγνωστικό εργαλείο απέναντι στα σφάλματα εσωτερικών βραχυκυκλωμάτων, καθώς το μη ισορροπημένο μαγνητικό πεδίο που παράγουν τα τυλίγματα του στάτη λόγω του βραχυκυκλώματος έχει ως απόρροια ότι οι δυνάμεις στον δρομέα κατανέμονται ανομοιόμορφα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγάλων κυματώσεων στην ροπή και μηχανικών δονήσεων. Όσο πιο μικρή είναι η αντίσταση σφάλματος, τόσο μεγαλύτερη είναι και η κυμάτωση ροπής.

Κάνοντας χρήση του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier(FFT) στο σήμα της ηλεκτρομαγνητικής ροπής, παρατηρείται αύξηση των αρμονικών στις συχνότητες  $2 * f_s$ ,  $4 * f_s$  και  $8 * f_s$  όταν υπάρχει εσωτερικό βραχυκύκλωμα στα τυλίγματα του στάτη με σημαντικότερη από αυτές ένδειξη σφάλματος την αύξηση του πλάτους της θεμελιώδους συχνότητας ( $2 * f_s$ ).

## 4.6 Σύνοψη [69]

Table 1: Κατηγοριοποίηση των μεθόδων διάγνωσης εσωτερικών βραχυκυκλωμάτων.

Μέθοδοι διάγνωσης στο πεδίο της συχνότητας				
Διαγνωστικό σήμα	Μέθοδος	Υπογραφές σφάλματος	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ρεύμα στάτη	FFT	Αρμονικές περιττού αριθμού, $3f_s$ , $f_{itsc1} = f_s * (1 \pm \frac{k}{P_p})$	Ανθεκτικότητα στις μεταβολές ροπής/ταχύτητας φορτίου, Σε απευθείας σύνδεση (on-line)	Απαιτείται συνθήκη μόνιμης κατάστασης
Ρεύμα στάτη	EPVA	$2f_s$		Απαιτείται μέτρηση των ρευμάτων όλων των φάσεων για τον υπολογισμό των $i_d$ και $i_q$ , Απαιτείται συνθήκη μόνιμης κατάστασης

Ρεύμα στάτη στον quadrature άξονα (q-axis)	FFT	$2f_s$	Ανθεκτικότητα στις μεταβολές ροπής/ταχύτητας φορτίου, Σε απευθείας σύνδεση (on-line)	Απαιτείται συνθήκη μόνιμης κατάστασης, Απαιτείται υπολογισμός ρεύματος στάση στον q-άξονα
Ρεύμα στάτη αρνητικής ακολουθίας	FFT	$f_s, 3f_s$	Ανθεκτικότητα στις μεταβολές ροπής/ταχύτητας φορτίου, Σε απευθείας σύνδεση (on-line)	Απαιτείται συνθήκη μόνιμης κατάστασης, Απαιτείται υπολογισμός ρεύματος στάση αρνητικής ακολουθίας
Τάση στάτη	FFT	Οι πρώτες 14 αρμονικές	Ανθεκτικότητα στις μεταβολές ροπής/ταχύτητας φορτίου, Σε απευθείας σύνδεση (on-line)	Απαιτείται συνθήκη μόνιμης κατάστασης
Τάση στάτη αρνητικής ακολουθίας	FFT	$f_s$	Ανθεκτικότητα στις μεταβολές ροπής/ταχύτητας φορτίου, Σε απευθείας σύνδεση (on-line)	Απαιτείται συνθήκη μόνιμης κατάστασης, Απαιτείται υπολογισμός τάσης στάση αρνητικής ακολουθίας
Τάσης μηδενικής ακολουθίας	FFT	$f_s, 5f_s, 7f_s$	Ανθεκτικότητα στις μεταβολές ροπής/ταχύτητας φορτίου, Σε απευθείας σύνδεση (on-line)	Απαιτείται συνθήκη μόνιμης κατάστασης

Αξονική ροή	FFT	$f_s$ , $3f_s$	Εντοπισμός θέσης σφάλματος, Ανθεκτικότητα στις μεταβολές ροπής/ταχύτητας φορτίου, Σε απευθείας σύνδεση (on-line)	Απαιτείται συνθήκη μόνιμης κατάστασης, Απαιτείται χρήση αισθητήρων
Ηλεκτρομαγνητική ροπή	FFT	$2f_s$	Ανθεκτικότητα στις μεταβολές ροπής/ταχύτητας φορτίου, Σε απευθείας σύνδεση (on-line)	Απαιτείται συνθήκη μόνιμης κατάστασης, Απαιτείται υπολογισμός της ηλεκτρομαγνητικής ροπής
Ταχύτητα περιστροφής	FFT	$2f_s$	Εντοπισμός θέσης σφάλματος, Ανθεκτικότητα στις μεταβολές ροπής/ταχύτητας φορτίου, Σε απευθείας σύνδεση (on-line)	Απαιτείται συνθήκη μόνιμης κατάστασης

## 5 Κεφάλαιο: Ανάλυση και Μοντελοποίηση του Κινητήρα

---

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση του κινητήρα πάνω στον οποίο βασίστηκε αυτή η διπλωματική εργασία και θα γίνει ανάλυση της μοντελοποίησης του, στο περιβάλλον του SimCenter MAGNET.

### 5.1 Ονομαστικά Χαρακτηριστικά του Κινητήρα

Ο κινητήρας που χρησιμοποιήθηκε είναι ένας σύγχρονος κινητήρας μόνιμων μαγνητών με εκκίνηση γραμμής (Line start permanent magnet synchronous motor). Τα ονομαστικά χαρακτηριστικά του σύμφωνα με το ταμπελάκι πάνω στον κινητήρα δίνονται στον πίνακα 2.

Table 2: Ονομαστικά Στοιχεία Κινητήρα.

Παράμετροι	Τιμές
Τάση (V)	400 (V)
Ρεύμα (I)	1.54 (A)
Ισχύς εξόδου (P)	0.75 (KW)
Πόλοι (P)	4
Συχνότητα (f)	50 (Hz)
Συντελεστής ισχύος (PF)	0.82
Σύγχρονη ταχύτητα ( $n_s$ )	1500 (rpm)
Σύνδεση στάτη	Αστέρας
Απόδοση	85.7 %

Ο στάτης αποτελείται από 36 αυλακώσεις, όπου η κάθε μια έχει τυλίγματα 63 σπειρών, ενώ ο δρομέας είναι τύπου βραχυκυκλωμένου κλωβού και αποτελείται από 44 αυλακώσεις χωρισμένες σε δύο διαφορετικής γεωμετρίας κατηγορίες, 36 από αυτές στην πρώτη και οι υπόλοιπες 8 στην δεύτερη. Επιπροσθέτως, στο εσωτερικό του δρομέα υπάρχουν 4 θαμμένοι μαγνήτες. Το φορτίο του κινητήρα είναι 4.78 Nm και η τροφοδοσία είναι τριφασική σε συνδεσμολογία αστέρα (400 V πολική - 230 V φασική).

## 5.2 Μοντελοποίηση του κινητήρα στο περιβάλλον του SimCenter MAGNET

Για τον σχεδιασμό του στάτη στο περιβάλλον του SimCenter MAGNET, αρχικά από το dropdown menu επιλέγουμε το draw και έπειτα, επιλέγουμε Add Circle (Center,Radius). Στη συνέχεια δίνοντας τις κατάλληλες συντεταγμένες στο Keyboard Input Bar δημιουργούμε δύο κύκλους, μέσα στους οποίους θα σχεδιαστεί ο στάτης.

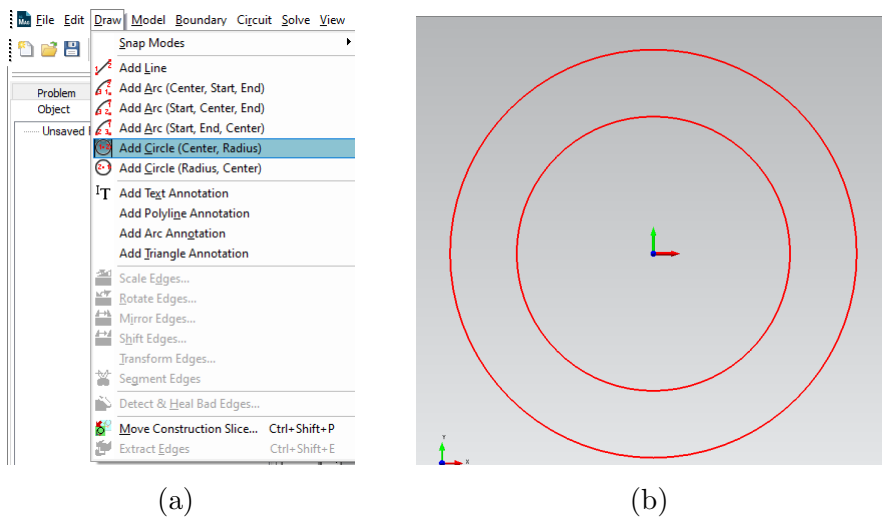


Figure 5.1: a)Dropdown menu b)Αρχικό σχέδιο στάτη



Έπειτα, από το Dropdown menu επιλέγουμε το add line και δίνουμε συντεταγμένες κατάλληλες για να σχεδιάσουμε μια γραμμή από το κέντρο μέχρι τον εξωτερικό κύκλο. Έστερα, πατώντας την γραμμή που δημιουργήσαμε και επιλέγοντας το Rotate Edges φτιάχνουμε άλλες 35 με  $10^\circ$  διαφορά μεταξύ τους.

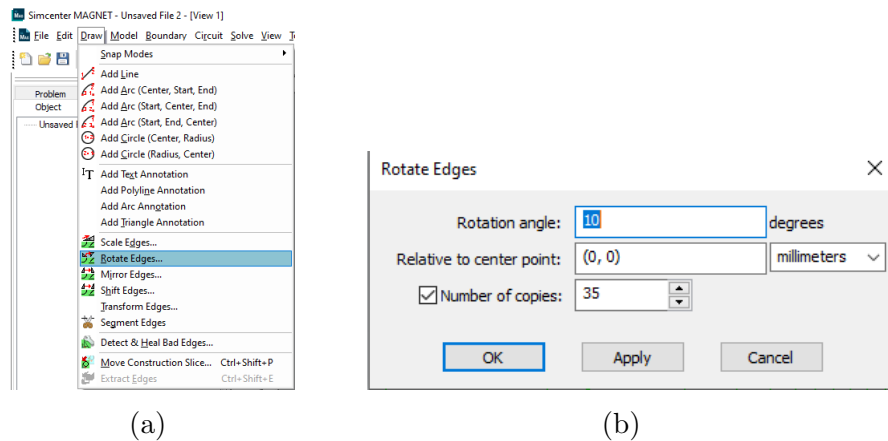


Figure 5.2: a) Rotate Edges . b) Rotate Edges window .

Μετά επιλέγουμε τις 36 αυτές γραμμές και πατάμε το Segment Edges, για να τις σπάσουμε σε τμήματα, έτσι ώστε να κρατήσουμε μόνο όσες είναι πάνω στην επιφάνεια του στάτη, επιτυγχάνοντας με αυτόν τον τρόπο να χωρίσουμε τον στάτη σε 36 ίσα τμήματα και να σχεδιάσουμε μέσα σε αυτά τις αυλακώσεις.

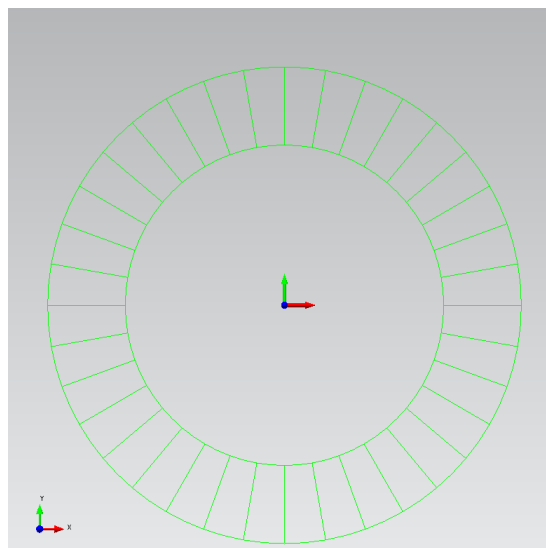


Figure 5.3: Σχεδιασμός θέσεων αυλακώσεων στάτη.

Στη συνέχεια για να γίνει η απεικόνιση των αυλακώσεων, αρχικά σχεδιάζουμε το μισό τμήμα από την πρώτη κάνοντας χρήση των συναρτήσεων Add line , Add Arc και Add Circle. Στο επόμενο βήμα, κάνοντας χρήση της συνάρτησης Mirror Edges αντιγράφτηκε και αντικατοπτρίστηκε η μισή που έχουμε φτιάξει, ολοκληρώνοντας έτσι τη πρώτη αυλάκωση και έπειτα επιλέγουμε όλη την αυλάκωση και κάνοντας χρήση της συνάρτησης Rotate Edges φτιάξαμε και τις υπόλοιπες 35 (36 αυλακώσεις σύνολο με  $10^\circ$  διαφορά μεταξύ τους).

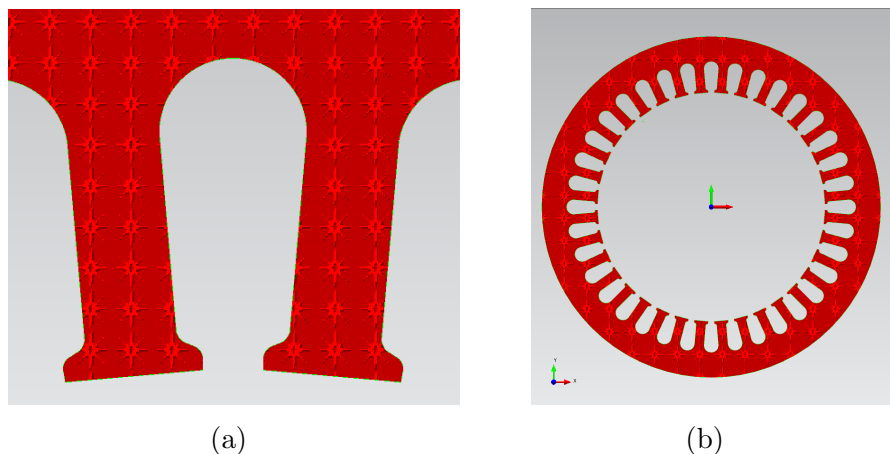


Figure 5.4: a)Μοντέλο αυλακώσεων-δοντιών στάτη b)Ολοκληρωμένο μοντέλο στάτη

Η μοντελοποίηση των τυλιγμάτων του στάτη έγινε σχεδιάζοντας ένα παραλληλόγραμμο, το οποίο καταλαμβάνει περίπου το 70 % του χώρου της αυλάκωσης. Ο σχεδιασμός έγινε με τη βοήθεια της συνάρτησης add line και στη συνέχεια με την συνάρτηση Rotate Edges, δημιουργήσαμε συνολικά 36 τέτοια παραλληλόγραμμα με  $10^\circ$  διαφορά μεταξύ τους, όπως δείχνει το σχήμα 5.5.



Figure 5.5: a)Τυλίγματα μέσα στις αυλακώσεις b)Μοντελο στάτη - τυλιγμάτων

Το επόμενο βήμα το οποίο μας φέρνει πιο κοντά στην ολοκλήρωση του μοντέλου του κινητήρα, είναι να σχεδιάσουμε τον δρομέα. Αρχικά έγινε σχεδιασμός του εξωτερικού κύκλου σύμφωνα με την διάμετρο του δρομέα και έπειτα, σχεδιάστηκε ο άξονας στο εσωτερικό του όπως φαίνεται στο σχήμα 5.6. Στη συνέχεια μέσα στο κόκκινο "τμήμα" του σχήματος 5.6 θα σχεδιαστούν και θα τοποθετηθούν οι αυλακώσεις και οι μαγνήτες.

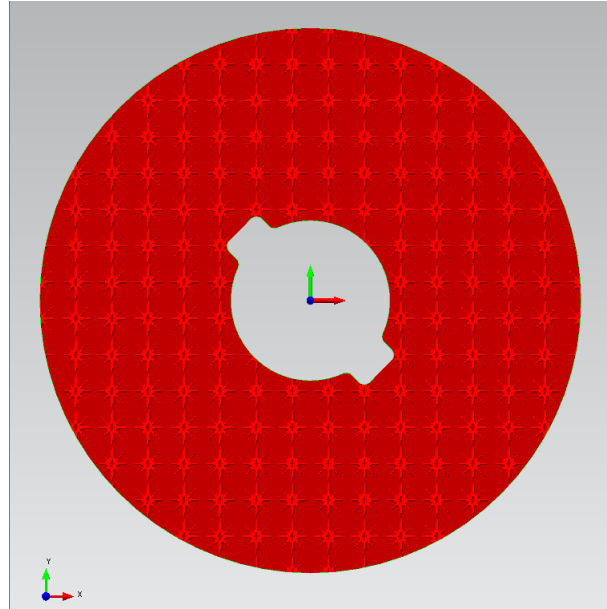
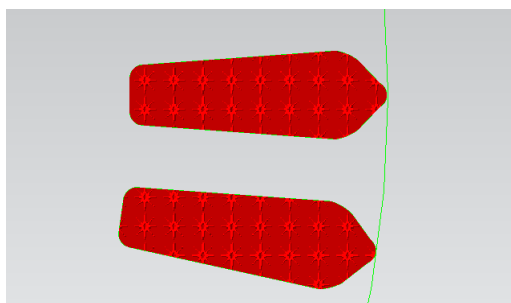
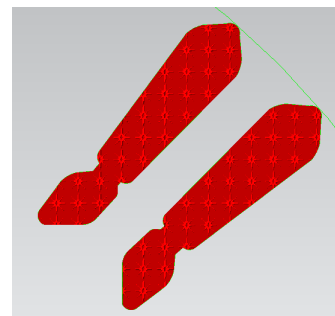


Figure 5.6: Αρχικό σχέδιο δρομέα.

Ομοίως με τις αυλακώσεις του στάτη, δημιουργήσαμε τις μπάρες του δρομέα, οι οποίες είναι 44 και επομένως έχουν  $\frac{360}{44} = 8.18^\circ$  διαφορά μεταξύ τους. 36 από αυτές έχουν γεωμετρία του σχήματος 5.7 a) και οι υπόλοιπες 8 έχουν γεωμετρία του σχήματος 5.7 b).



(a)



(b)

Figure 5.7: διαφορετικές γεωμετρίες μπαρών δρομέα.

Τέλος, σχεδιάσαμε τις θέσεις που θα τοποθετηθούν οι μαγνήτες στο εσωτερικό του δρομέα και τους μαγνήτες, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.8.

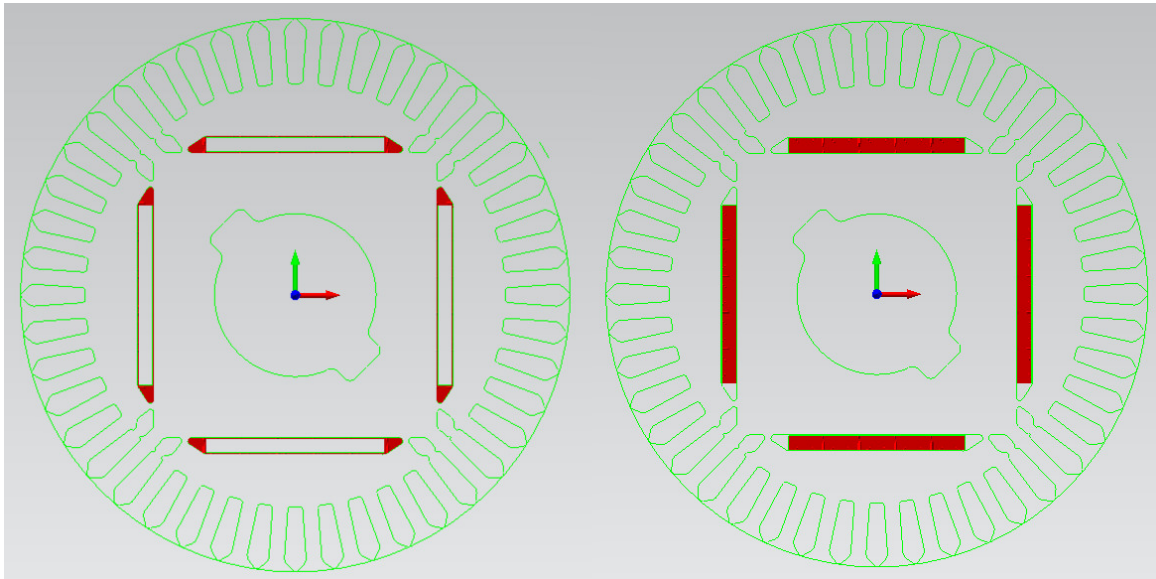


Figure 5.8: θέσεις τοποθέτησης μαγνητών(αριστερά) , Μαγνήτες (δεξιά).

Ο δρομέας με τον στάτη χωρίζονται μεταξύ τους από το διάκενο, το οποίο και αυτό με την σειρά του το έχουμε χωρίσει σε τέσσερα στρώματα. Στη συνέχεια, τοποθέτησαμε υλικά στο μοντέλο του κάθε τμήματος του κινητήρα που έχουμε διαμορφώσει μέχρι τώρα, έτσι ώστε ο κινητήρας να πάρει μορφή. Ειδικότερα, πατώντας το κουμπί Construction slice surface και επιλέγοντας την επιφάνεια του κάθε σχήματος και μετά πατώντας το κουμπί Make Component in A Line ανοίγει ένα παράθυρο στο οποίο δίνουμε όνομα, υλικό και το ενεργό μήκος του εξαρτήματος που έχουμε επιλέξει.

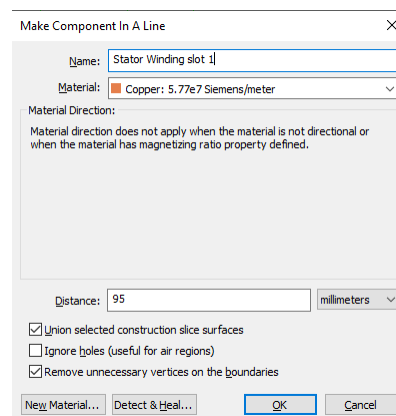


Figure 5.9: Window of Make Component in A Line.

Οι μαγνήτες οι οποίοι βρίσκονται στο εσωτερικό του δρομέα είναι κατασκευασμένοι από κράμα Νεοδυμίου-Σιδήρου-Βορίου (NdFeB) τύπου n40sh και τοποθετούνται προς την κατάλληλη κατεύθυνση για να δημιουργηθούν οι σωστοί μαγνητικοί πόλοι.

Ο δρομέας και ο στάτης αποτελούνται από σιδηρομαγνητικό υλικό, το οποίο έχει καμπύλη μαγνητικής επαγωγής προς έντασης μαγνητικού πεδίου (B/H) και χαρακτηριστική καμπύλη απωλειών σιδήρου, όπως φαίνεται στα σχήματα 5.10-5.11.

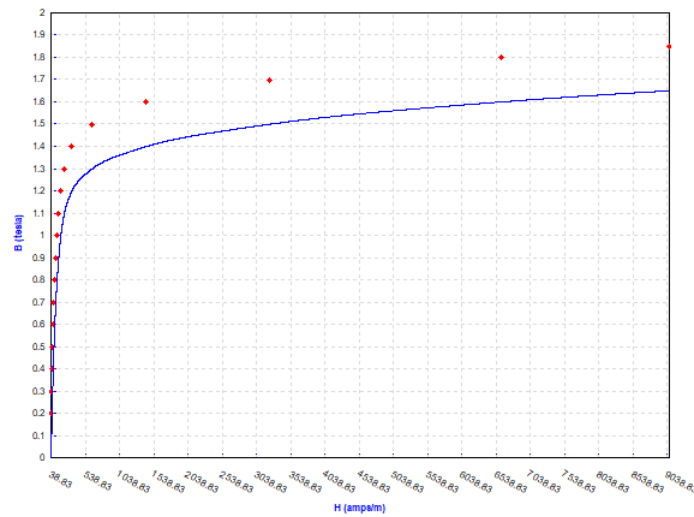


Figure 5.10: Χαρακτηριστική καμπύλη B/H του υλικού του στάτη και του δρομέα.

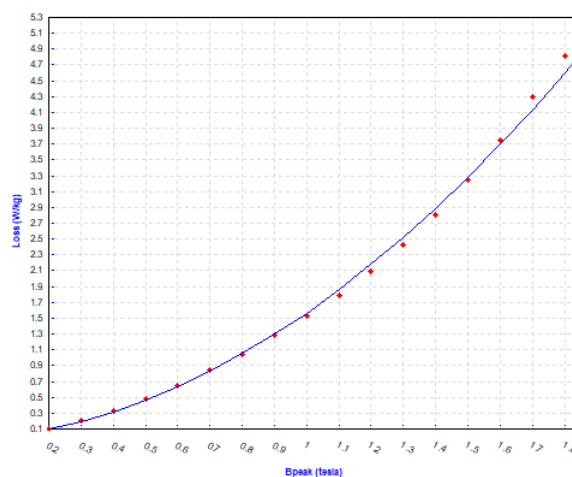


Figure 5.11: Χαρακτηριστική καμπύλη απωλειών σιδήρου του υλικού του στάτη και του δρομέα.

Τα πηνία τα οποία μοντελοποιούν τα τυλίγματα που τοποθετούνται στις αυλακώσεις του στάτη είναι κατασκευασμένα από χαλκό τύπου Copper:  $5.77e7$  Siemens/meter και τα φτιάχνουμε πατώντας απο το dropdown menu την επιλογή Model και στην συνέχεια επιλέγοντας το Make Simple Coil. Στα πηνία αυτά όταν κατασκευάστηκαν δόθηκε η κατάλληλη φορά έτσι ώστε να δημιουργηθούν οι τέσσερις μαγνητικοί πόλοι (2 ζεύγη). Η πληροφορία ότι ο κινητήρας είναι συνδεδεμένος σε αστέρα αναφέρεται στη συνδεσμολογία των πηνίων των τριών φάσεων, με την κάθε φάση ξεχωριστά να έχει συνδεδεμένα σε σειρά τα πηνία τα οποία την αποτελούν και την αντίσταση φάσης, η οποία έχει τιμή  $R_{phase} = 9.9 \Omega$ .

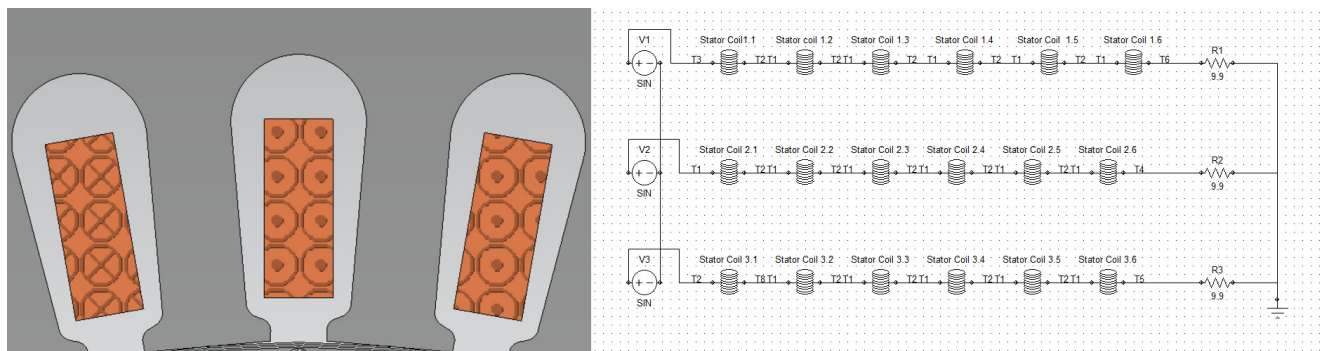


Figure 5.12: Πηνία στάτη (αριστερά), Κυκλωματική συνδεση πηνίων στάτη (δεξιά).

Οι μπάρες του δρομέα είναι κατασκευασμένες από αλουμίνιο τύπου Aluminum:  $3.8e7$  Siemens/meter και μοντελοποιούνται ως συμπαγή πηνία στο περιβάλλον του SimCenter MAGNET τα οποία είναι βραχυκυκλωμένα μεταξύ τους.

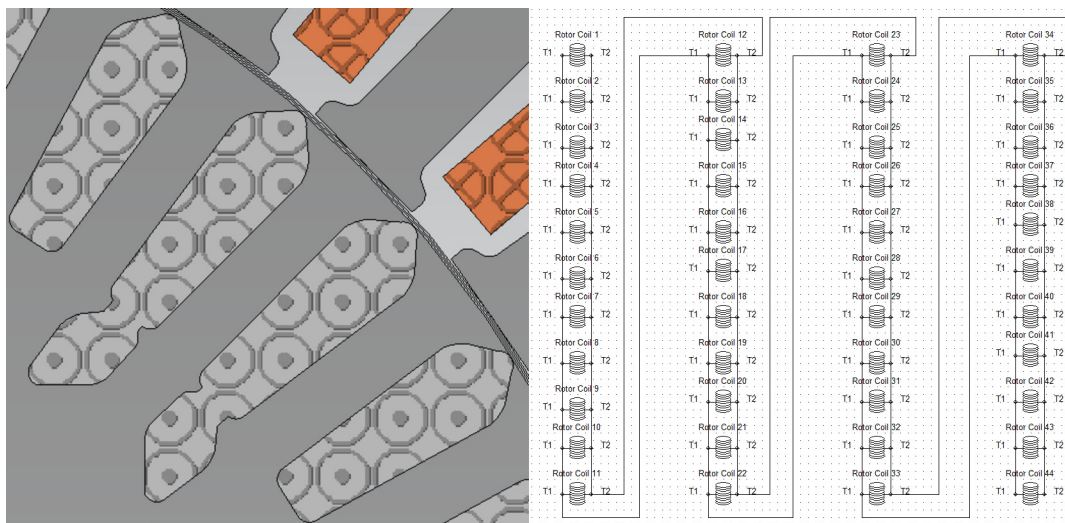


Figure 5.13: Μπάρες δρομέα (αριστερά), Κυκλωματική συνδεση μπαρών δρομέα (δεξιά).

Τα παραπάνω κυκλώματα δημιουργήθηκαν διαλέγοντας από το dropdown menu την επιλογή Window και επιλέγοντας New Circuit Window. Στη συνέχεια, τοποθετώντας τα πηνία που έχουν δημιουργηθεί στις κατάλληλες θέσεις και χρησιμοποιώντας τα στοιχεία που δίνει η επιλογή Circuit από το dropdown menu ολοκληρώσαμε τα κυκλώματα.

Η τροφοδοσία των πηνίων της κάθε φάσης γίνεται από πηγές τάσης ημιτονοειδούς ρεύματος 400 V και αφού έχουμε συνδεσμολογία αστέρα υπολογίζουμε την RMS τιμή της φασικής τάσης :

$$V_{phase} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230.94 \text{ V}$$

Ακολουθώς βρίσκουμε την μέγιστη (peak) τιμή της φασικής τάσης για να την βάλουμε στις πηγές :

$$V_{peak} = 400 * \sqrt{2} = 326.598 \text{ V}$$

Οι πηγές έχουν συχνότητα 50 Hz και διαφορά φάσης μεταξύ τους 120°, όπως βλέπουμε και στο σχήμα 5.14.

		Value	Default			Value	Default			Value	Default
$V_o$		0		$V_o$		0		$V_o$		0	
$V_a$		326.598		$V_a$		326.598		$V_a$		326.598	
F (Transient only)	<input checked="" type="checkbox"/>	50	50 (Hz)	F (Transient only)	<input checked="" type="checkbox"/>	50	50 (Hz)	F (Transient only)	<input checked="" type="checkbox"/>	50	50 (Hz)
$T_d$	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	$T_d$	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	$T_d$	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0
$\theta$	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	$\theta$	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	$\theta$	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0
$\psi$	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	$\psi$	<input checked="" type="checkbox"/>	120	0	$\psi$	<input checked="" type="checkbox"/>	-120	0

Figure 5.14: Ιδιότητες πηγής τάσης V1 (αριστερά), Ιδιότητες πηγής τάσης V2 (κέντρο), Ιδιότητες πηγής τάσης V3 (δεξιά).

Η συνδεσμολογία καθώς και η φορά των πηνίων της κάθε φάσης στον στάτη έγινε με βάση τα σχήματα 5.15-5.18. Η κάθε φάση αποτελείται από 6 πηνία και το κάθε ένα από αυτά μοντελοποιεί ένα τύλιγμα για το "πήγαινε" και ένα τύλιγμα για το "έλα". Παραδείγματος χάρη, για την φάση A έχουμε τα εξής : ένα πηνίο με όνομα Stator Coil 1.1 όπου αποτελείται από τα τυλίγματα στην αυλάκωση 1 με φορά προς τα έξω και τα τυλίγματα στην αυλάκωση 10 με φορά προς τα μέσα, ένα πηνίο με όνομα Stator Coil 1.2 όπου αποτελείται από τα τυλίγματα στην αυλάκωση 2 με φορά προς τα έξω και τα τυλίγματα στην αυλάκωση 9 με φορά προς τα μέσα. Ένα πηνίο με όνομα Stator Coil 1.3 όπου αποτελείται από τα τυλίγματα στην αυλάκωση 18 με φορά προς τα έξω και τα τυλίγματα στην αυλάκωση 11 με φορά προς τα μέσα, ένα πηνίο με όνομα Stator Coil 1.4 όπου αποτελείται από τα τυλίγματα στην αυλάκωση 19 με φορά προς τα έξω και τα τυλίγματα στην αυλάκωση 28 με φορά προς τα μέσα. Ένα πηνίο με όνομα Stator Coil 1.5 όπου αποτελείται από τα τυλίγματα στην αυλάκωση 20 με φορά προς τα έξω και τα τυλίγματα στην αυλάκωση 27 με φορά προς τα μέσα. Τέλος, έχουμε ένα πηνίο με όνομα Stator Coil 1.6 όπου αποτελείται από τα τυλίγματα στην αυλάκωση 36 με φορά προς τα έξω και τα τυλίγματα στην αυλάκωση 29 με φορά προς τα μέσα. Ομοίως, σχεδιάζονται και οι φάσεις B και C.



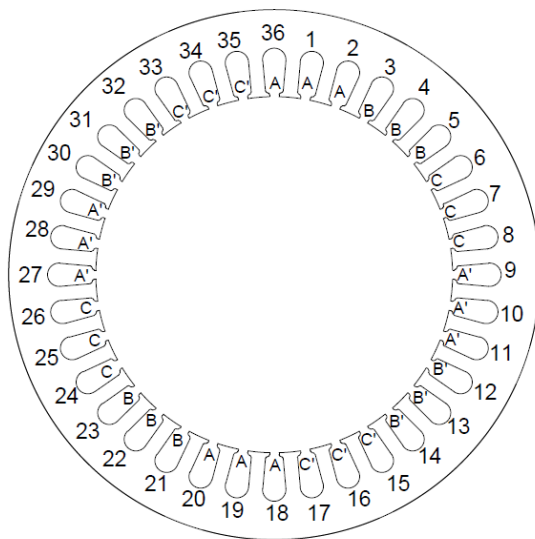


Figure 5.15: αρίθμηση αυλακώσεων στάτη.

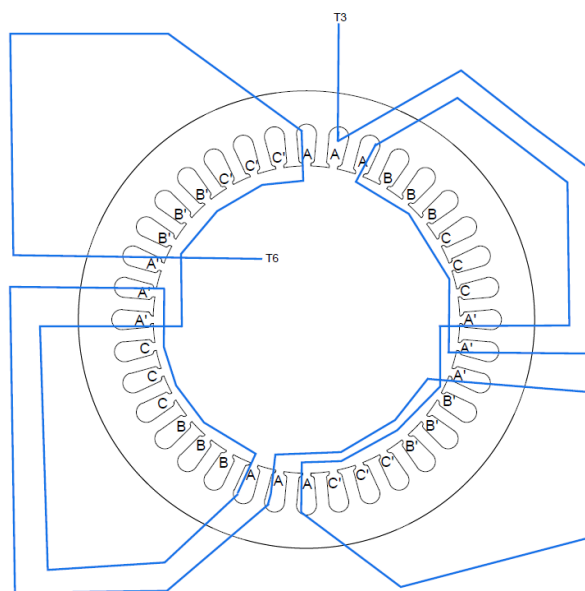


Figure 5.16: συνδεσμολογία πηνίων φάσης Α.



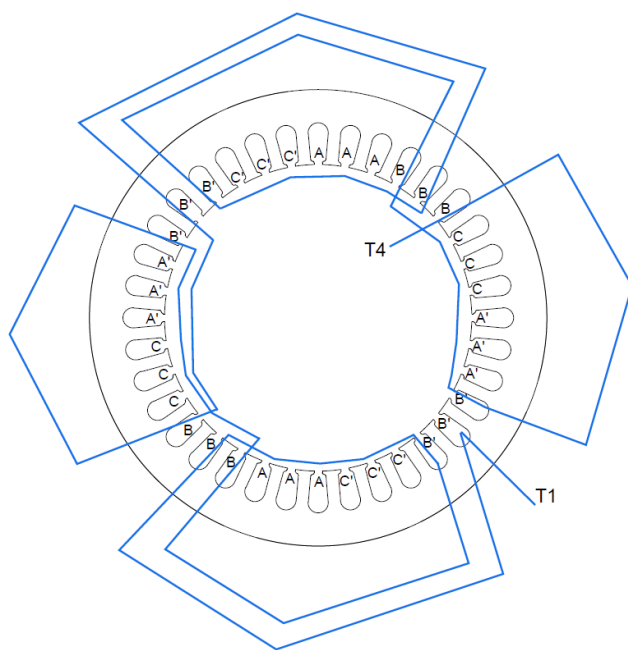


Figure 5.17: συνδεσμολογία πηνίων φάσης B.

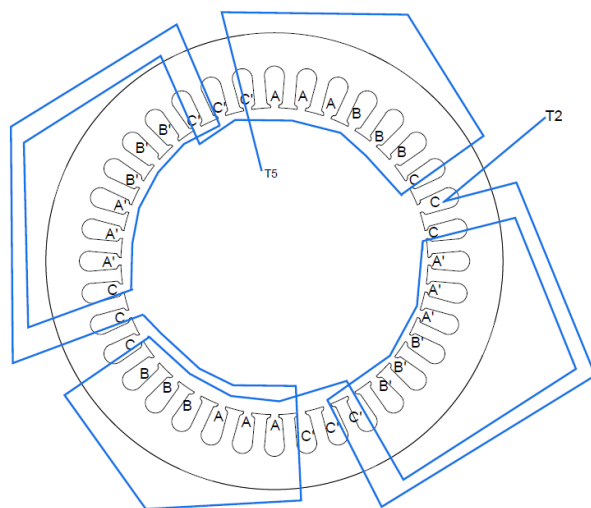


Figure 5.18: συνδεσμολογία πηνίων φάσης C.

Έπειτα συμπλήρωσαμε τον άξονα του κινητήρα με αέρα, όπως και ένα περίβλημα γύρω από τον κινητήρα διαμέτρου 92 mm το οποίο καθορίζει τις οριακές συνθήκες. Το διάκενο το οποίο χωρίζεται σε τέσσερα επίπεδα για να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων αποτελείται από τα δύο εξωτερικά επίπεδα που έχουν "εικονικό" αέρα και τα δύο εσωτερικά που έχουν αέρα.

Για την καταγραφή της μαγνητικής ροής τοποθέτησαμε πέντε αισθητήρες γύρω από τον κινητήρα, έτσι ώστε να έχουν τρεις από αυτούς μεταξύ τους 120 ηλεκτρικές μοίρες διαφορά και άλλοι τρεις μεταξύ τους 120 μηχανικές μοίρες διαφορά. Οι αισθητήρες μοντελοποιούνται από ένα ζεύγος πηνίων αντίθετης φοράς το οποίο αποτελείται από 1000 σπείρες και είναι συνδεδεμένο με μια αντίσταση που έχει τιμή  $R = 10^{12} \Omega$ .

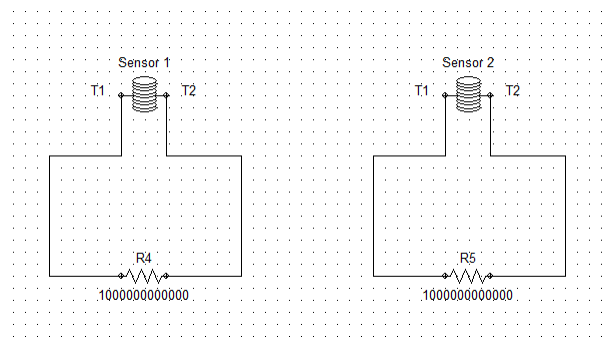


Figure 5.19: Κυκλωματική Σύνδεση Αισθητήρων.

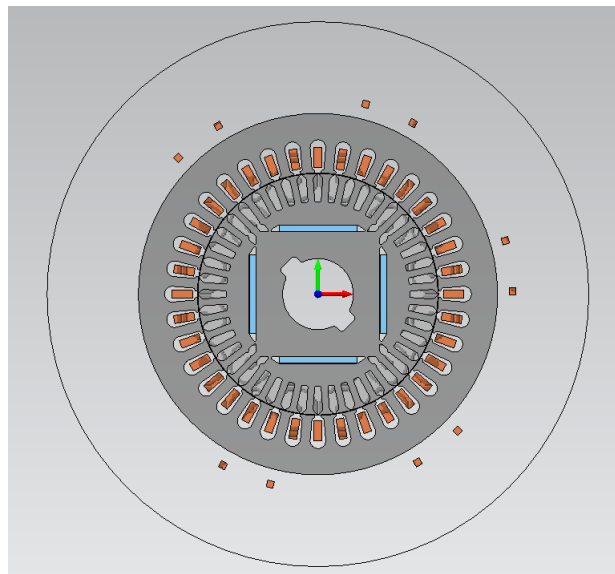


Figure 5.20: Ολοκληρωμένο Μοντέλο Κινητήρα.

Το τελευταίο βήμα που μένει για να μπορέσουμε να κάνουμε τις προσομοιώσεις στο περιβάλλον του SimCenter MAGNET είναι να φτιάξουμε το Motion Component, δηλαδή να δηλώσουμε ποια τμήματα του κινητήρα κινούνται. Το παραπάνω γίνεται επιλέγοντας τον δρομέα, τα δύο πιο κοντινά στο δρομέα επίπεδα του διάκενου, τους μαγνήτες, τις μπάρες του δρομέα και τον άξονα και έπειτα από το dropdown Menu επιλέγουμε το Model και πατάμε το Make Motion Component.

Τέλος εισάγουμε τις παραμέτρους της προσομοίωσης (αρχή,τέλος,βήμα) πατώντας από το dropdown Menu την επιλογή solve και επιλέγουμε από το παράθυρο που θα ανοίξει το Transient Options. Όταν είμαστε έτοιμοι ξεκινάμε την προσομοίωση επιλέγοντας από το solve το Transient 2D with Motion.

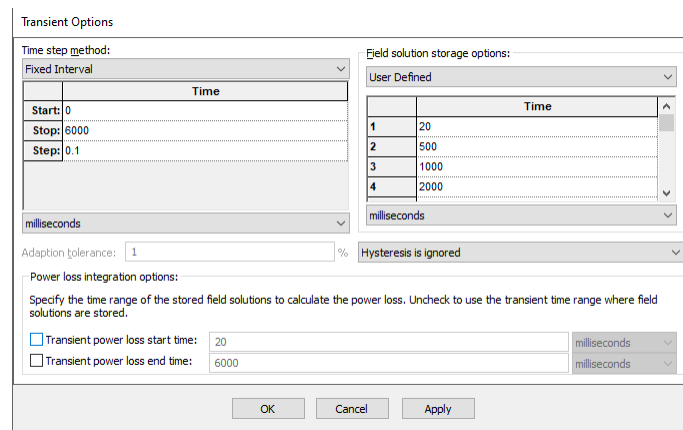


Figure 5.21: Παράθυρο εισαγωγής παραμέτρων προσομοίωσης.

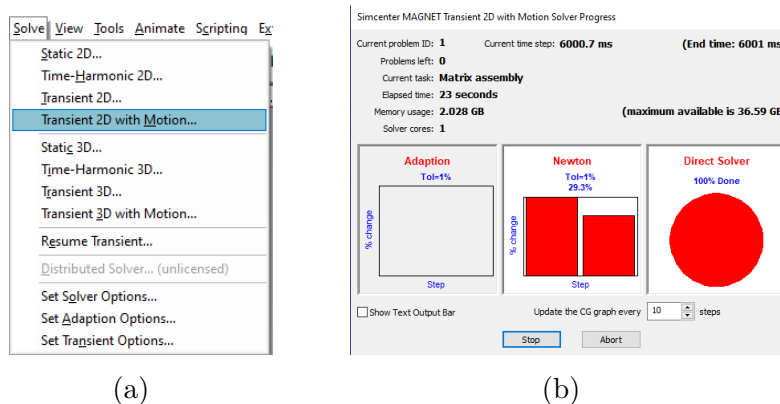


Figure 5.22: a) επιλογή έναρξης προσομοίωσης b) παράθυρο προσομοίωσης .

## 6 Κεφάλαιο: Μοντελοποίηση Σφάλματος και Ανάλυση Αποτελεσμάτων

---

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μοντελοποίηση και ανάλυση των τεσσάρων περιπτώσεων σφάλματος στον κινητήρα, και σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με τα αποτελέσματα του κινητήρα όταν λειτουργεί κάτω από υγιείς συνθήκες. Οι προσομοιώσεις έχουν γίνει με ονομαστικό φορτίο 4.78 Nm, έχουν διάρκεια 6 seconds και προχωρούν με βήμα 0.1 millisecond, ενώ οι περιπτώσεις των σφαλμάτων είναι :

1. βραχυκύκλωμα μίας σπείρας με μία σπείρα και αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$
2. βραχυκύκλωμα μίας σπείρας με μία σπείρα και αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$
3. βραχυκύκλωμα δύο σπείρων με δύο σπείρες και αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$
4. βραχυκύκλωμα δύο σπείρων με δύο σπείρες και αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$

### 6.1 Μοντελοποίηση του Σφάλματος

Για να φτιάξουμε το σφάλμα του εσωτερικού βραχυκυκλώματος χώρισαμε το ορθογώνιο που μοντελοποιεί το πηνίο στο εσωτερικό της αυλάκωσης του στάτη σε δύο κομμάτια. Το πρώτο και μεγαλύτερο κομμάτι είναι το υγιές τμήμα των τυλιγμάτων και αποτελείται από 61 ή 62 σπείρες, ενώ το δεύτερο αποτελείται από 1 ή 2 σπείρες και είναι αυτές που λαμβάνουν μέρος στο βραχυκύκλωμα.

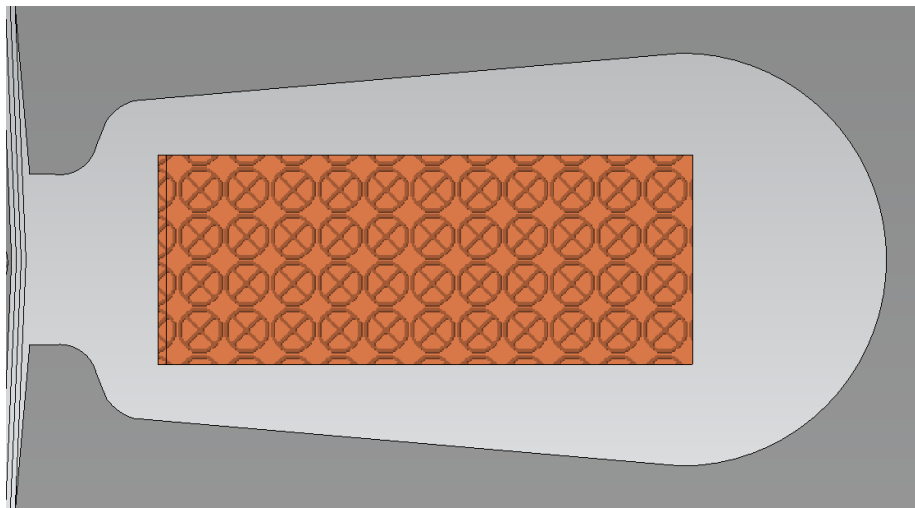


Figure 6.1: Διαχωρισμός τυλιγμάτων πηνίου.

Έπειτα, διαμόρφωσαμε την κυκλωματική αναπαράσταση του στάτη, συνδέοντας και πάλι σε σειρά όλα τα πηνία της φάσης με τη διαφορά ότι έχουμε φτιάξει και ένα πηνίο που συνδέει τις σπείρες που βραχυκυκλώνονται από το πηνίο στην αυλάκωση 2 με τις σπείρες που βραχυκυκλώνονται από το πηνίο στην αυλάκωση 10. Σε σειρά με το πηνίο που μοντελοποιεί το βραχυκύκλωμα συνδέουμε και μια αντίσταση που αντιπροσωπεύει το ποσοστό από την αντίσταση της φάσης που αντιστοιχεί στις σπείρες που συμμετέχουν στο βραχυκύκλωμα και παράλληλα τους συνδέουμε την αντίσταση σφάλματος ( $R_f = 0.1\Omega$  ή  $R_f = 0.5\Omega$ ).

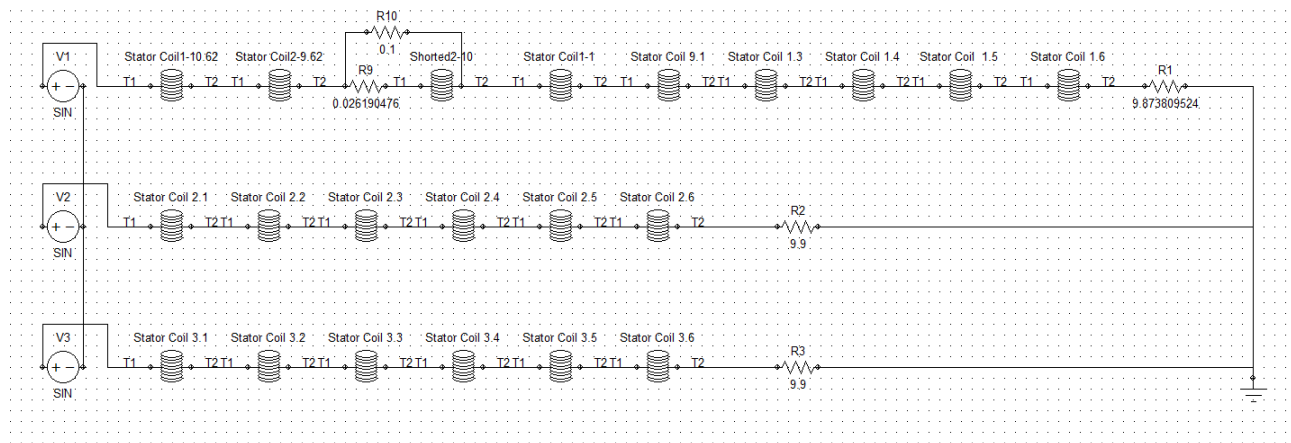


Figure 6.2: Κυκλωματική σύνδεση στάτη με βραχυκύκλωμα μίας σπείρας με μία σπείρας και αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

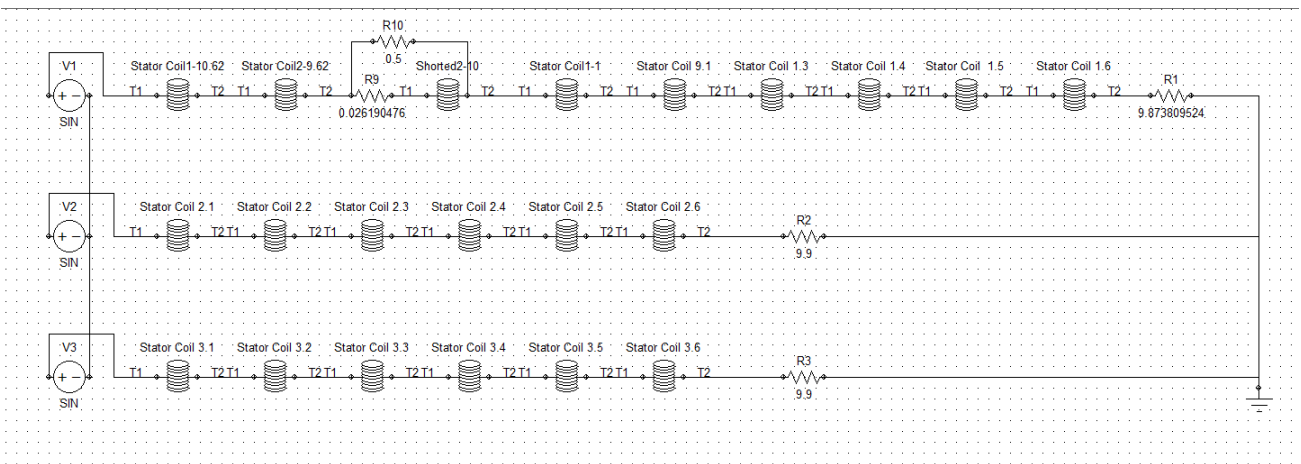


Figure 6.3: Κυκλωματική σύνδεση στάτη με βραχυκύκλωμα μίας σπείρας με μία σπείρας και αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .

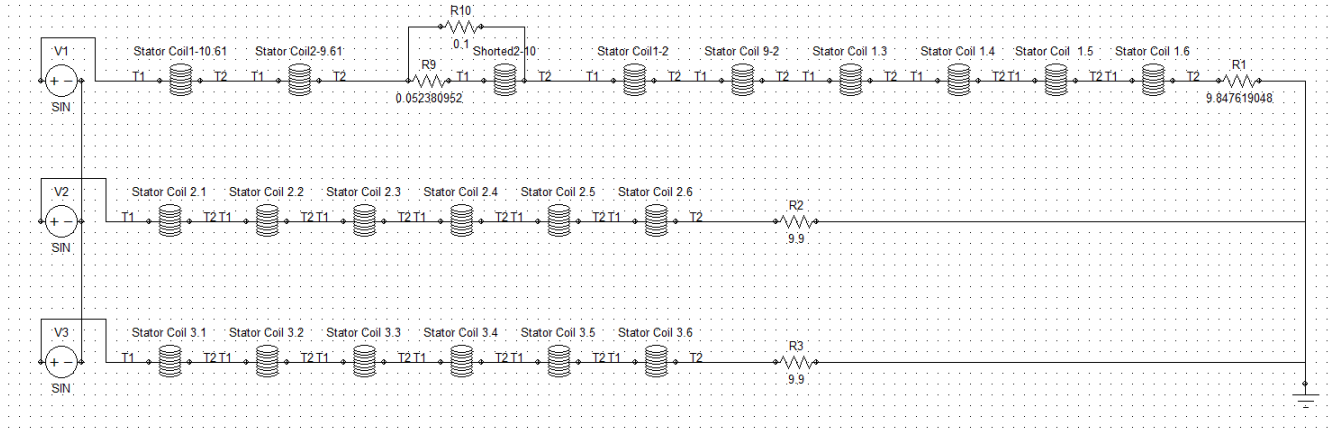


Figure 6.4: Κυκλωματική σύνδεση στάτη με βραχυκύκλωμα δύο σπειρών με δύο σπείρες και αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

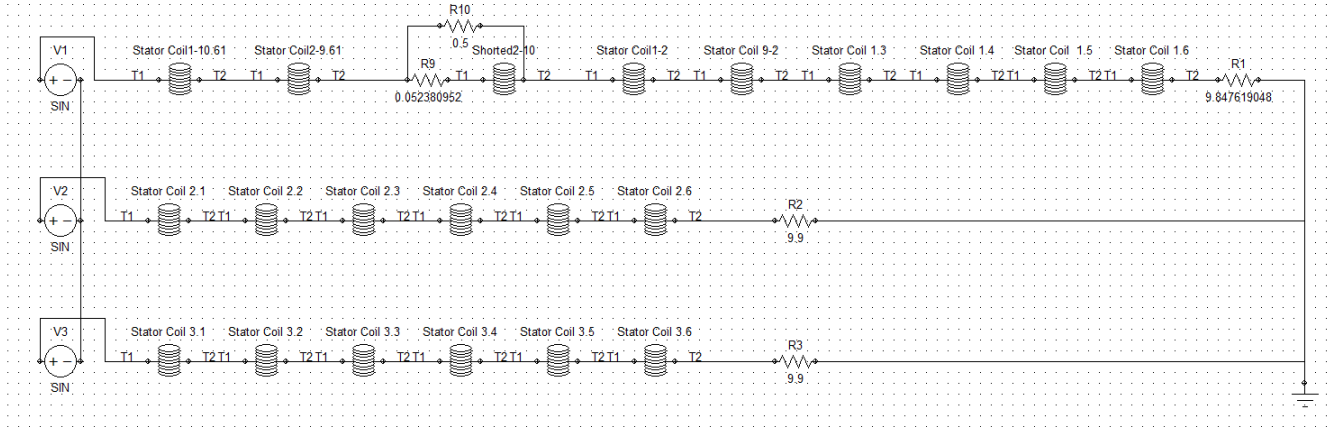


Figure 6.5: Κυκλωματική σύνδεση στάτη με βραχυκύκλωμα δύο σπειρών με δύο σπείρες και αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .

## 6.2 Χαρακτηριστικά Υγιούς Κατάστασης Κινητήρα

Στα παρακάτω σχήματα αποτυπώνεται η κατανομή της μαγνητικής ροής στην εκκίνηση και στη μόνιμη κατάσταση κατά την υγιή περίπτωση λειτουργίας του κινητήρα. Παρατηρείται ότι στη μόνιμη κατάσταση η μαγνητική ροή κατανέμεται ομοιόμορφα και συμμετρικά στο χώρο, σχηματίζοντας έτσι τους τέσσερις μαγνητικούς πόλους.

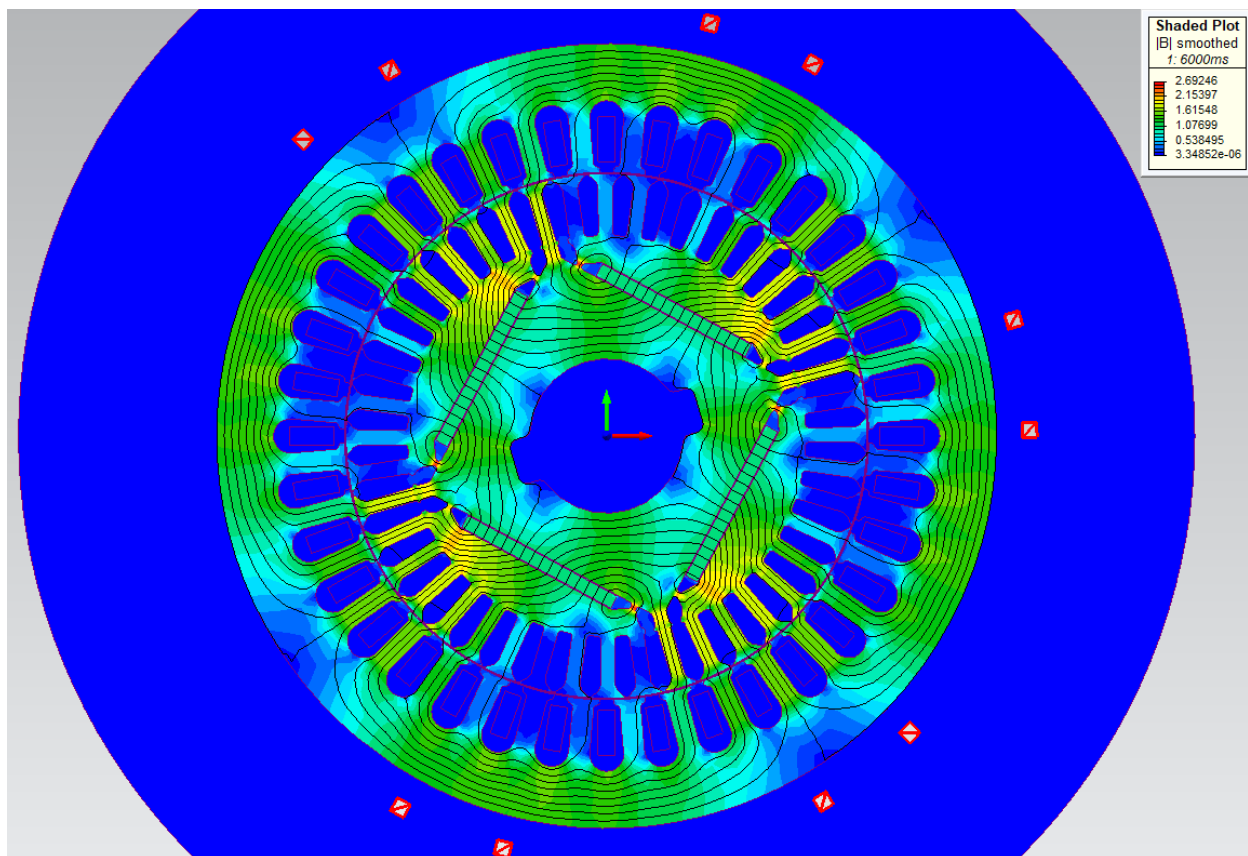


Figure 6.6: Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής σε υγιή λειτουργία κατά την μόνιμη κατάσταση.

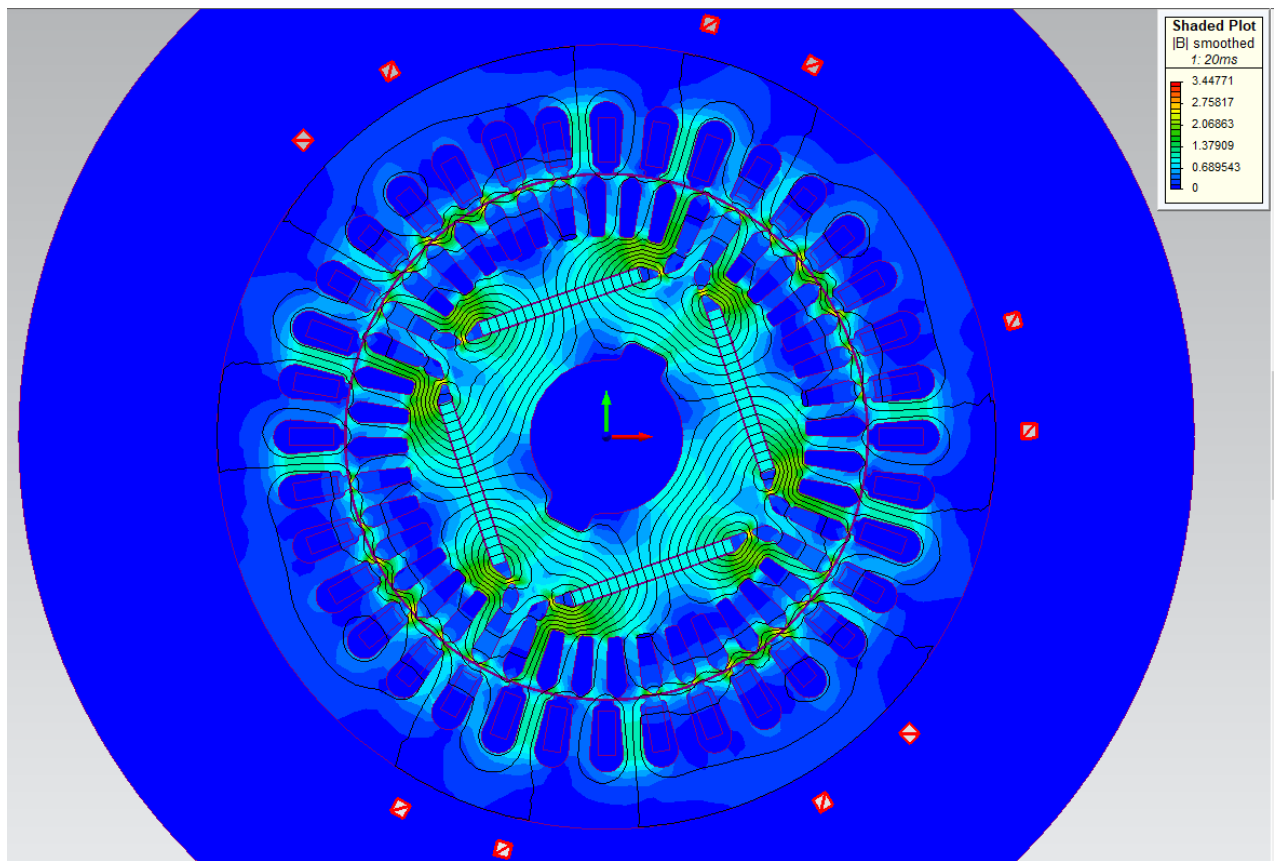


Figure 6.7: Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής σε υγιή λειτουργία κατά την εκκίνηση.



Στα παρακάτω σχήματα γίνεται απεικόνιση της κατανομής πυκνότητας του ρεύματος και παρατηρούνται υψηλότερες τιμές ρεύματος κατά την εκκίνηση σε σχέση με την μόνιμη κατάσταση, όπως ήταν αναμενόμενο. Μια ακόμα σημαντική πληροφορία που μας δίνεται από τα παρακάτω σχήματα είναι ότι στις μπάρες του δρομέα εμφανίζεται το επιδερμικό φαινόμενο.

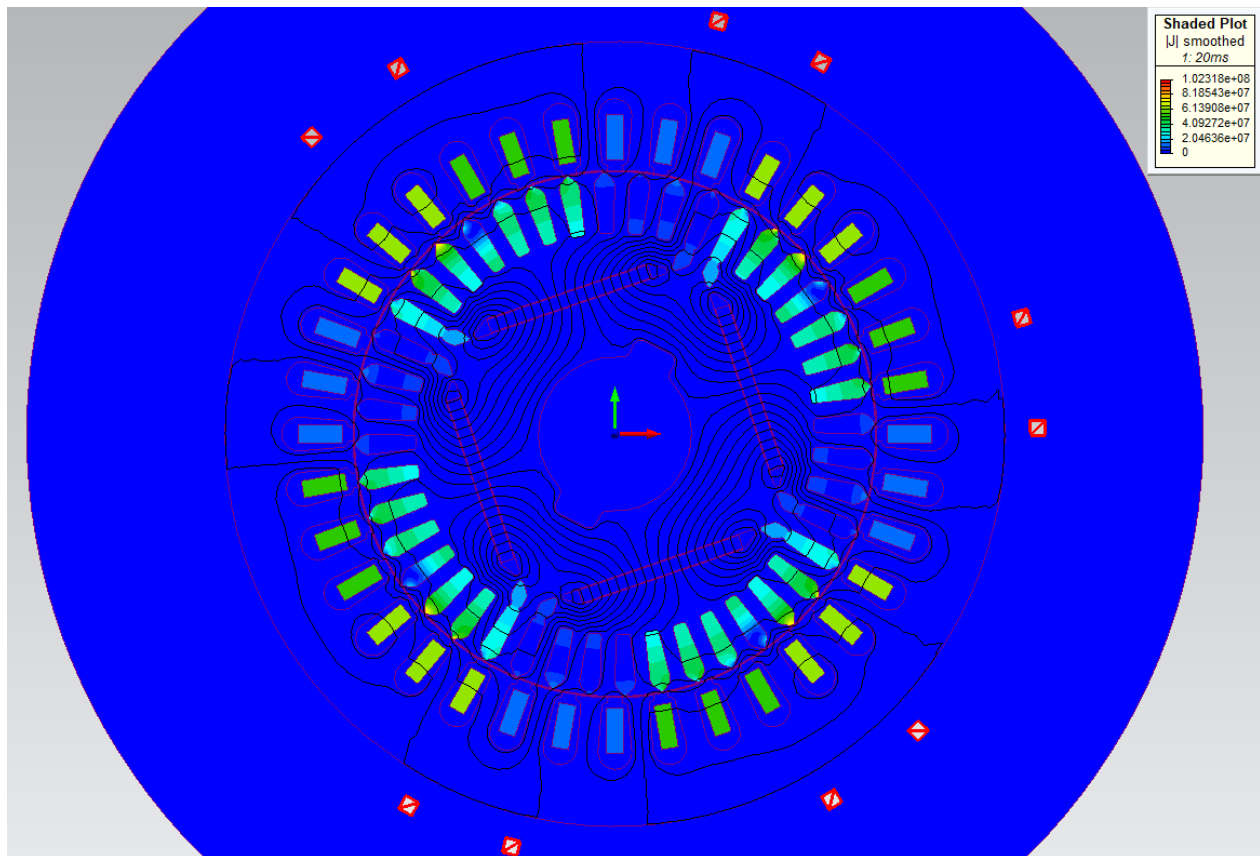


Figure 6.8: Χωρική κατανομή της πυκνότητας ρεύματος σε υγιή λειτουργία κατά την εκκίνηση.

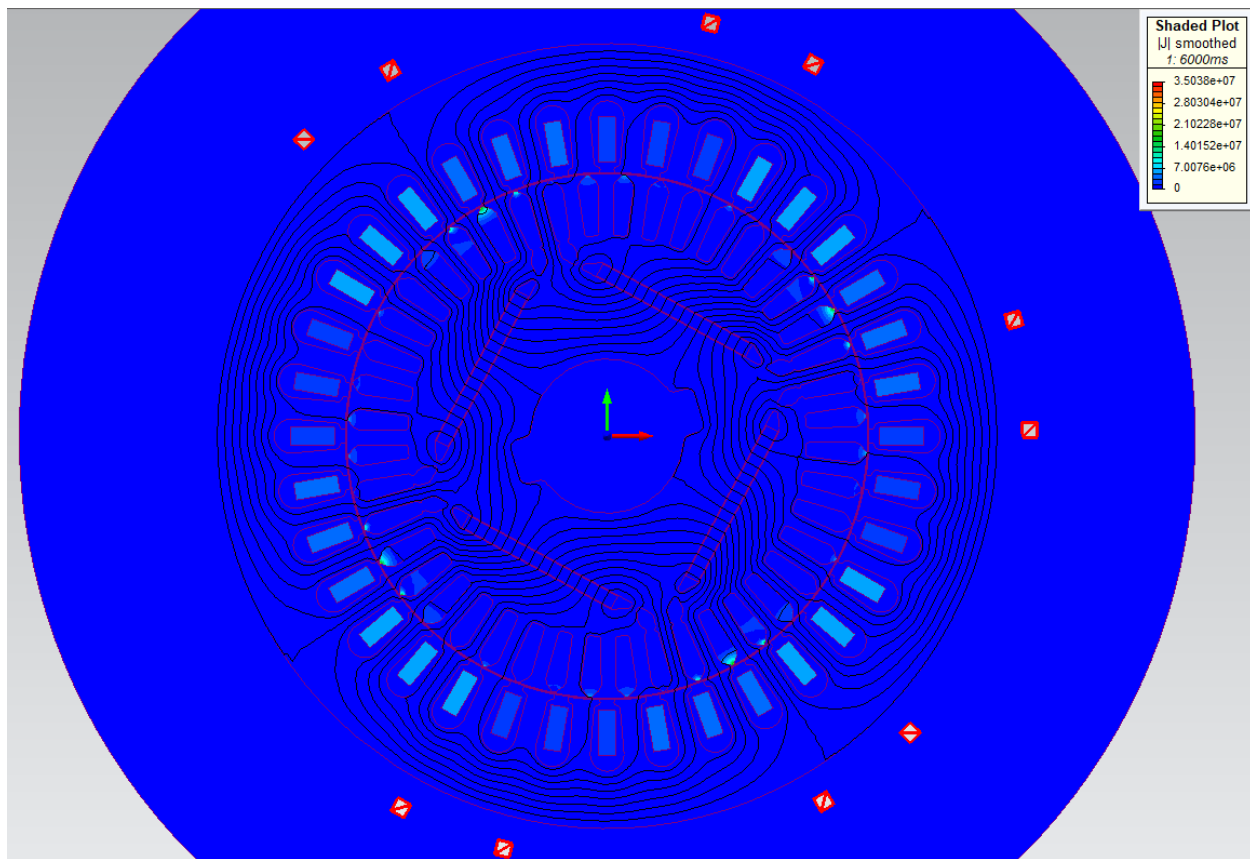


Figure 6.9: Χωρική κατανομή της πυκνότητας ρεύματος σε υγιή λειτουργία κατά την μόνιμη κατάσταση.

### 6.3 Χαρακτηριστικά Σφαλμάτων

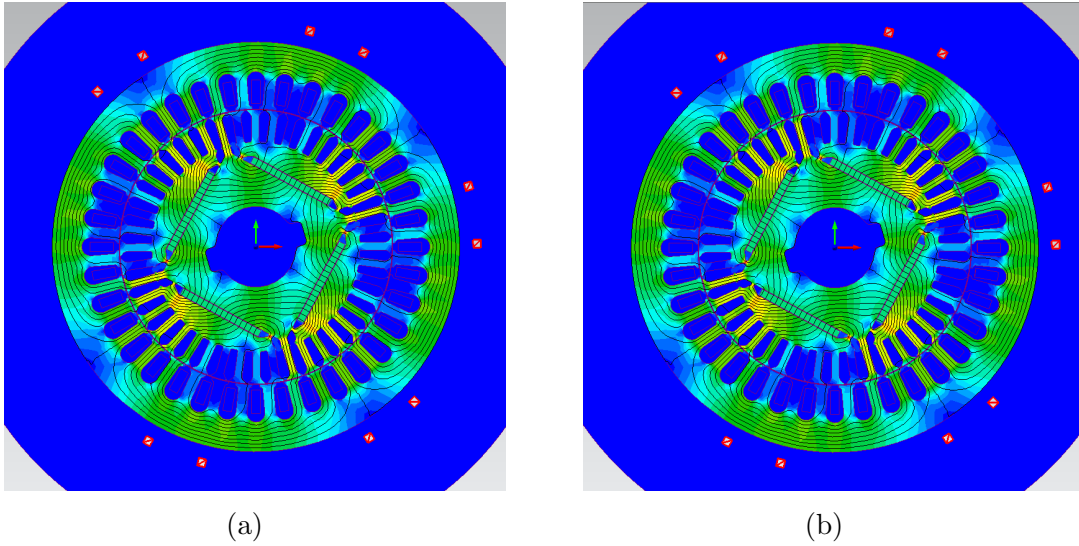


Figure 6.10: a) Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής σε υγιή λειτουργία b) Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής στην περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$  .

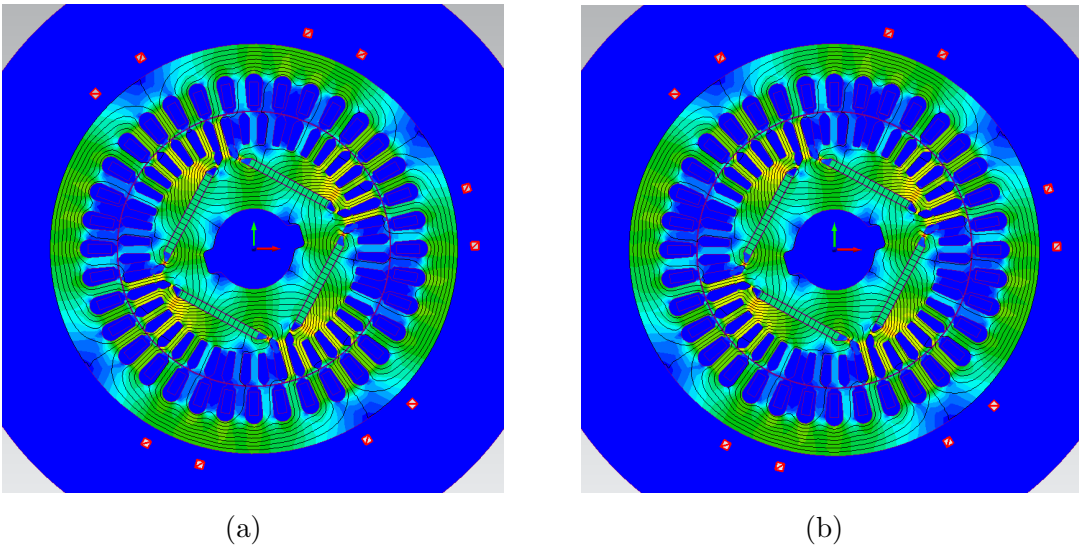
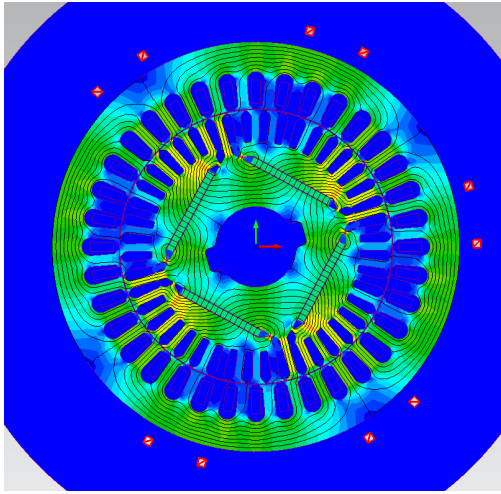
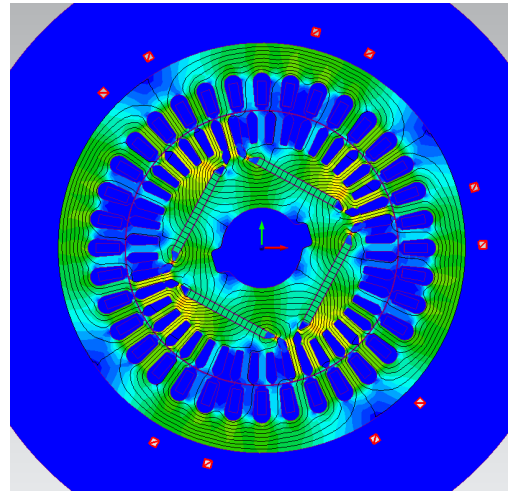


Figure 6.11: a) Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής σε υγιή λειτουργία b) Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής στην περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$  .

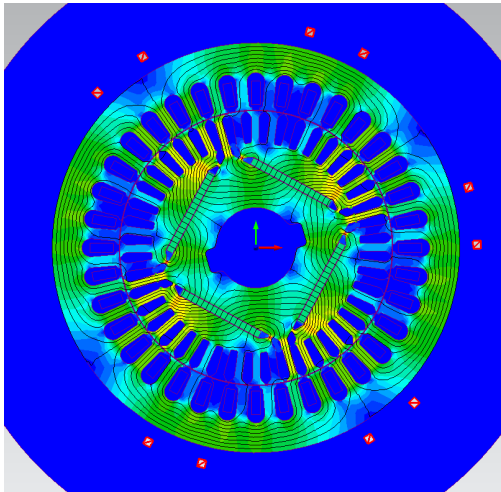


(a)

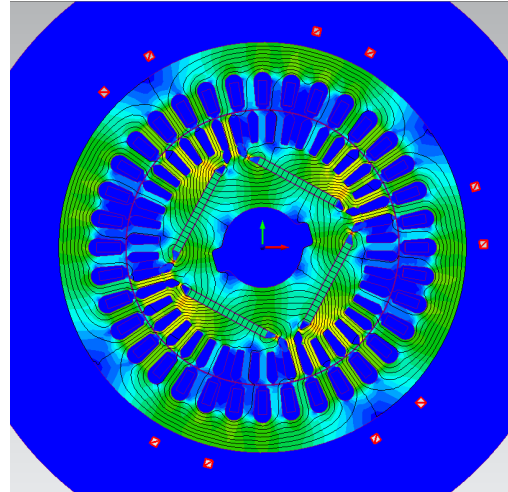


(b)

Figure 6.12: a) Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής σε υγιή λειτουργία b) Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής στην περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπείρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$  .



(a)

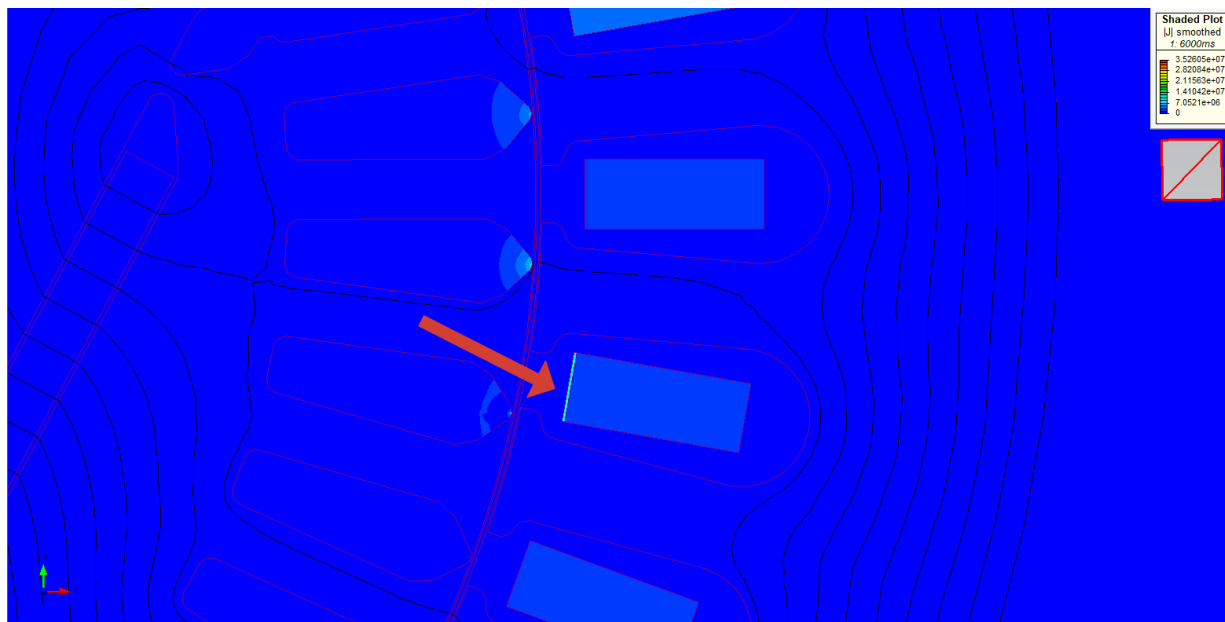


(b)

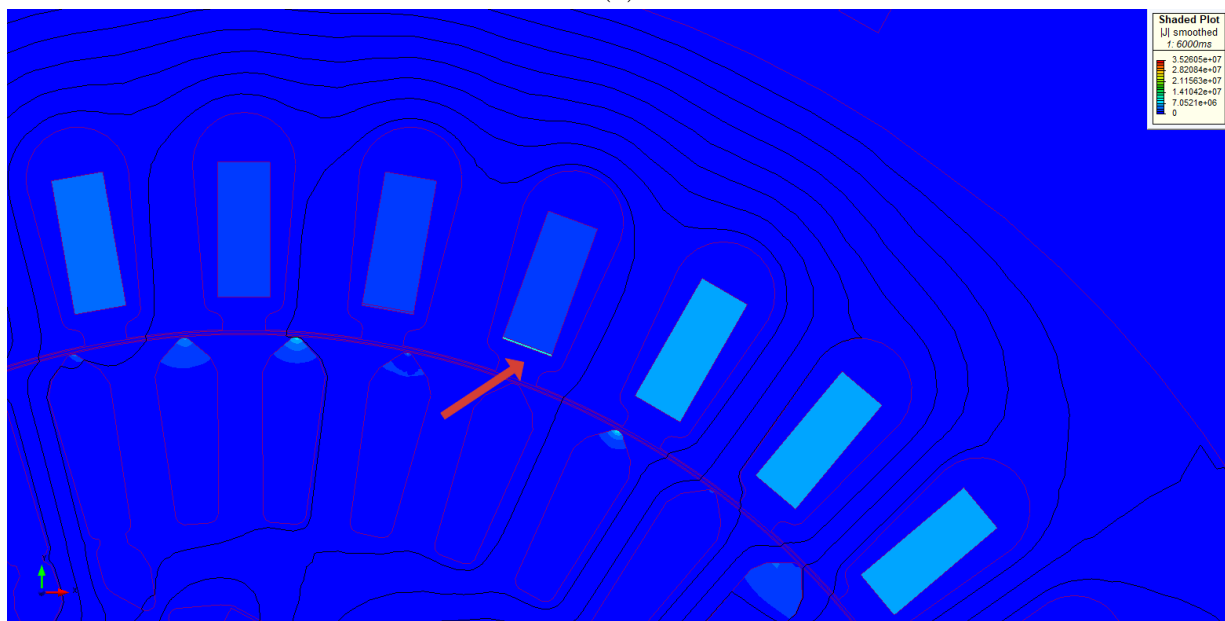
Figure 6.13: a) Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής σε υγιή λειτουργία b) Χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής στην περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπείρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$  .

Από τα διαγράμματα 6.10-6.13 παρατηρούμε ότι η χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής στις περιπτώσεις σφάλματος δεν παρουσιάζει εμφανείς διαφορές σε σύγκριση με τη χωρική κατανομή της μαγνητικής ροής στην κατάσταση υγιούς λειτουργίας.

Στη συνέχεια έγινε απεικόνιση της πυκνότητας ρεύματος των τεσσάρων περιπτώσεων σφάλματος, εστιάζοντας στις σπείρες που συνεισφέρουν στο εσωτερικό βραχυκύκλωμα. Από τα διαγράμματα αυτά εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι σπείρες που έχουν δημιουργήσει το εσωτερικό βραχυκύκλωμα έχουν διαφορετική τιμή ρεύματος σε σχέση με τις υπόλοιπες σπείρες του πηνίου που βρίσκεται μέσα στην αλάκωση.

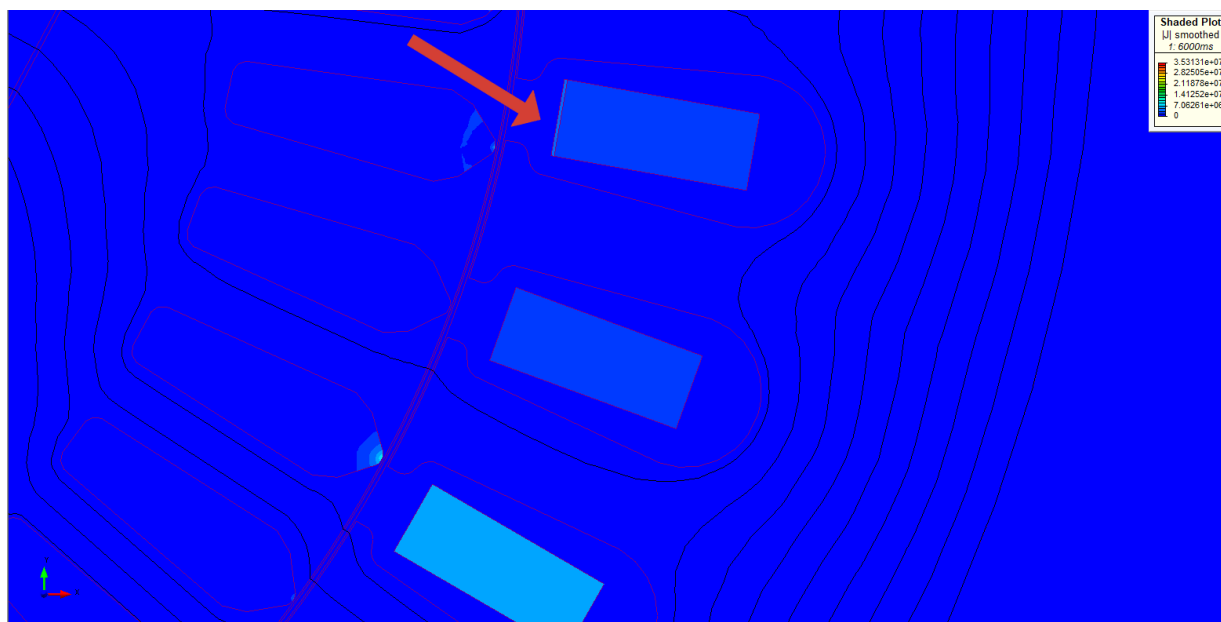


(a)

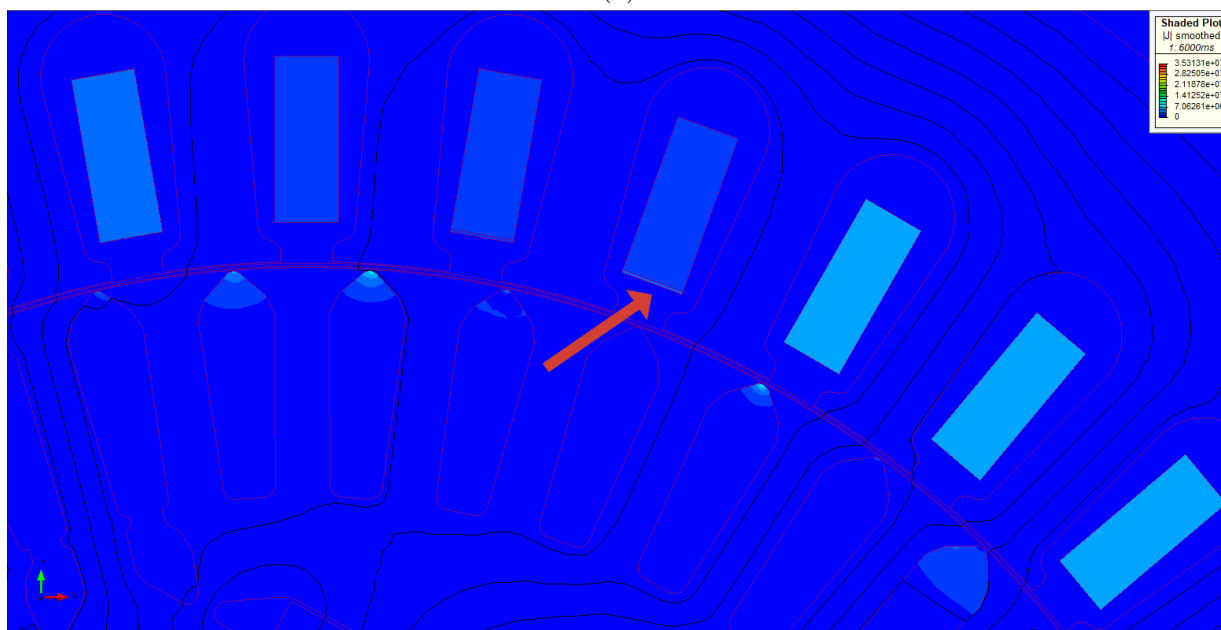


(b)

Figure 6.14: Πυκνότητα ρεύματος στις μία προς μία βραχυκυκλωμένες σπείρες με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$

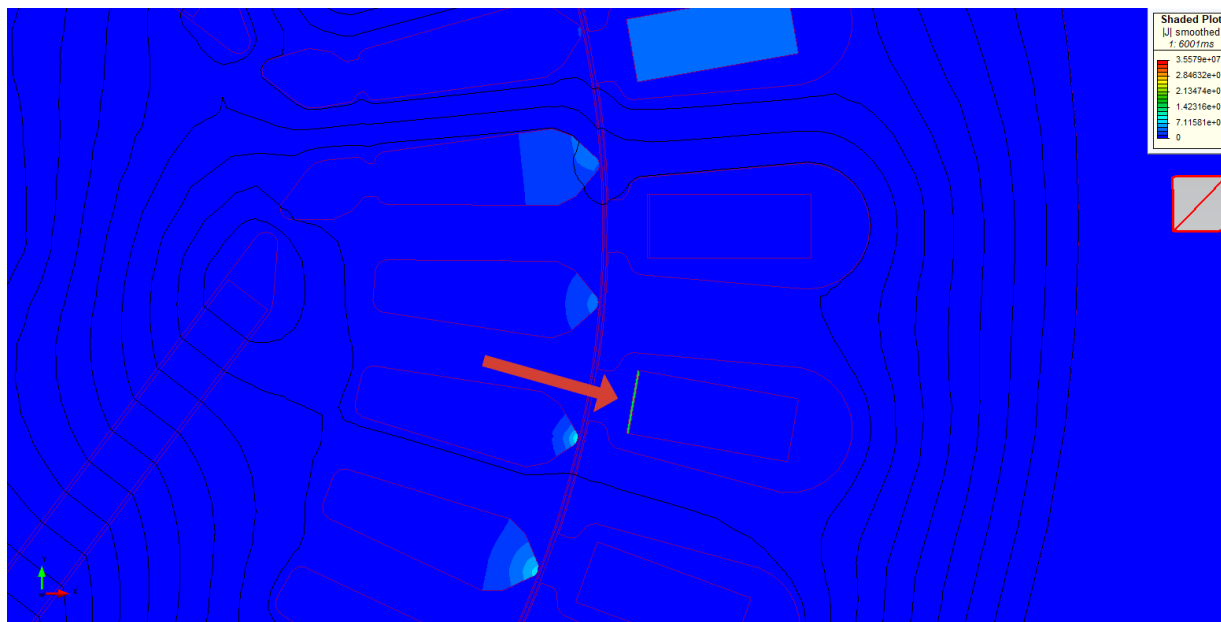


(a)

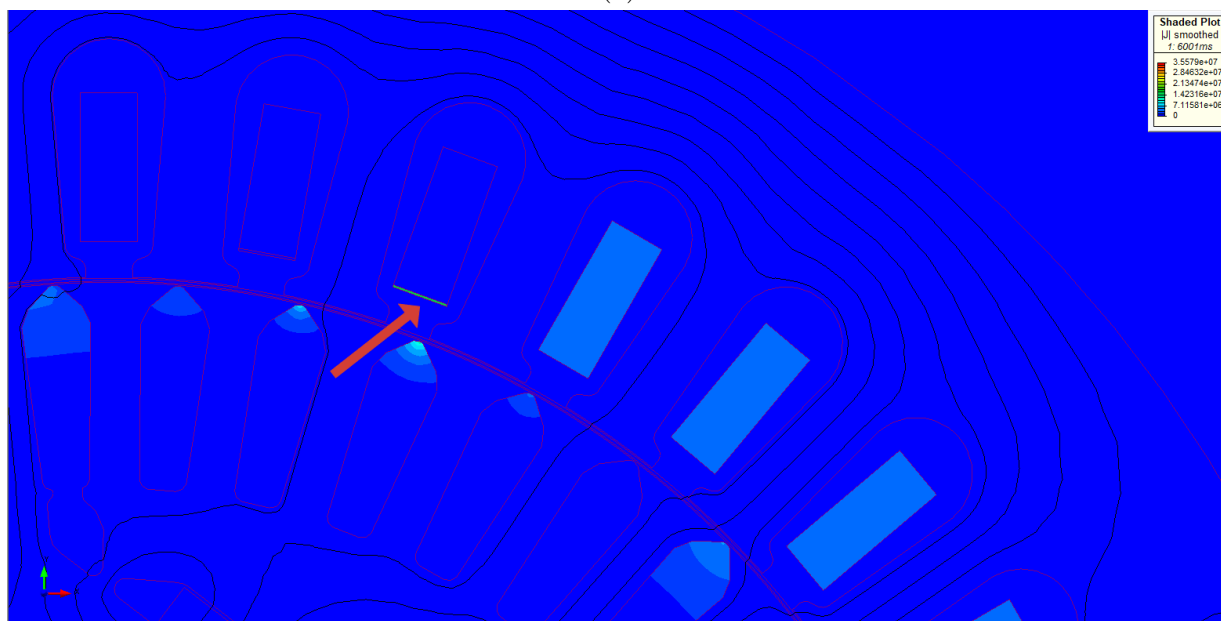


(b)

Figure 6.15: Πυκνότητα ρεύματος στις μία προς μία βραχυκυκλωμένες σπείρες με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$



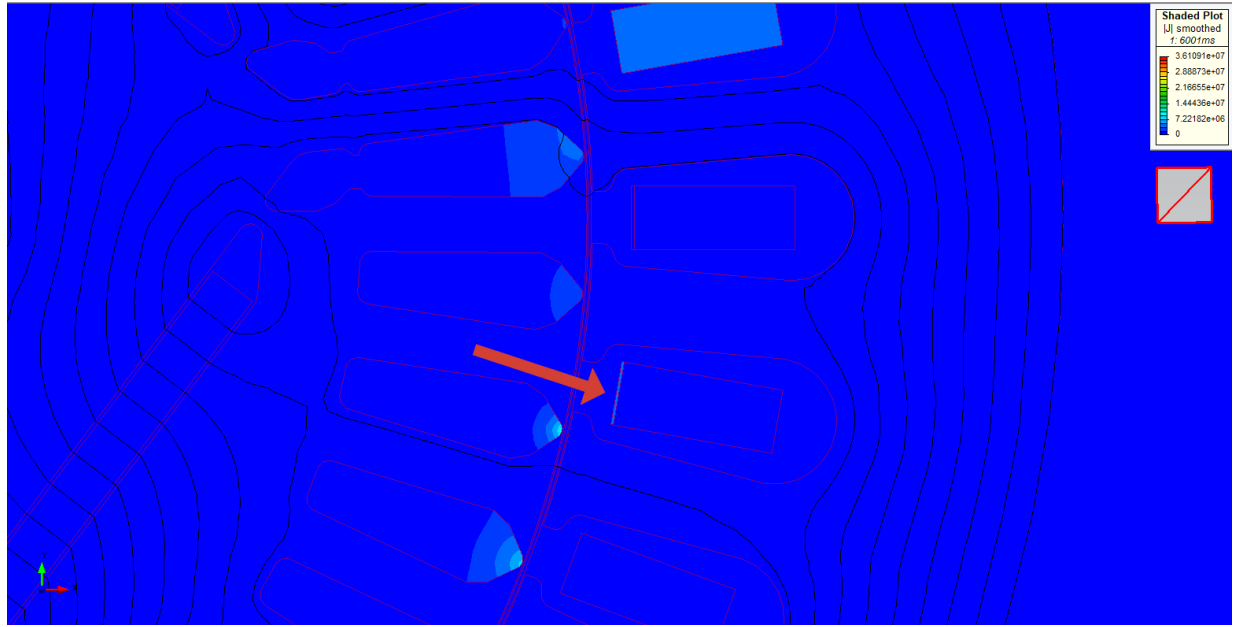
(a)



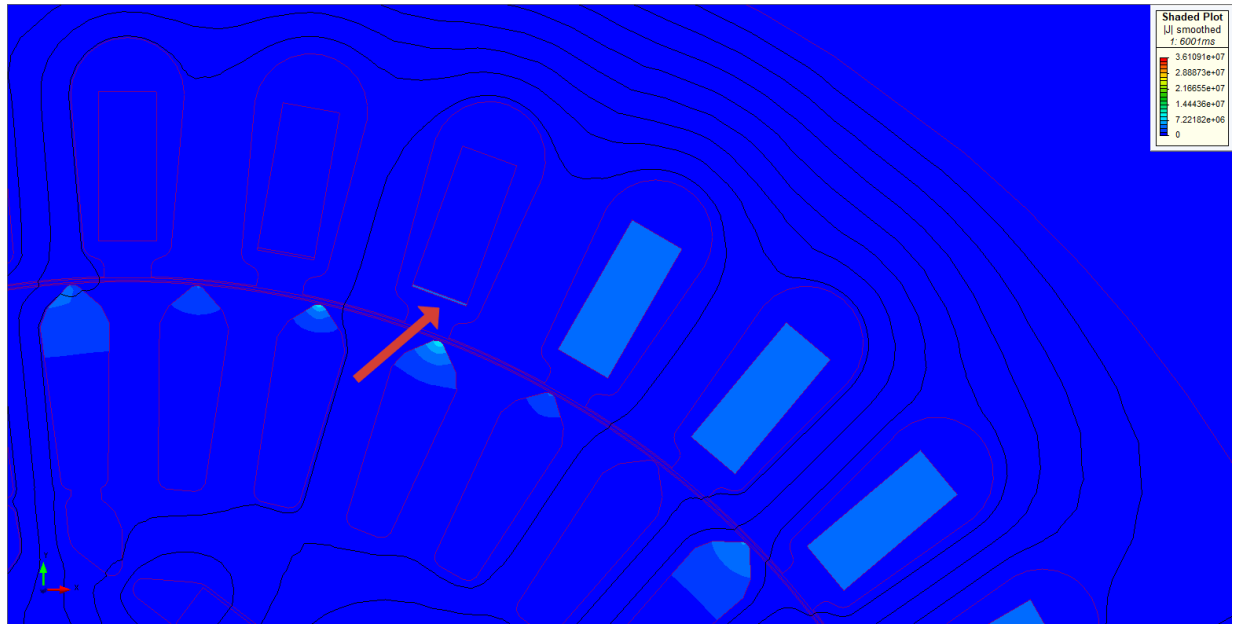
(b)

Figure 6.16: Πυκνότητα ρεύματος στις δύο προς δύο βραχυκυκλωμένες σπείρες με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$





(a)



(b)

Figure 6.17: Πυκνότητα ρεύματος στις δύο προς δύο βραχυκυκλωμένες σπείρες με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$

## 6.4 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Μετά την ολοκλήρωση των πέντε προσομοιώσεων (μία για την υγιή κατάσταση και τέσσερις για κάθε μία από τις περιπτώσεις σφάλματος), το επόμενο βήμα είναι να εξάγουμε από το παράθυρο των αποτελεσμάτων του simCenter MAGNET τα σήματα τα οποία θεωρούμε αναγκαία, έτσι ώστε να ξεκινήσουμε την ανάλυση τους στη Matlab.

### 6.4.1 Ανάλυση Ρεύματος Στάτη Στο Πεδίο Του Χρόνου

Όπως είδαμε και στα προηγούμενα κεφάλαια το ρεύμα του στάτη είναι ένα σήμα που μας δίνει πολλές πληροφορίες για την κατάσταση του κινητήρα. Έπομένως το πρώτο βήμα ήταν να εισάγουμε στη Matlab τους πίνακες των ρευμάτων από όλες τις προσομοιώσεις και να τα απεικονίσουμε στο πεδίο του χρόνου.

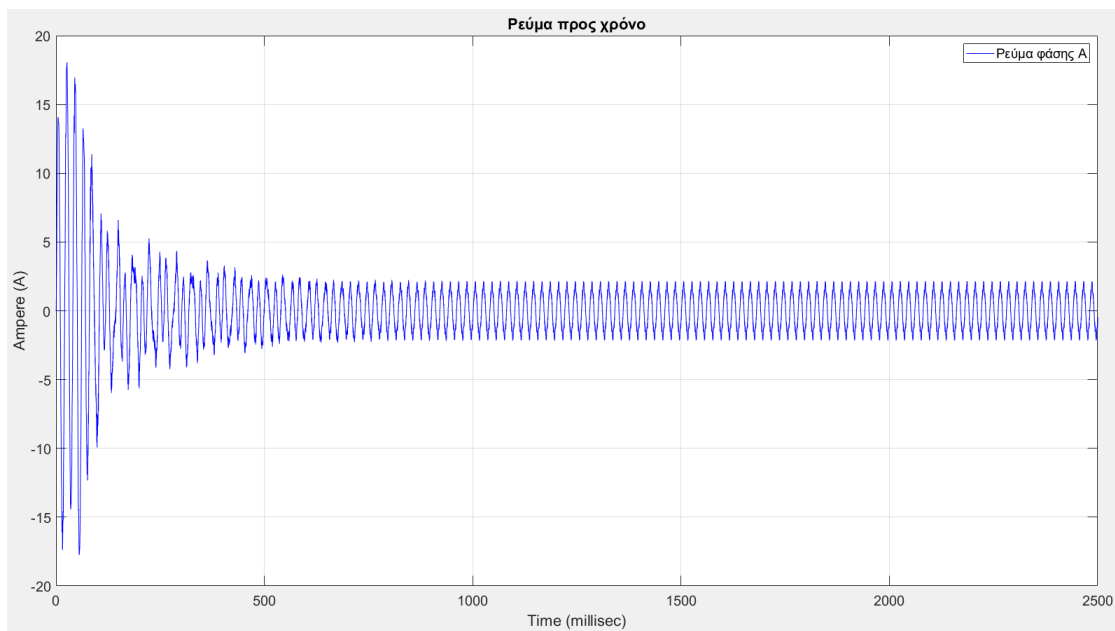


Figure 6.18: Ρεύμα φάσης A στην υγιή κατάσταση σε συνάρτηση με το χρόνο.

Από το παραπάνω σχήμα μπορούμε να παρατηρήσουμε τη μεταβατική κατάσταση και τη μόνιμη κατάσταση της έντασης του ρεύματος στην υγιή περίπτωση, όπως και τις υψηλές τιμές του στην εκκίνηση.

Στη συνέχεια, έγινε στο ίδιο γράφημα αναπαράσταση του ρεύματος φάσης του κινητήρα, όταν λειτουργεί υπό υγιείς συνθήκες και όταν λειτουργεί με βραχυκυκλωμένες σπείρες σε αυτήν την φάση, για όλες τις περιπτώσεις σφάλματος. Από τα γραφήματα αυτά διαπιστώθηκε ότι δεν σημειώνεται εμφανής αύξηση του πλάτους του ρεύματος φάσης όταν υπάρχουν εσωτερικά βραχυκυκλώματα.

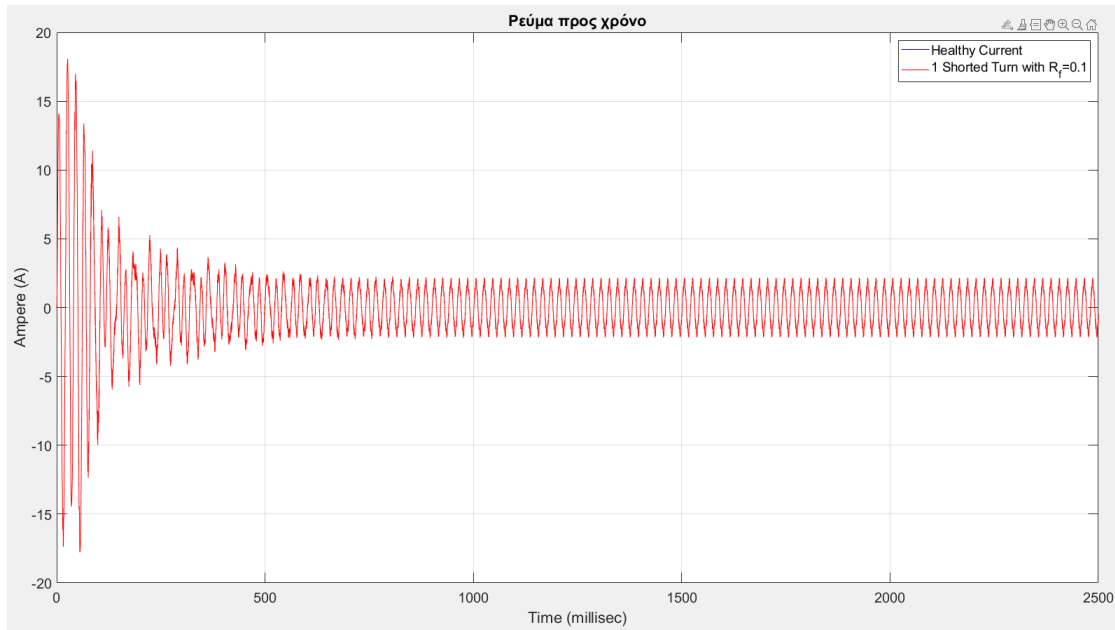


Figure 6.19: Διάγραμμα ρεύματος σε υγιή και εσφαλμένη κατάσταση με μία σπείρα βραχυκυκλωμένη και αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$

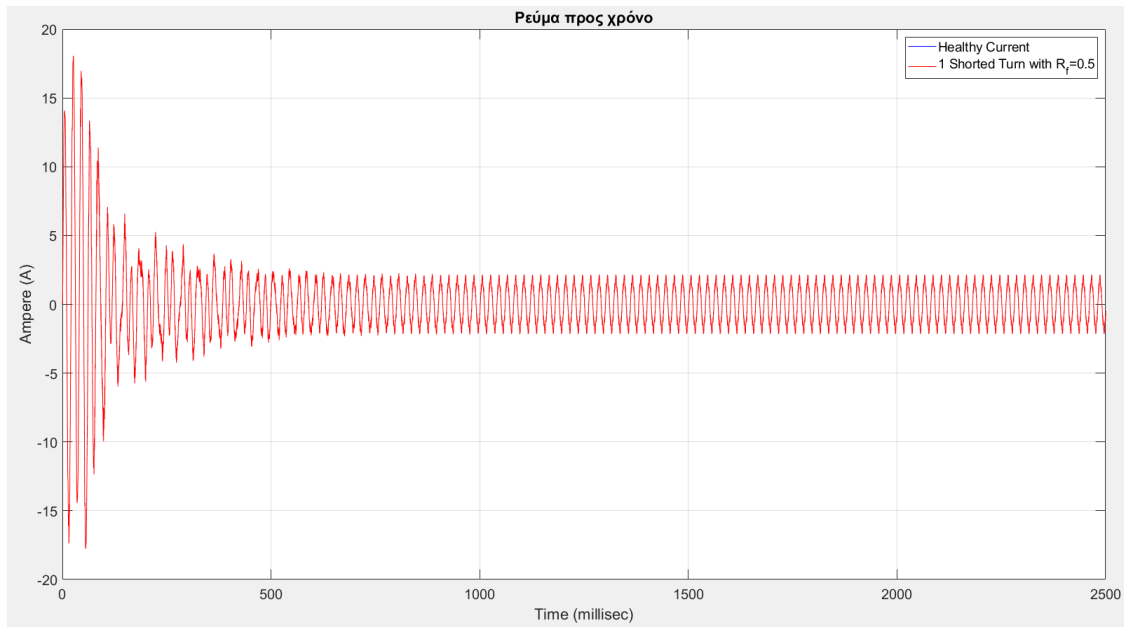


Figure 6.20: Διάγραμμα ρεύματος σε υγιή και εσφαλμένη κατάσταση με μία σπείρα βραχυκυκλωμένη και αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$

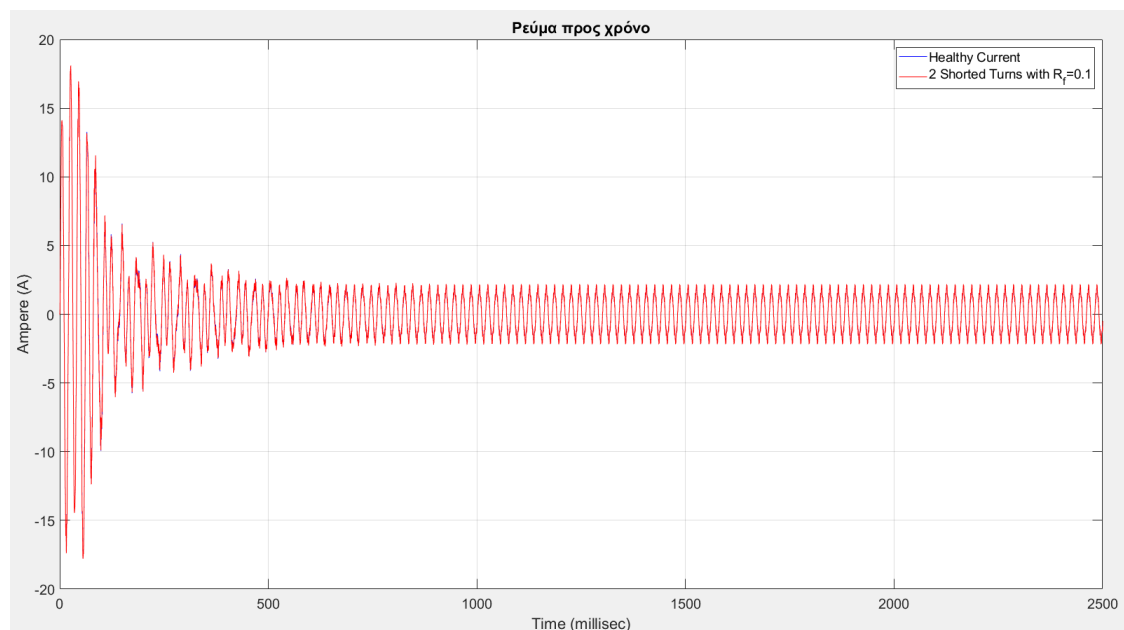


Figure 6.21: Διάγραμμα ρεύματος σε υγιή και εσφαλμένη κατάσταση με δύο σπείρες βραχυκυκλωμένες και αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$

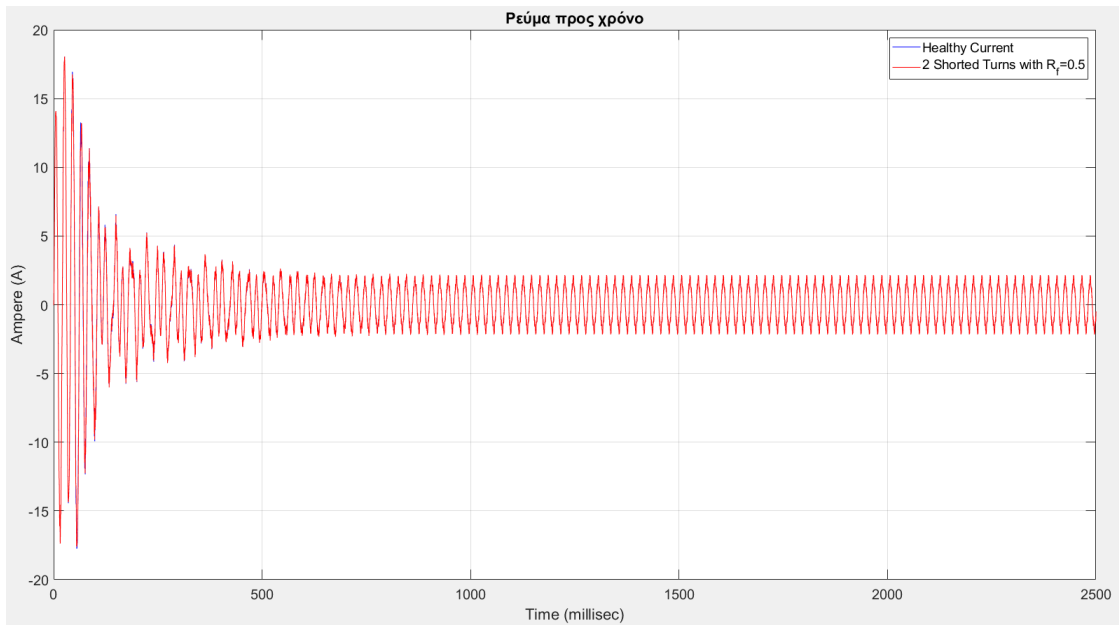


Figure 6.22: Διάγραμμα ρεύματος σε υγιή και εσφαλμένη κατάσταση με δύο σπείρες βραχυκυκλωμένες και αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$

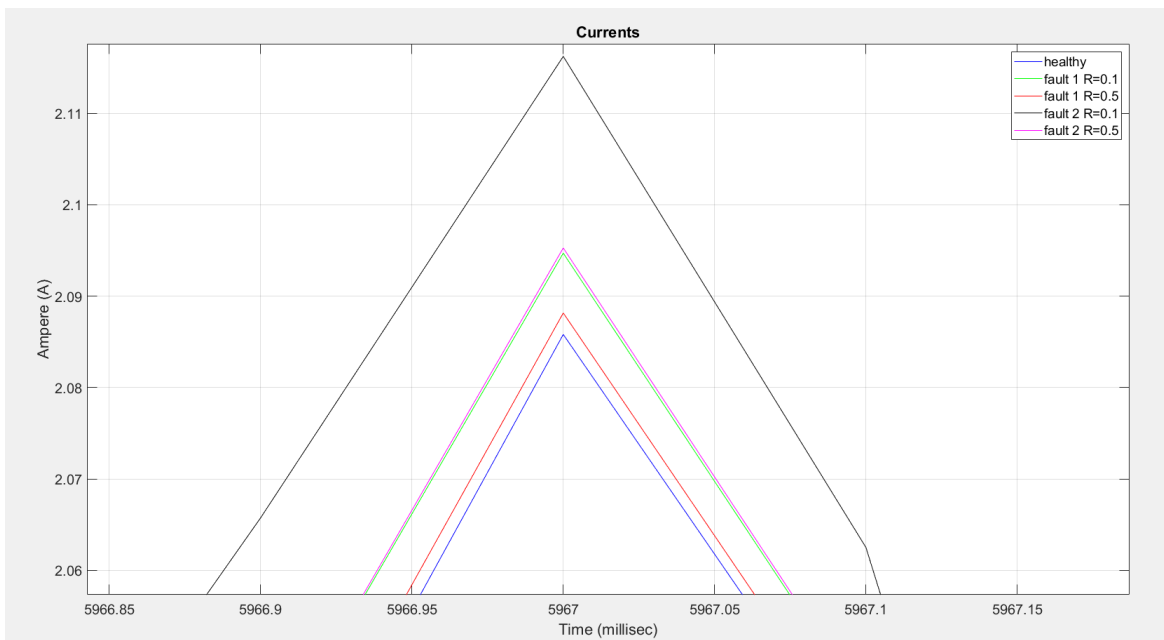


Figure 6.23: Διάγραμμα των ρευμάτων φάσης όλων των περιπτώσεων (υγιής και εσφαλμένων) εστιασμένο σε μία κορυφή.

Από το σχήμα 6.23 διακρίνουμε ότι μεγαλύτερη αύξηση στο πλάτος του ρεύματος προκαλεί το σφάλμα των δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ . Στη συνέχεια, το σφάλμα των δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$  και το σφάλμα μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$  προκαλούν περίπου την ίδια αύξηση στο πλάτος, ενώ τη μικρότερη αύξηση στο πλάτος προκαλεί το σφάλμα μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .

Table 3: RMS τιμές ρευμάτων.

RMS Τιμή	Phase A	Phase B	Phase C
healthy	1.3029	1.3031	1.3030
1 Shorted Turn with $R_f = 0.1\Omega$	1.3107	1.3052	1.3053
1 Shorted Turn with $R_f = 0.5\Omega$	1.3048	1.3036	1.3034
2 Shorted Turns with $R_f = 0.1\Omega$	1.3276	1.3085	1.3083
2 Shorted Turns with $R_f = 0.5\Omega$	1.3107	1.3047	1.3050

Στον πίνακα 3 έχουν υπολογιστεί οι RMS τιμές των ρευμάτων της κάθε φάσης για όλες τις περιπτώσεις, όπου και εκεί παρατηρείται το ίδιο μοτίβο στην αύξηση των τιμών του πλάτους. Συγκεκριμένα, το ρεύμα της φάσης, όπου υπάρχει σφάλμα μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας και αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$  είναι 0.4% μεγαλύτερο από το ρεύμα των δύο άλλων φάσεων, ενώ το ρεύμα της φάσης, όπου υπάρχει σφάλμα μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας και αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$  είναι 0.1% μεγαλύτερο από το ρεύμα των δύο άλλων φάσεων. Αντιστοίχως, το ρεύμα της φάσης, με σφάλμα δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών και αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$  είναι 1.46% μεγαλύτερο από το ρεύμα των φάσεων B και Γ, ενώ το ρεύμα φάσης, με σφάλμα δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών και αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$  είναι 0.45% μεγαλύτερο από ρεύμα των άλλων φάσεων.

Από τις παραπάνω πληροφορίες, συμπεραίνουμε ότι οι αυξήσεις αυτές είναι αρκετά μικρές και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη λήψη απόφασης ύπαρξης ή μη εσωτερικού βραχυκυκλώματος στα τυλίγματα του στάτη.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης χωρίζεται σε δύο ρεύματα. Στο ρεύμα που περνάει από τις βραχυκυκλωμένες σπείρες και στο ρεύμα που περνάει μέσα από την αντίσταση σφάλματος. Στα παρακάτω σχήματα έγινε κοινή απεικόνιση του ρεύματος της φάσης, στην οποία υπάρχει το εσωτερικό βραχυκύκλωμα, με το ρεύμα που περνάει μέσα από τις βραχυκυκλωμένες σπείρες. Όπως επίσης και του ρεύματος της φάσης με το ρεύμα που περνάει μέσα από την αντίσταση σφάλματος, για κάθε μια από τις τέσσερις περιπτώσεις.

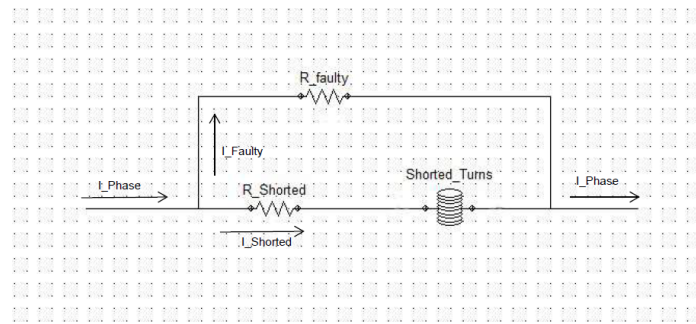


Figure 6.24: Κυκλωματική αναπαράσταση εσωτερικού βραχυκυκλώματος

- Περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

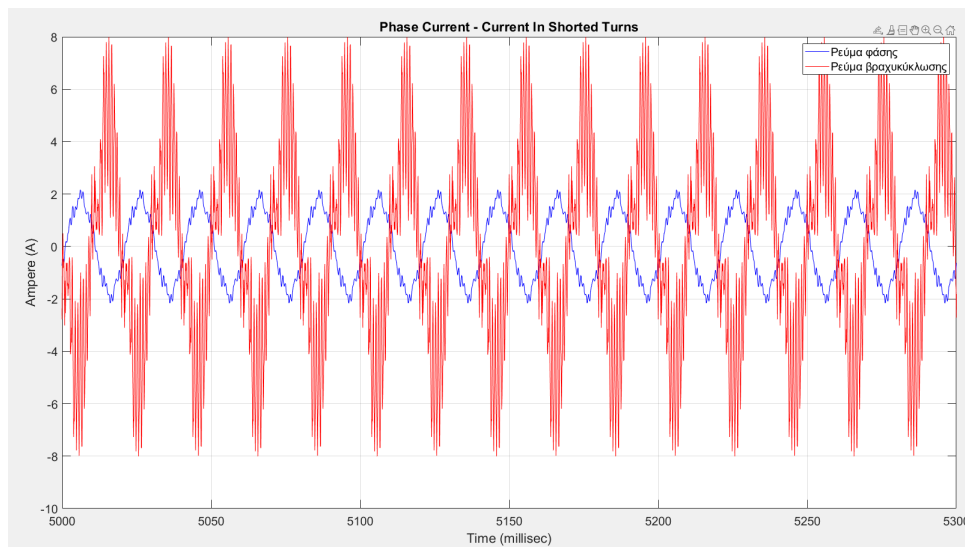


Figure 6.25: Διάγραμμα των ρευμάτων φάσης και του ρεύματος που διέρχεται από τις βραχυκυκλωμένες σπείρες για την περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

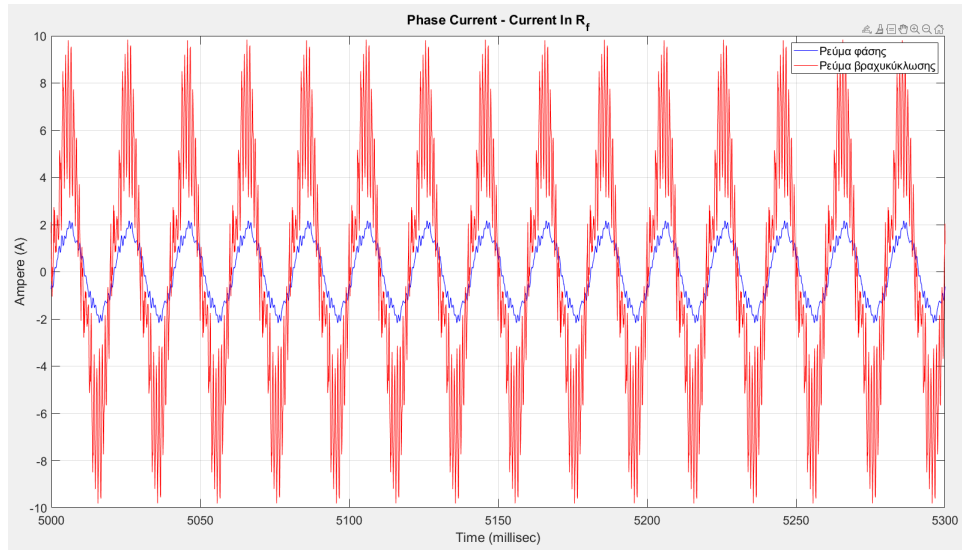


Figure 6.26: Διάγραμμα των ρευμάτων φάσης και του ρεύματος που διέρχεται από την αντίσταση σφάλματος για την περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

- Περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .

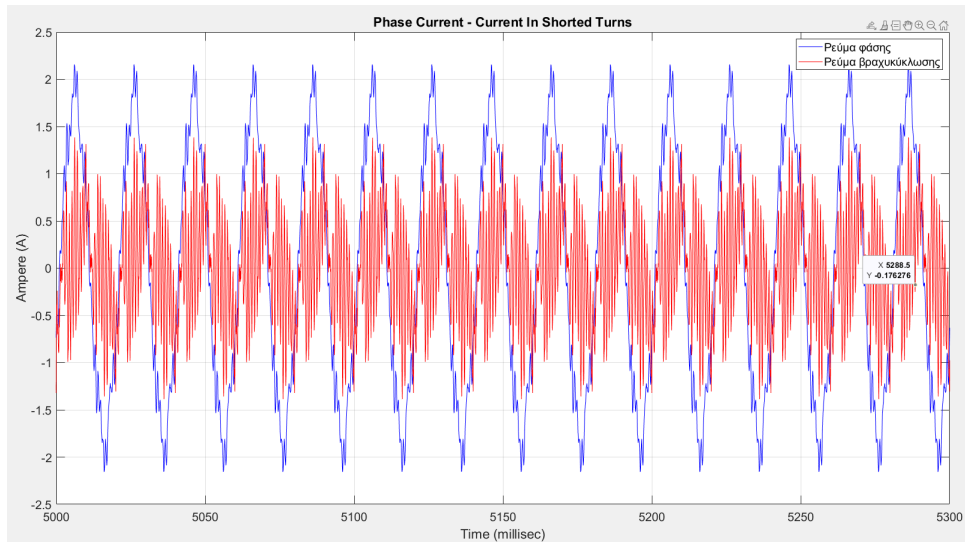


Figure 6.27: Διάγραμμα των ρευμάτων φάσης και του ρεύματος που διέρχεται από τις βραχυκυκλωμένες σπείρες για την περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .



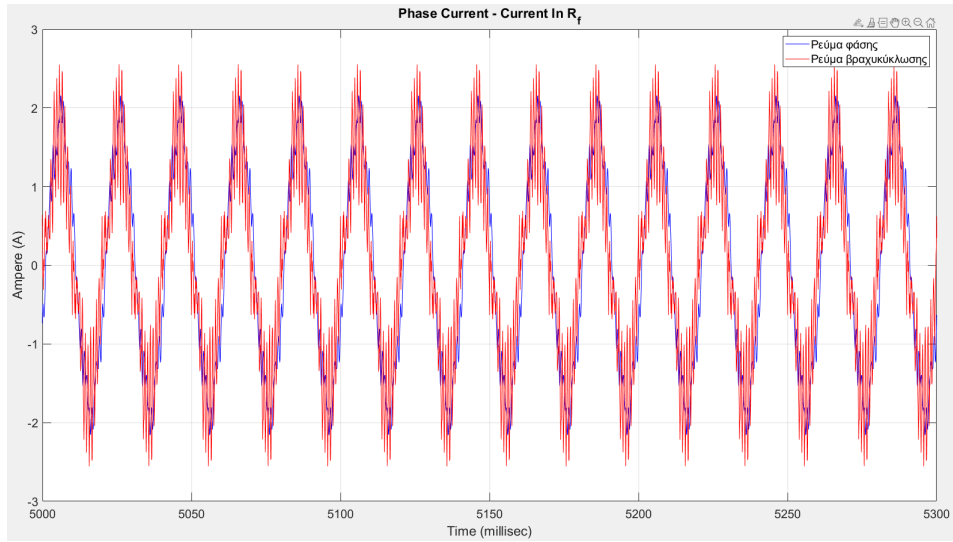


Figure 6.28: Διάγραμμα των ρευμάτων φάσης και του ρεύματος που διέρχεται απο την αντίσταση σφάλματος για την περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .

- Περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

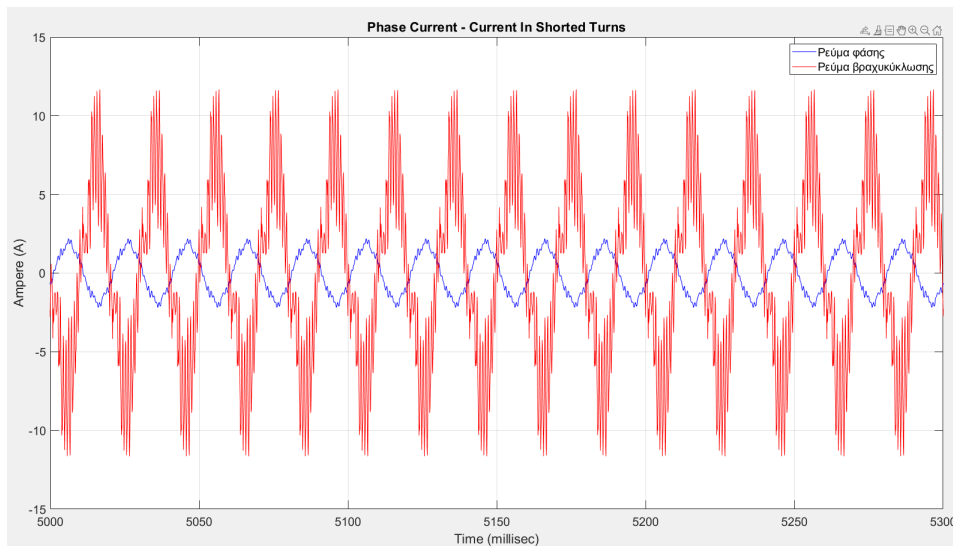


Figure 6.29: Διάγραμμα των ρευμάτων φάσης και του ρεύματος που διέρχεται απο τις βραχυκυκλωμένες σπείρες για την περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

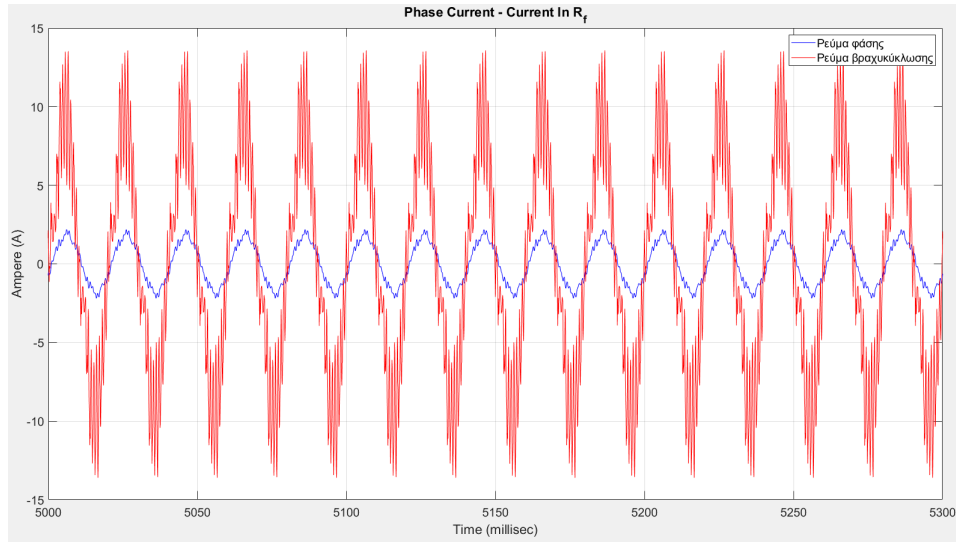


Figure 6.30: Διάγραμμα των ρευμάτων φάσης και του ρεύματος που διέρχεται από την αντίσταση σφάλματος για την περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

- Περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .

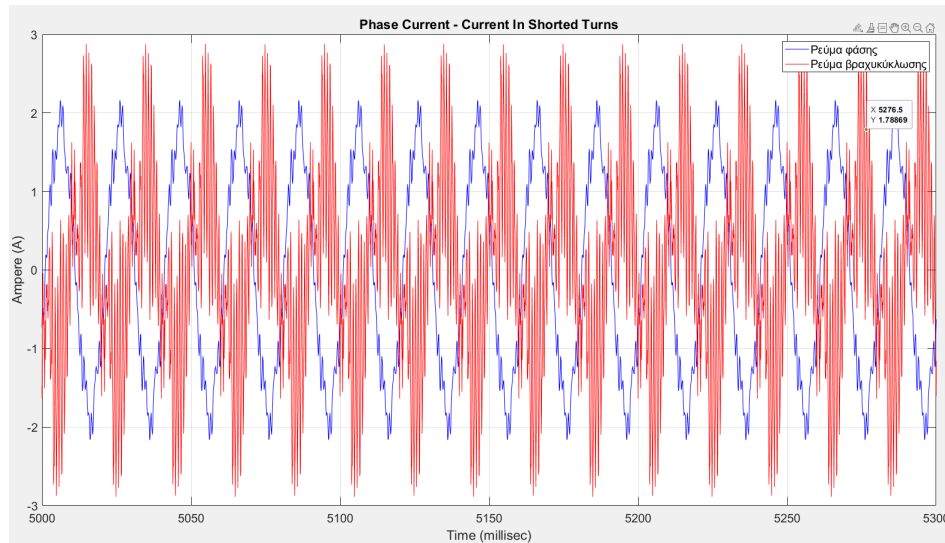


Figure 6.31: Διάγραμμα των ρευμάτων φάσης και του ρεύματος που διέρχεται από τις βραχυκυκλωμένες σπείρες για την περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .

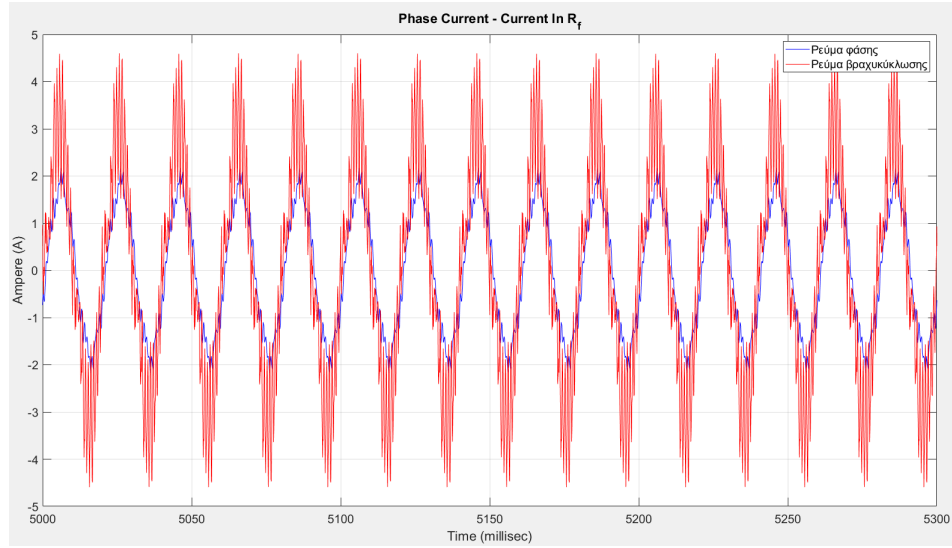


Figure 6.32: Διάγραμμα των ρευμάτων φάσης και του ρεύματος που διέρχεται απο την αντίσταση σφάλματος για την περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .

Table 4: RMS τιμές και ποσοστά των ρευμάτων φάσης και βραχυκύκλωσης .

RMS Τιμή	Phase Current	Current In Shorted Turns	Percentage ( $I_{Shorted}/I_{phase}$ )	Current In $R_f$	Percentage ( $I_f/I_{phase}$ )
1 Shorted Turn with $R_f = 0.1\Omega$	1.3107	3.7032	182.5% increase	4.8331	268.7% increase
1 Shorted Turn with $R_f = 0.5\Omega$	1.3048	0.6	54% decrease	1.2414	4.86% decrease
2 Shorted Turns with $R_f = 0.1\Omega$	1.3276	5.6648	326.7% increase	6.8464	415.7% increase
2 Shorted Turns with $R_f = 0.5\Omega$	1.3107	1.2286	6.26% decrease	2.2686	73% increase

Για την περίπτωση σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση επαφής  $R_f = 0.1\Omega$ , παρατηρούμε από τα διαγράμματα 6.25 και 6.26 αλλά και από τον πίνακα 4, ότι το ρεύμα που κυλάει στις βραχυκυκλωμένες σπείρες είναι 1.8 φορές μεγαλύτερο από το ρεύμα της φάσης, όπως επίσης και το ρεύμα της αντίστασης επαφής είναι 2.68 φορές μεγαλύτερο από το ρεύμα της φάσης. Γεγονός που είναι πολύ επικίνδυνο, καθώς θα προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας των βραχυκυκλωμένων σπειρών, αλλά και τοπική αύξηση της θερμοκρασίας στο σημείο επαφής τους, με αποτέλεσμα την πιθανότητα διάσπασης της μόνωσης των γειτονικών σπειρών και περαιτέρω επέκταση του βραχυκυκλώματος.

Η περίπτωση του σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση επαφής  $R_f = 0.5\Omega$  παρουσιάζει μια εικόνα σφάλματος σε αρχική μορφή. Αυτό το συμπεραίνουμε, καθώς το ρεύμα που ρέει μέσα από τις βραχυκυκλωμένες σπείρες είναι το μισό από το ρεύμα της φάσης, ενώ το ρεύμα που περνάει από την αντίσταση επαφής είναι περίπου ίσο με το ρεύμα της φάσης.

Η περίπτωση βραχυκύκλωσης, μεταξύ δύο σπειρών του πηνίου που βρίσκεται μέσα στην αυλάκωση 2 και δύο σπειρών του πηνίου που βρίσκεται μέσα στην αυλάκωση 10, έχοντας αντίστασης επαφής  $R_f = 0.1\Omega$  είναι η πιο κρίσιμη από αυτές που εξετάσαμε. Αυτό το συμπεραίνουμε από τα διαγράμματα 6.29 και 6.30 αλλά και τον πίνακα 4, καθώς διακρίνουμε ότι το ρεύμα που περνάει μέσα από τις βραχυκυκλωμένες σπείρες είναι 3.26 φορές μεγαλύτερο από το ρεύμα φάσης με αποτέλεσμα τα τυλίγματα του βραχυκυκλώματος να αναπτύσουν μεγάλη θερμοκρασία, η οποία θα επηρεάζει αρνητικά τα στοιχεία του κινητήρα που βρίσκονται κοντά. Επιπλέον παρατηρούμε ότι το ρεύμα που περνάει από σημείο επαφής είναι 4.17 φορές μεγαλύτερο από το ρεύμα φάσης με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί τοπική υπερθέρμανση, η οποία θα "στρεσάρει" τη μόνωση στο σημείο με αποτέλεσμα τη γρήγορη εξάπλωση του βραχυκυκλώματος.

Τέλος, στην περίπτωση βραχυκυκλώματος μεταξύ δύο σπειρών από το πηνίο της κάθε αυλάκωσης με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ , παρατηρούμε ότι το ρεύμα που περνάει μέσα από τις βραχυκυκλωμένες σπείρες είναι περίπου ίσο με το ρεύμα της φάσης ενώ το ρεύμα που περνάει από το σημείο επαφής (αντίσταση σφάλματος) είναι 0.73 φορές μεγαλύτερο από το ρεύμα της φάσης. Από το παραπάνω συμπεραίνουμε ότι ακόμα και αν δεν ρέει μεγάλο ρεύμα στο βραχυκύκλωμα, η τοπική αύξηση της θερμοκρασίας στο σημείο επαφής, λόγω του μεγαλύτερου ρεύματος που περνάει, θα επηρεάσει τη μόνωση στις γειτονικές σπείρες με κίνδυνο να βραχυκυκλωθούν και αυτές, αυξάνοντας έτσι την σοβαρότητα του σφάλματος.

### 6.4.2 Motor Current Signature Analysis (MCSA)

Εν συνεχεία, κάναμε φασματική ανάλυση της μόνιμης κατάστασης των ρευμάτων όλων των περιπτώσεων, χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Fourier. Αναλυτικότερα, πήραμε τους πίνακες με τα δεδομένα των ρευμάτων, στα οποία είχε γίνει δειγματοληψία  $T_s = 0.1ms$  και χρησιμοποιήσαμε την συνάρτηση fft (Fast Fourier Transform) της Matlab, μετασχηματίζοντας έτσι τα σήματα στο φάσμα των συχνοτήτων και έπειτα τα απεικονίσαμε με συχνότητα δειγματοληψίας  $f_s = 10000Hz$  σε κατάλληλα διαμορφωμένο άξονα συχνοτήτων, έτσι ώστε να μπορέσουμε να παρατηρήσουμε τις υπογραφές των σφαλμάτων.

Όπως γνωρίζουμε το ρεύμα του στάτη θα περιέχει αρμονικές της τάξης  $6k \pm 1$  λόγω της μαγνητεγερτικής δύναμης (MMF) του στάτη αλλά και λόγω της μη γραμμικότητας του σιδηροπυρήνα. Οι αρμονικές μικρότερης τάξης θα έχουν μεγαλύτερο πλάτος από αυτές μεγαλύτερων τάξεων. Εξαίρεση σε αυτόν τον κανόνα όταν έχουμε συνδεσμολογία αστέρα αποτελούν οι αρμονικές του φασικού ρεύματος, τάξης  $k = 3, 9, 15, \dots$  που λόγω της συμμετρίας των τριών φάσεων, αυτές αλληλοαναιρούνται και επομένως είναι απούσες ή πολύ μικρές. Ωστόσο στα διαγράμματα θα δούμε κάποιες αρμονικές μεγαλύτερης τάξης να έχουν μεγάλο πλάτος, γεγονός που οφείλεται στις χωρικές αρμονικές που δημιουργούνται λόγω των αυλακώσεων στάτη και δρομέα.

Όταν ο αριθμός αυλακώσεων δρομέα είναι  $N_R = p_p * [6n + 2]$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$  τότε παρουσιάζονται Lower Principal Slot Harmonics στις συχνότητες:

$$f_{L-PSH} = \left[ \frac{N_R}{P_p} (1 - s) - 1 \right] * f_s$$

Όταν ο αριθμός αυλακώσεων δρομέα είναι  $N_R = p_p * [6n - 2]$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$  τότε παρουσιάζονται Upper Principal Slot Harmonics στις συχνότητες:

$$f_{U-PSH} = \left[ \frac{N_R}{P_p} (1 - s) + 1 \right] * f_s$$

ενώ όταν ο αριθμός αυλακώσεων δρομέα είναι  $N_R = 6n * p_p$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$  τότε παρουσιάζονται και Upper Principal Slot Harmonics και Lower Principal Slot Harmonics.

Το  $N_R$  είναι ο αριθμός των αυλακώσεων,  $P_p$  είναι τα ζεύγη πόλων,  $s$  είναι η ολίσθηση που στην περίπτωση μας είναι μηδέν και  $f_s$  η συχνότητα τροφοδοσίας.

Ειδικότερα, όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 5.1 ο βραχυκυκλωμένος κλωβός αποτελείται από 44 αυλακώσεις χωρισμένες σε 2 γεωμετρίες (36 από αυτές στην μια και 8 στην άλλη). Επομένως, οι 44 αυλακώσεις μας δίνουν μια Upper PSH στα 1150 hz, οι 36 αυλακώσεις μας δίνουν και Upper PSH στα 950 hz και Lower PSH στα 850 hz ενώ οι 8 αυλακώσεις μας δίνουν Upper PSH στα 250 hz όπως βλέπουμε και στον πίνακα 5.

Table 5: Prinsipal Slot Harmonics.

Αριθμός αυλακώσεων	Συχνότητα (Hz)	Πλάτος (dB)
44	1150	-23.78
36	850	-24.5593
36	950	-29.355
8	250	-21

- Περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

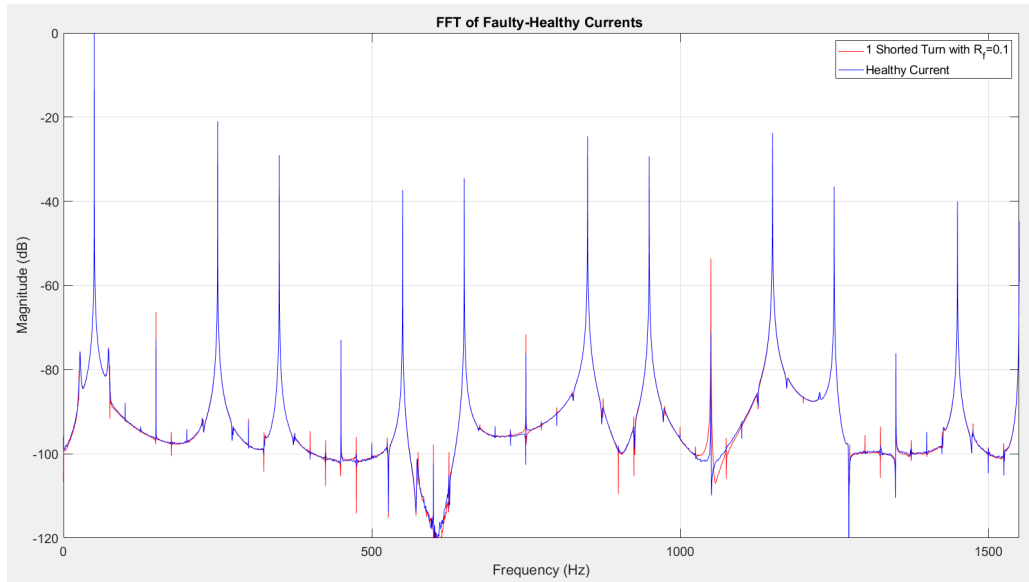


Figure 6.33: Φάσμα συχνοτήτων των ρευμάτων, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

Table 6: Υπογραφές για σφάλμα μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με  $R_f = 0.1\Omega$ .

Συχνότητα (Hz)	Πλάτος (dB) Healthy περίπτωσης	Πλάτος (dB) Faulty περίπτωσης
150	-72.81	-66.34
750	-76.26	-71.61
1050	-71.14	-53.62

Παρατηρώντας το σχήμα 6.33 και τον πίνακα 6 διακρίνουμε μια μικρή αύξηση της τρίτης και της 15ης αρμονικής. Η αύξηση αυτή όμως είναι τόσο μικρή που δεν είναι ικανή για να εξάγουμε συμπέρασμα ύπαρξης ή μη εσωτερικού βραχυκυκλώματος. Ιδιαίτερα ενδιαφέροντα είναι η εμφάνιση της Lower PSH στα 1050 hz, που σύμφωνα με την θεωρία δεν θα έπρεπε να υπάρχει. Στην περίπτωση σφάλματος παρουσιάζει αύξηση 20 db και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σοβαρή ένδειξη ύπαρξης εσωτερικού βραχυκυκλώματος.

- Περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .

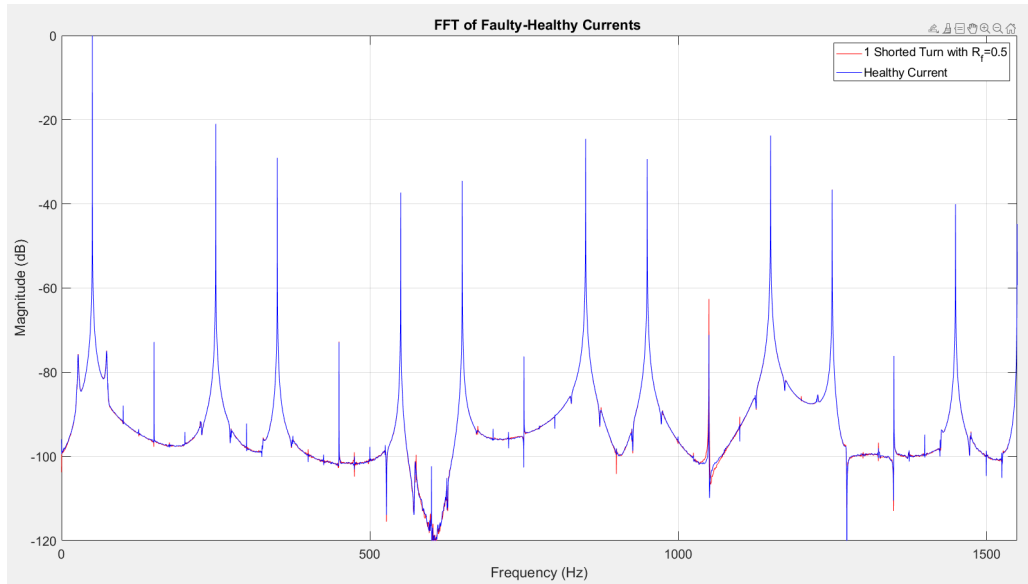


Figure 6.34: Φάσμα συχνοτήτων των ρευμάτων, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .

Table 7: Υπογραφές για σφάλμα μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με  $R_f = 0.5\Omega$ .

Συχνότητα (Hz)	Πλάτος (dB) Healthy περίπτωσης	Πλάτος (dB) Faulty περίπτωσης
150	-72.81	-77.93
750	-76.26	-83.53
1050	-71.14	-62.59

Στην περίπτωση αυτή η σοβαρότητα του σφάλματος είναι μικρή, αφού στο εσωτερικό βραχυκύκλωμα συνεισφέρει μόνο μία σπείρα από κάθε πηνίο και η αντίσταση επαφής (σφάλματος) είναι σχετικά μεγάλη. Το γεγονός αυτό αποτυπώνεται και στο διάγραμμα 6.34 και τον πίνακα 7, καθώς η μόνη αύξηση που παρατηρείται είναι στο πλάτος της Lower PSH των 1050 Hz. Το εσωτερικό βραχυκύκλωμα σε αυτήν την περίπτωση δεν μπορεί να διαγνωστεί από τα παραπάνω αποτελέσματα.



- Περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$

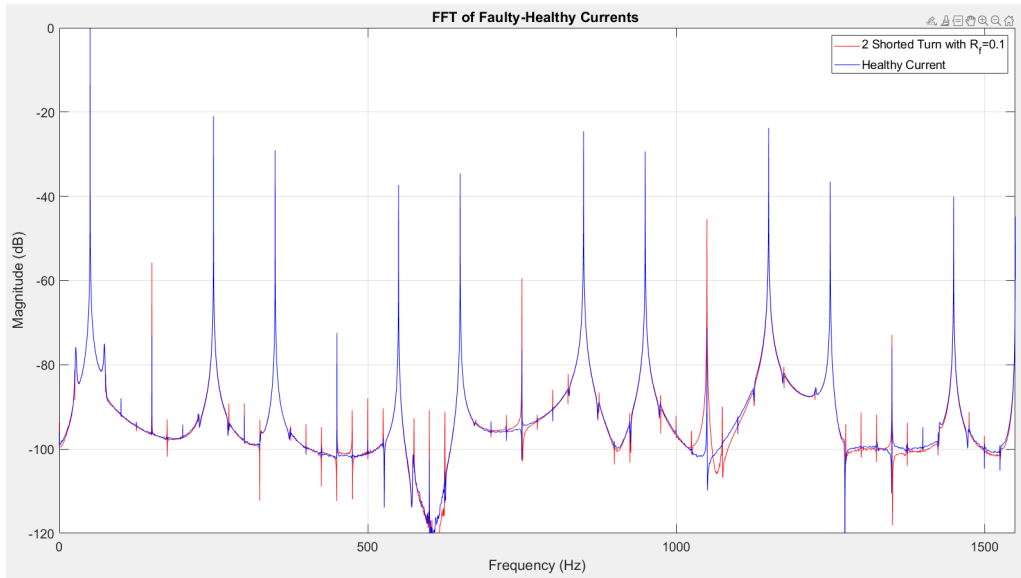


Figure 6.35: Φάσμα συχνοτήτων των ρευμάτων, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$  .

Table 8: Υπογραφές για σφάλμα δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$  .

Συχνότητα (Hz)	Πλάτος (dB) Healthy περίπτωσης	Πλάτος (dB) Faulty περίπτωσης
150	-72.81	-55.69
750	-76.26	-59.44
1050	-71.14	-45.46

Σε αυτήν την περίπτωση σφάλματος παρατηρείται ότι, η τρίτη αρμονική (150 hz) έχει αυξήσει το πλάτος της κατά 16,45 db και η 15η (750 hz) κατά 16,82 db. Μεγάλη αύξηση του πλάτους παρουσιάζει και η Lower PSH των 1050 Hz η οποία αυξάνεται κατά 25,68 db. Από τα αποτελέσματα του πίνακα 8 και του διαγράμματος 6.35 μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα ύπαρξης εσωτερικού βραχυκυκλώματος.

- Περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$

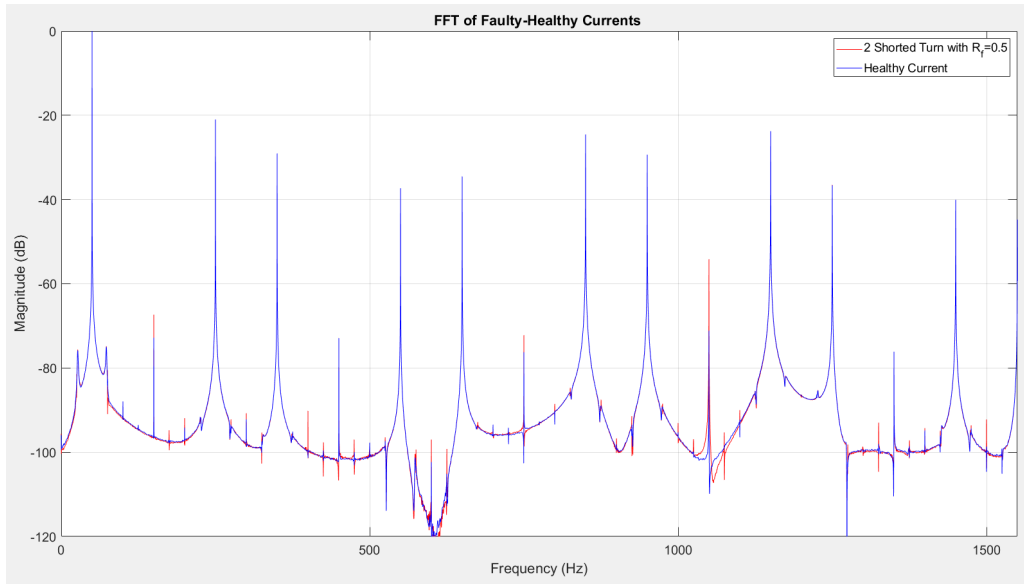


Figure 6.36: Φάσμα συχνοτήτων των ρευμάτων, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$  .

Table 9: Υπογραφές για σφάλμα δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$  .

Συχνότητα (Hz)	Πλάτος (dB) Healthy περίπτωσης	Πλάτος (dB) Faulty περίπτωσης
150	-72.81	-67.33
750	-76.26	-72.21
1050	-71.14	-54.17

Στην τελευταία περίπτωση σφάλματος παρατηρείται μικρή αύξηση στο πλάτος της τρίτης και της 15ης αρμονικής, της τάξεως 5,5 db και 4 db αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα αυτό τις κάνει να μην μπορούν να ανιχνεύσουν το εσωτερικό βραχυκύκλωμα. Όμως διακρίνεται και μια σημαντική αύξηση της Lower PSH των 1050 Hz κατά 17 db η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαγνωσθεί το σφάλμα.

### 6.4.3 EPVA

Στην ενότητα αυτή έγινε υπολογισμός των συνιστωσών  $i_d$  και  $i_q$  των ρευμάτων κάθε περίπτωσης και στη συνέχεια κάναμε φασματική ανάλυση περιμένοντας αύξηση της συνιστώσας συχνότητας  $2 * f_s$ , εάν υπάρχει εσωτερικό βραχυκύκλωμα.

Η μεγαλύτερη αύξηση εμφανίζεται, όπως περιμέναμε στην περίπτωση των δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με  $R_f = 0.1\Omega$ . Επίσης, περίπου ίδια αύξηση παρατηρείται και στην περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με  $R_f = 0.5\Omega$  και στην περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με  $R_f = 0.1\Omega$ . Τέλος, την μικρότερη αύξηση δημιουργεί η περίπτωση σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με  $R_f = 0.1\Omega$ .

- Περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

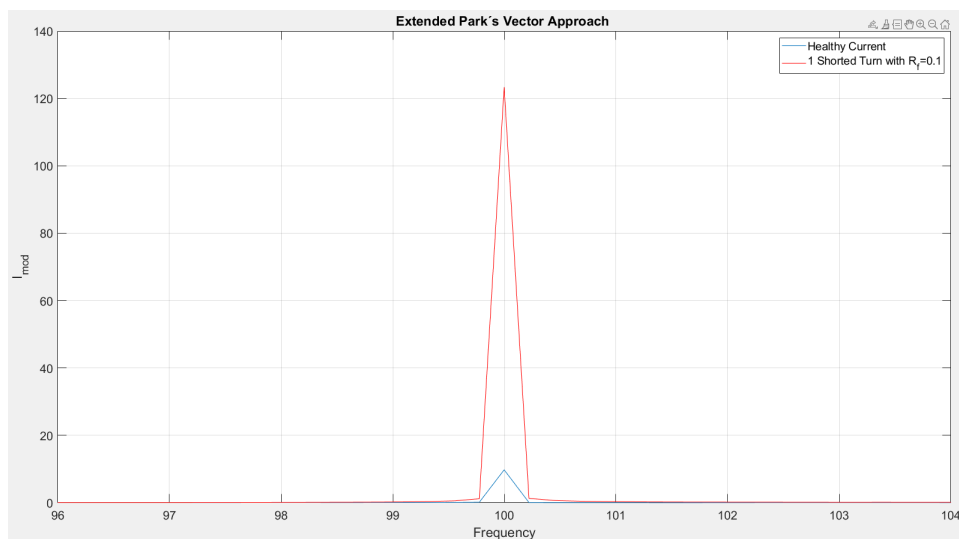


Figure 6.37: EPVA Analysis της περίπτωσης υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

- Περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .

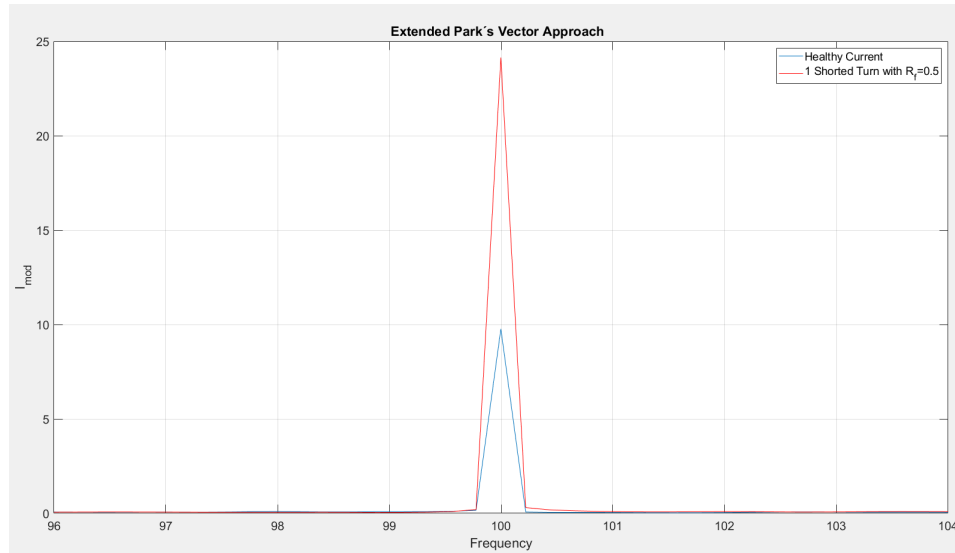


Figure 6.38: EPVA Analysis της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$  .

- Περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$

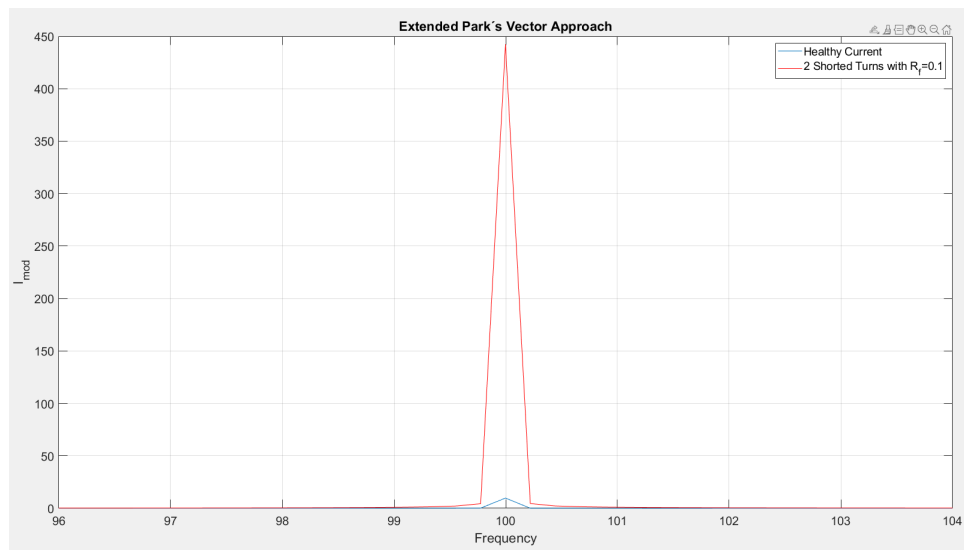


Figure 6.39: EPVA Analysis της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$  .

- Περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$

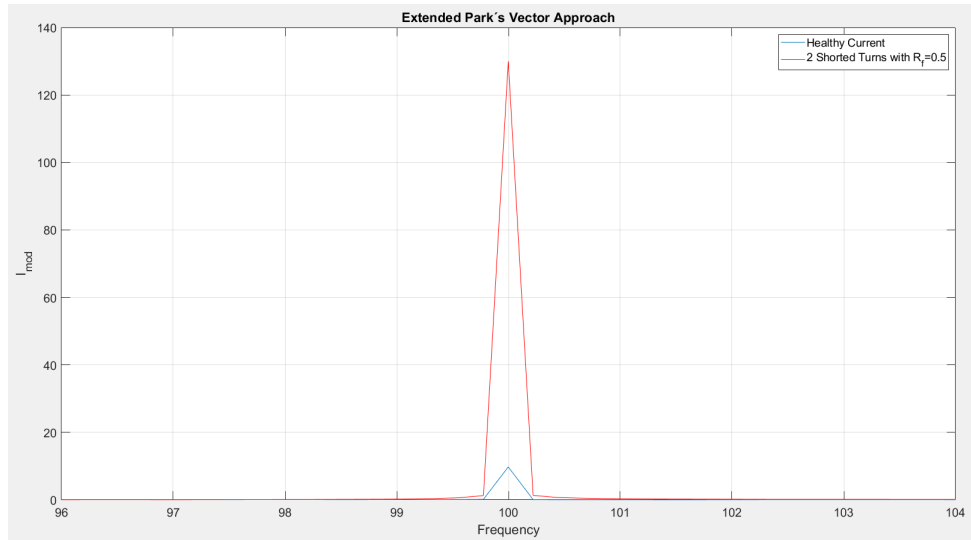


Figure 6.40: EPVA Analysis της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$  .

Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνουμε πως η μέθοδος Extended Park Vector Approach είναι πολύ χρήσιμη για την διάγνωση σφαλμάτων εσωτερικών βραχυκυκλωμάτων, καθώς για τις περιπτώσεις βραχυκύκλωσης δύο σπειρών (ανεξαρτήτως τιμής της αντίστασης σφάλματος) όπως και για την περίπτωση βραχυκύκλωσης μίας σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$  το πλάτος της συνιστώσας συχνότητας  $2 * f_s$  είναι τόσο μεγάλο που με βεβαιότητα μπορούμε να πούμε ότι υπάρχει σφάλμα. Στην περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ , παρατηρούμε ότι είναι διαφορετικά τα πράγματα, καθώς το πλάτος της συνιστώσας συχνότητας  $2 * f_s$  είναι μεν μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της υγιούς κατάστασης, αλλά όχι αρκετά έτσι ώστε να διαγνώσουμε το σφάλμα με σιγουριά.

#### 6.4.4 Ρεύμα Στάτη Αρνητικής Ακολουθίας

Στην παρούσα ενότητα έγινε υπολογισμός των ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας για κάθε περίπτωση, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του κεφαλαίου 4.2. Στη συνέχεια, τα απεικονίσαμε στο πεδίο του χρόνου και παρατηρήσαμε ότι το εσωτερικό βραχυκύκλωμα δεν επηρεάζει τις κυματομορφές των ρευμάτων στο χρόνο, αλλά και πως τα ρεύματα δεν έχουν τιμή μηδέν όπως περιμέναμε από την θεωρία.

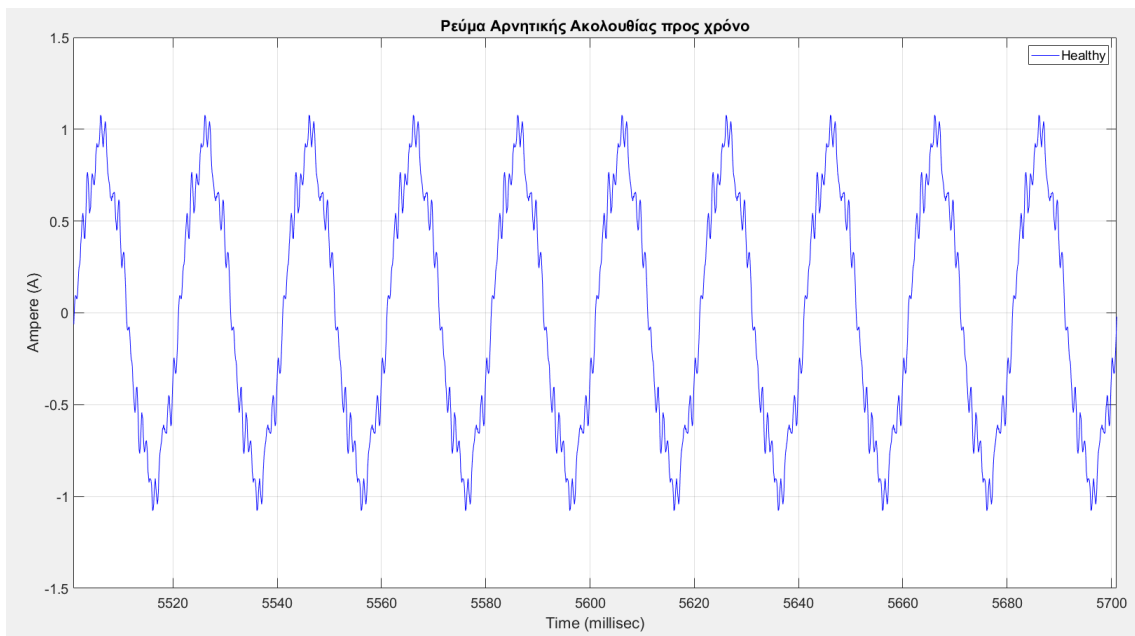


Figure 6.41: Ρεύμα Αρνητικής Ακολουθίας στην υγιή κατάσταση σε συνάρτηση με τον χρόνο.

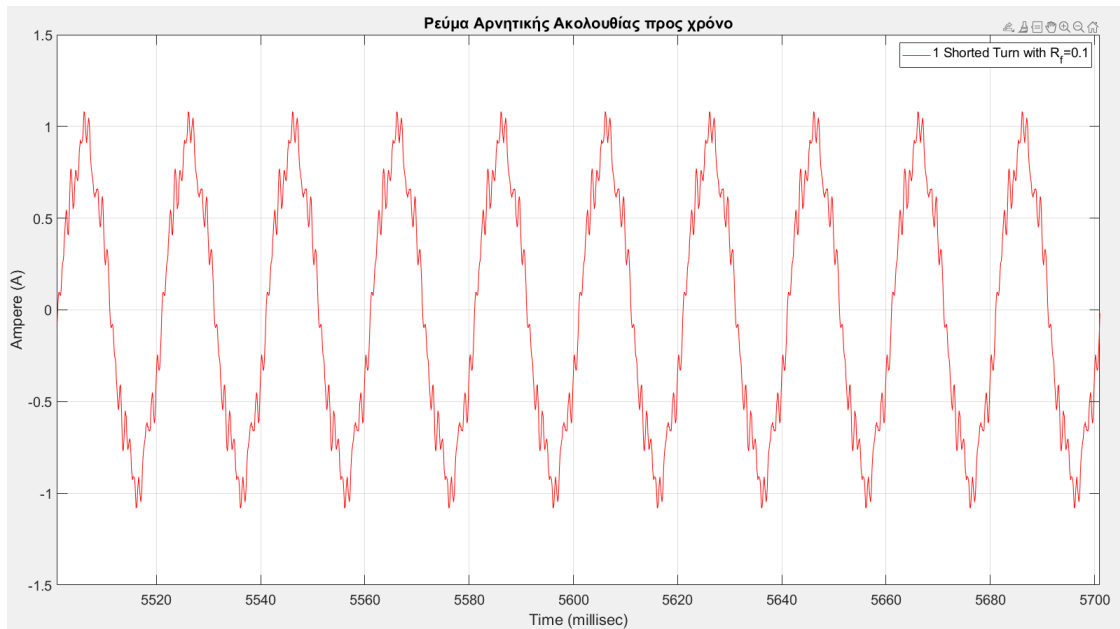


Figure 6.42: Ρεύμα Αρνητικής Ακολουθίας της περίπτωσης σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

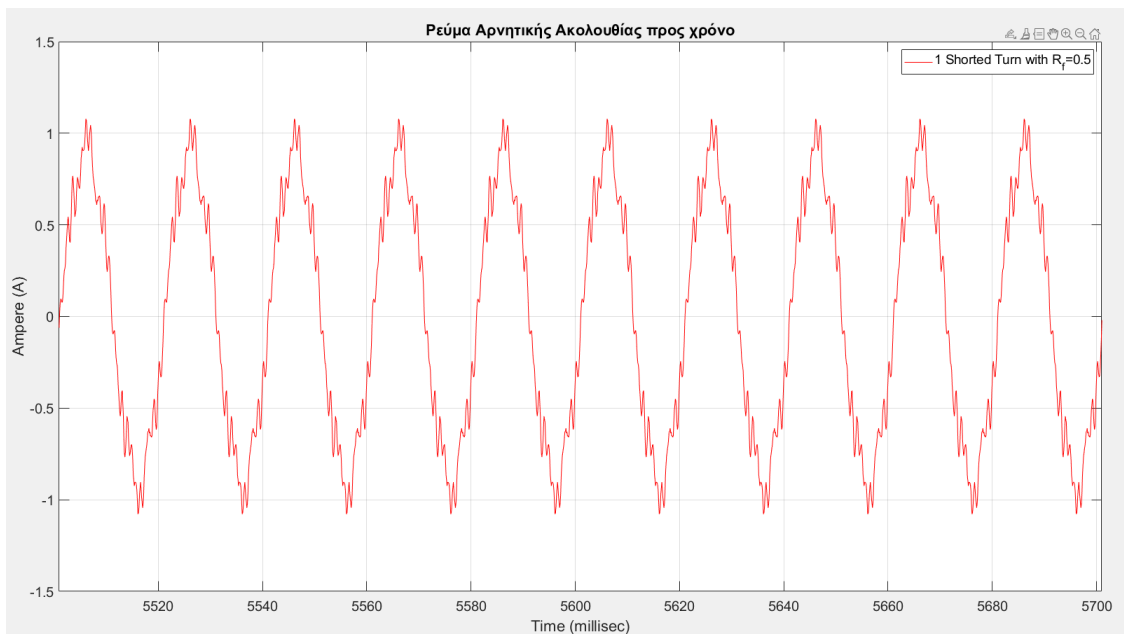


Figure 6.43: Ρεύμα Αρνητικής Ακολουθίας της περίπτωσης σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .

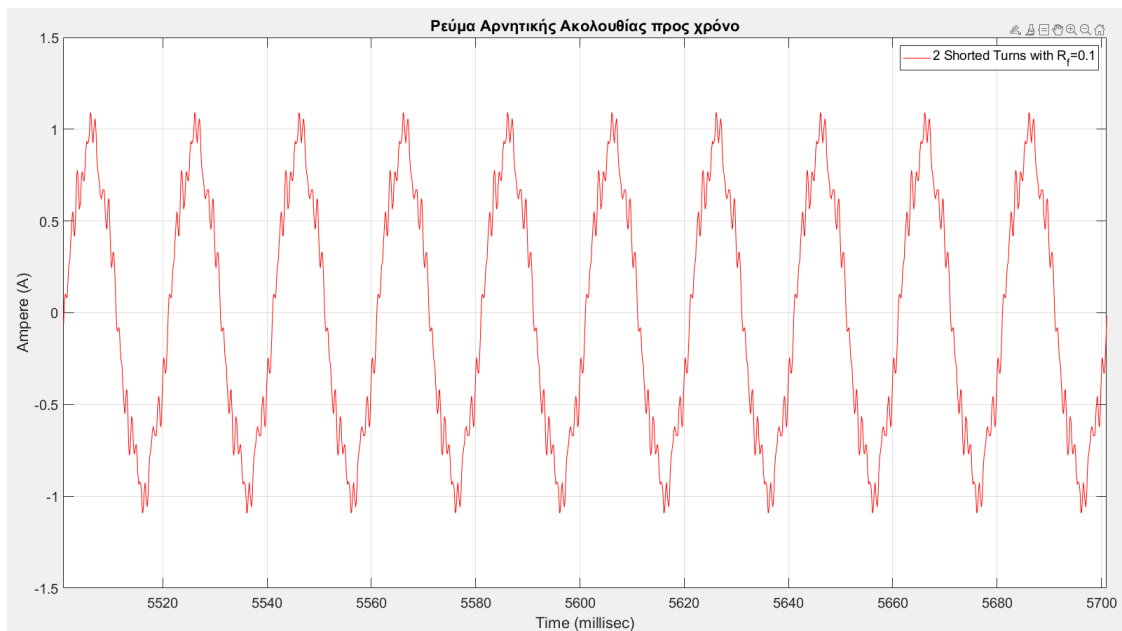


Figure 6.44: Ρεύμα Αρνητικής Ακολουθίας της περίπτωσης σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπείρων με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

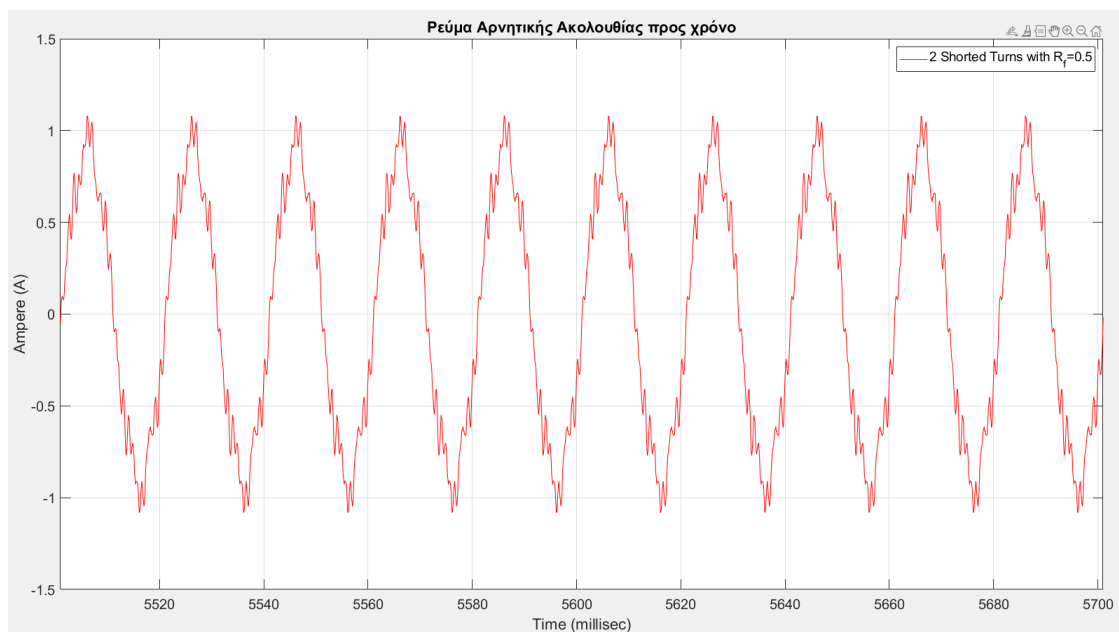


Figure 6.45: Ρεύμα Αρνητικής Ακολουθίας της περίπτωσης σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπείρων με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .



Στο επόμενο βήμα έγινε μετασχηματισμός των ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας στο πεδίο των συχνοτήτων, κάνοντας χρήση του μετασχηματισμού Fourier. Έπειτα, έγινε αναπαράσταση της κάθε περίπτωσης σφάλματος μαζί με την περίπτωση υγιούς λειτουργίας, ελέγχοντας για υπογραφές που εμφανίζονται, μόνο όταν υπάρχει εσωτερικό βραχυκύκλωμα στον κινητήρα.

Πιο συγκεκριμένα, από τα παρακάτω διαγράμματα παρατηρήσαμε αύξηση της πρώτης ( $f_s$ ) και της και της τρίτης ( $3 * f_s$ ) αρμονικής αλλά και της Lower PSH όπως φαίνεται στους πίνακες 10 - 11. Το γεγονός αυτό μας κάνει να εξάγουμε το συμπέρασμα (σύμφωνα και με την θεωρία των κεφαλαίων 4.2 και 4.6) ότι υπάρχει σφάλμα εσωτερικού βραχυκυκλώματος στον κινητήρα.

Table 10: Υπογραφές Ρεύματος Στάτη Αρνητικής Ακολουθίας

Συχνότητα	Healthy	1 Shorted Turn with $R_f = 0.1\Omega$	1 Shorted Turn with $R_f = 0.5\Omega$
50 (Hz)	-84.18 (dB)	-50.65 (dB)	-63.13 (dB)
150 (Hz)	-85.41 (dB)	-65.19 (dB)	-75.38 (dB)
1050 (Hz)	-89.36 (dB)	-60.83 (dB)	-71.43 (dB)

Table 11: Υπογραφές Ρεύματος Στάτη Αρνητικής Ακολουθίας

Συχνότητα	Healthy	2 Shorted Turns with $R_f = 0.1\Omega$	2 Shorted Turns with $R_f = 0.5\Omega$
50 (Hz)	-84.18 (dB)	-39.91 (dB)	-50.11 (dB)
150 (Hz)	-85.41 (dB)	-55.75(dB)	-64.88 (dB)
1050 (Hz)	-89.36 (dB)	-52 (dB)	-61.57 (dB)

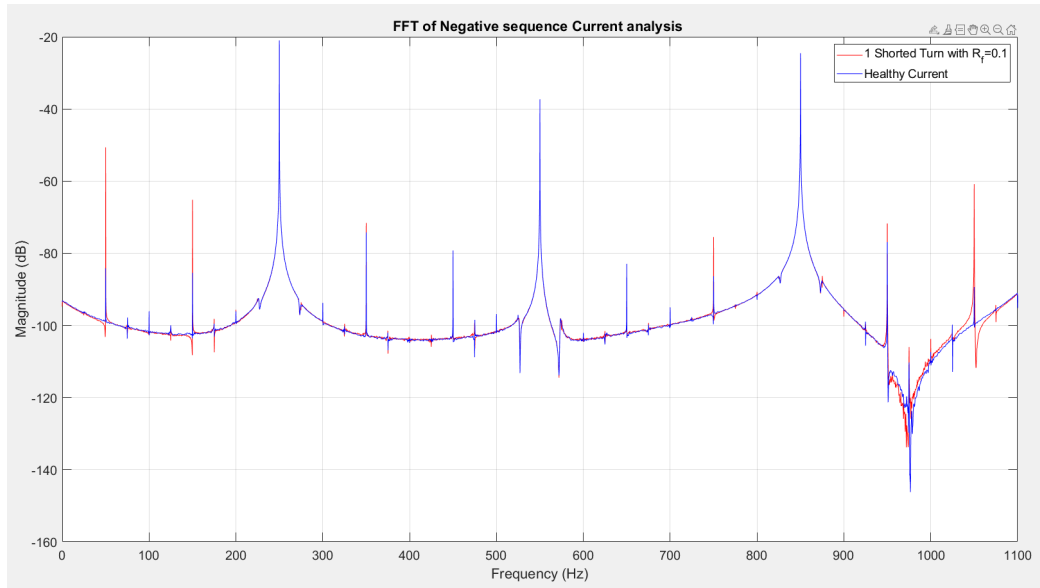


Figure 6.46: Φάσματική ανάλυση ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

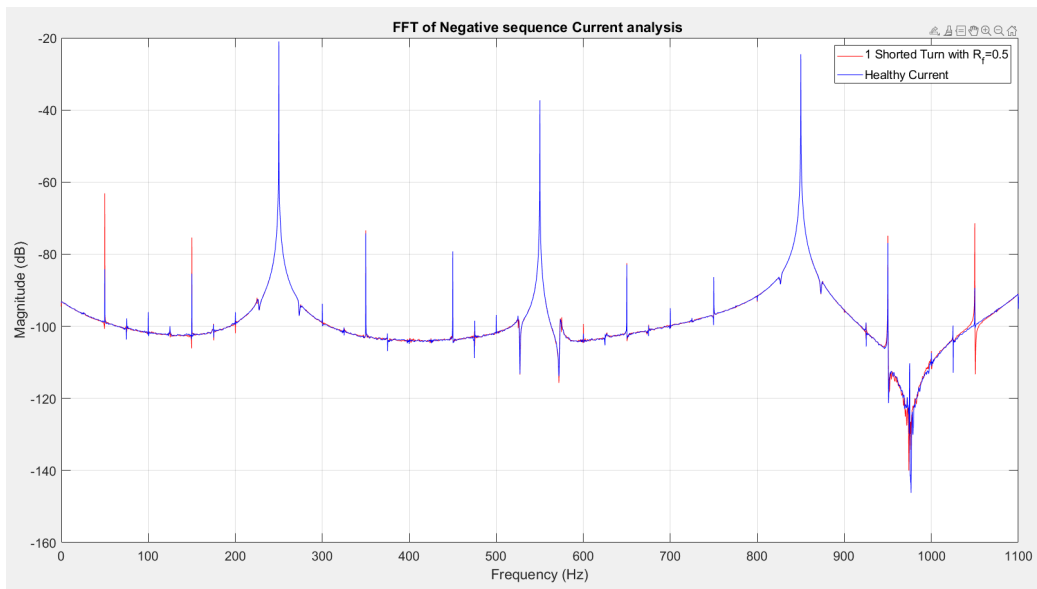


Figure 6.47: Φάσματική ανάλυση ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .

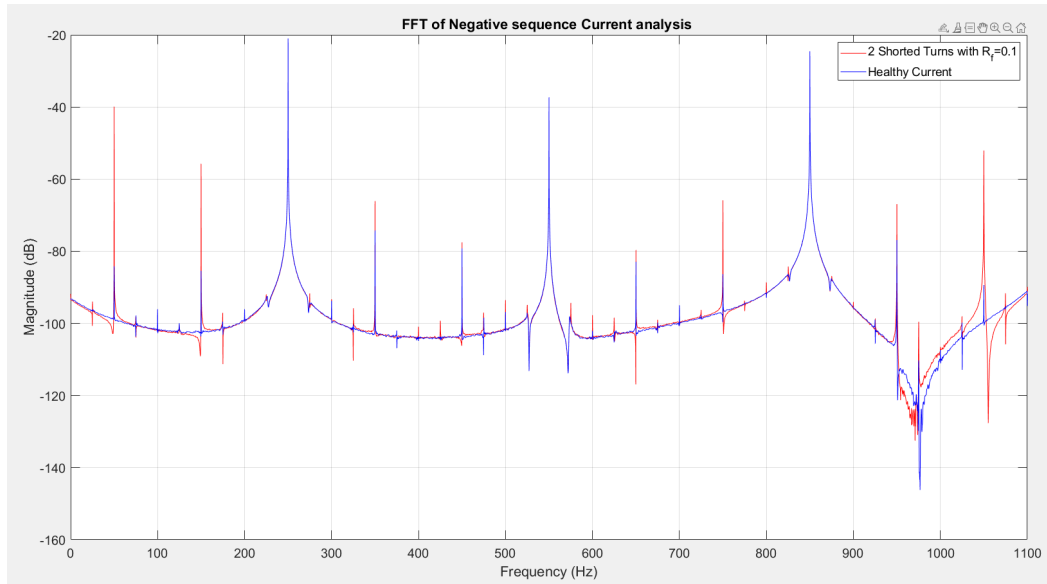


Figure 6.48: Φάσματική ανάλυση ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$

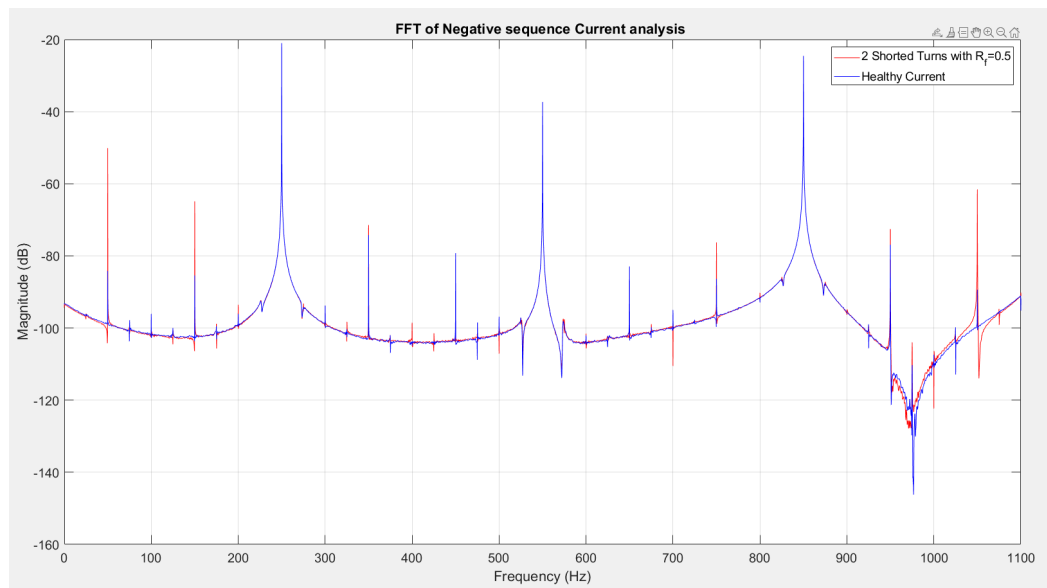


Figure 6.49: Φάσματική ανάλυση ρευμάτων αρνητικής ακολουθίας, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$

#### 6.4.5 Ανάλυση Της Ηλεκτρομαγνητικής Ροπής

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή σε έναν κινητήρα είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα. Συγκεκριμένα, στον κινητήρα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική, ο οποίος ανήκει στην κατηγορία των σύγχρονων κινητήρων μονίμων μαγνητών, η ροπή είναι ανάλογη του σταθερού μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τους μόνιμους μαγνήτες και του ρεύματος που ρέει στα τυλίγματα του στάτη παράγοντας έτσι το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Επομένως, αφού η συχνότητα τροφοδοσίας του κινητήρα είναι στα  $f_s = 50Hz$  τότε η θεμελιώδης συχνότητα της φασματικής ανάλυσης της ροπής θα βρίσκεται στα  $2 * f_s = 100Hz$ .

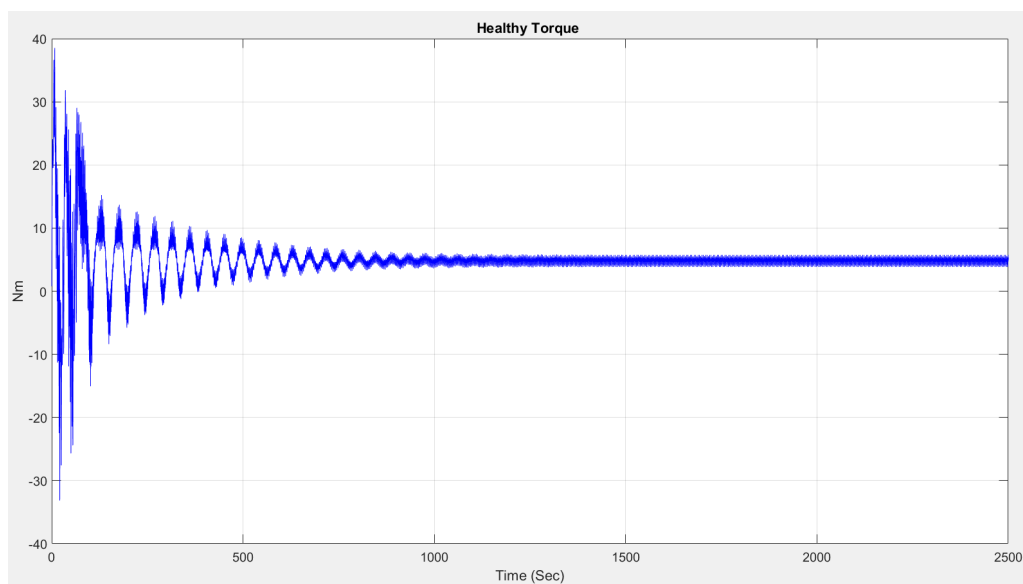


Figure 6.50: Σήμα ροπής της κατάστασης υγιούς λειτουργίας στον χρόνο.

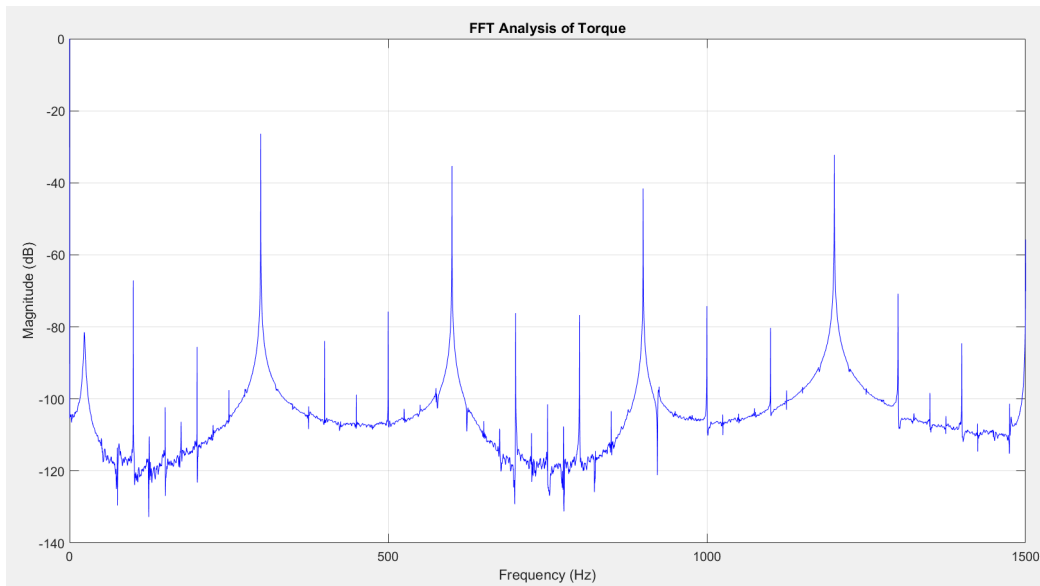


Figure 6.51: Φασματική ανάλυση της ροπής της κατάστασης υγιούς λειτουργίας.

- Περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

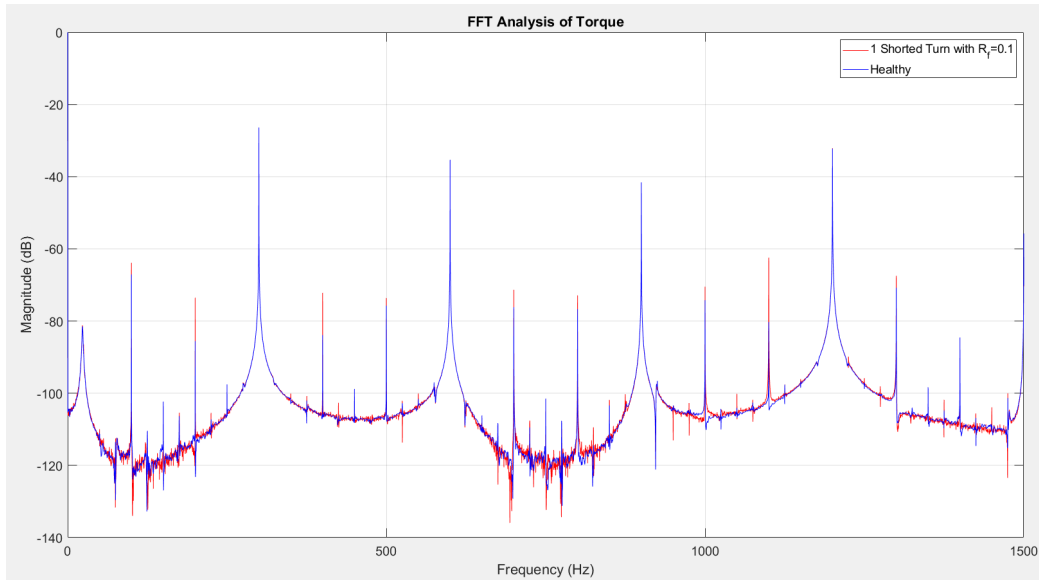


Figure 6.52: Φάσματική ανάλυση ροπής, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

Table 12: Υπογραφές φασματικής ανάλυσης της ροπής .

Συχνότητα (Hz)	Πλάτος (dB) Healthy περίπτωσης	Πλάτος (dB) Faulty περίπτωσης
100	-67.1	-63.88
200	-85.55	-73.54
400	-83.9	-72.18
1100	-80.50	-62.27

Παρατηρώντας το διάγραμμα 6.52 και τον πίνακα 12 διακρίνεται μια μικρή αύξηση στα πλάτη των συχνοτήτων  $2 * f_s = 100Hz$ ,  $4 * f_s = 200Hz$  και  $8 * f_s = 400Hz$  αλλά και μια σημαντική αύξηση της αρμονικής στα 1100 hz , η οποία παράγεται απο την lower PSH του ρεύματος στάτη. Η αύξηση αυτή είναι της τάξεως  $\simeq 20$  dB , κάνοντας την ικανή να διαγνώσει το εσωτερικό βραχυκύκλωμα.

- Περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .

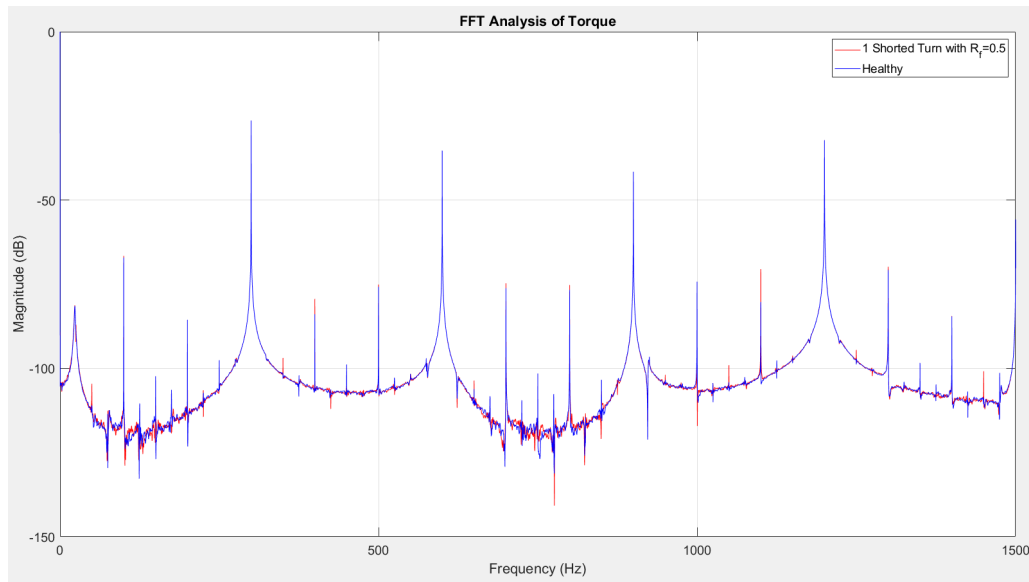


Figure 6.53: Φάσματική ανάλυση ροπής, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .

Table 13: Υπογραφές φασματικής ανάλυσης της ροπής .

Συχνότητα (Hz)	Πλάτος (dB) Healthy περίπτωσης	Πλάτος (dB) Faulty περίπτωσης
100	-67.1	-66.58
200	-85.55	-88.1
400	-83.9	-79.36
1100	-80.50	-70.51

Παρατηρώντας το διάγραμμα 6.53 και τον πίνακα 13 η μόνη αξιοσημείωτη αύξηση που διακρίνεται είναι της αρμονικής στα 1100 hz που είναι της τάξεως των 10 dB. Αυτή η αύξηση όμως δεν είναι ικανή για να συμπεράνουμε ότι υπάρχει εσωτερικό βραχυκύκλωμα.

- Περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$

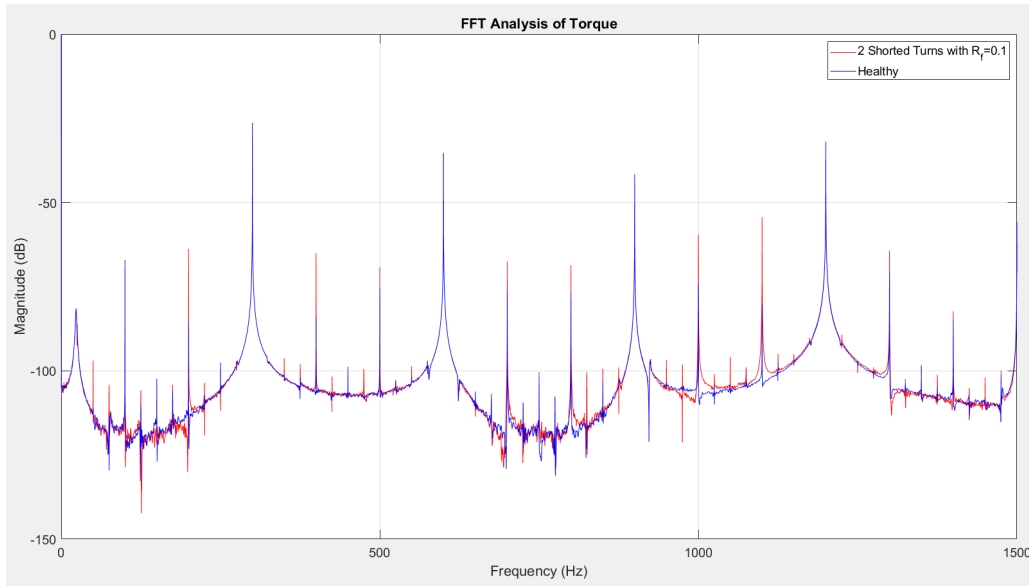


Figure 6.54: Φάσματική ανάλυση ροπής, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$

Table 14: Υπογραφές φασματικής ανάλυσης της ροπής .

Συχνότητα (Hz)	Πλάτος (dB) Healthy περίπτωσης	Πλάτος (dB) Faulty περίπτωσης
100	-67.1	-68.57
200	-85.55	-63.74
400	-83.9	-65
1000	-74.23	-59.5
1100	-80.27	-54.32

Στην περίπτωση αυτή διακρίνονται, από το σχήμα 6.54 και τον πίνακα 14, μεγαλύτερες αυξήσεις στα πλάτη των συχνοτήτων της εσφαλμένης κατάστασης. Αυτό είναι θετικό, καθώς συνεπάγεται ότι το σήμα μας δίνει περισσότερες πληροφορίες για την κατάσταση του κινητήρα. Συγκεκριμένα, οι αυξήσεις στα πλάτη των συχνοτήτων  $4 * f_s$  και  $8 * f_s$ , είναι της τάξεως 21.8 dB και 18,9 dB αντίστοιχα, ενώ επιπλέον παρατηρείται αύξηση της αρμονικής των 1100 hz κατά 26 dB. Τα παραπάνω αποτελέσματα μας δείχνουν με σιγουριά την ύπαρξη του εσωτερικού βραχυκυκλώματος.



- Περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$

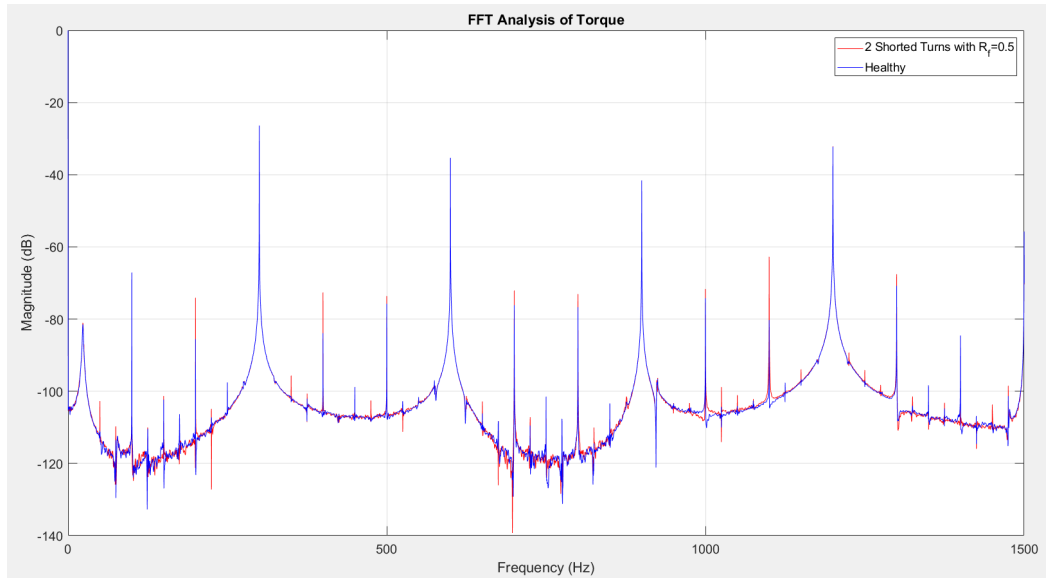


Figure 6.55: Φάσματική ανάλυση ροπής, της περίπτωσης της υγιούς λειτουργίας και της περίπτωσης σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$

Table 15: Υπογραφές φασματικής ανάλυσης της ροπής .

Συχνότητα (Hz)	Πλάτος (dB) Healthy περίπτωσης	Πλάτος (dB) Faulty περίπτωσης
100	-67.1	-68.27
200	-85.55	-74.11
400	-83.9	-72.62
1100	-80.27	-62.73

Από το διαγράμμα 6.55 και τον πίνακα 15 διακρίνουμε μικρές αυξήσεις στα πλάτη των συχνοτήτων  $4 * f_s$  και  $8 * f_s$  οι οποίες δεν είναι ικανές να διαγνώσουν το σφάλμα. Όμως παρουσιάζεται μια αύξηση της τάξεως  $\simeq 20$  dB στην αρμονική των 1100 hz που είναι ικανή να χρησιμοποιηθεί ως ένδειξη για την ύπαρξη του εσωτερικού βραχυκυκλώματος.

#### 6.4.6 Ανάλυση Της Εξωτερικής Μαγνητικής Ροής

Στην ενότητα αυτή αρχικά, έγινε συλλογή των δεδομένων απο τους πέντε αισθητήρες που έχουν τοποθετηθεί εξωτερικά απο τον κινητήρα, με σκοπό την καταγραφή της εξωτερικής μαγνητικής ροής (όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.56) και αναπαράσταση των σημάτων τους στο χρόνο.

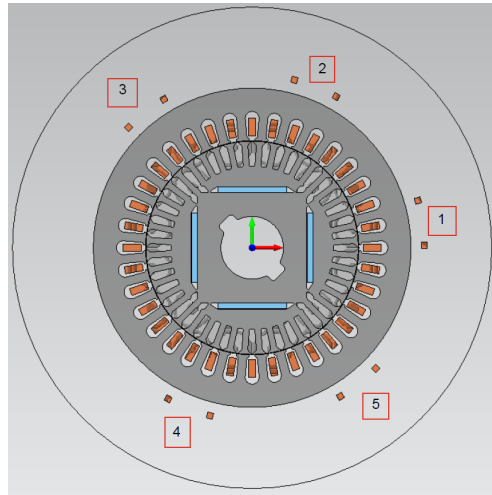


Figure 6.56: Θέση και αρίθμηση των αισθητήρων .

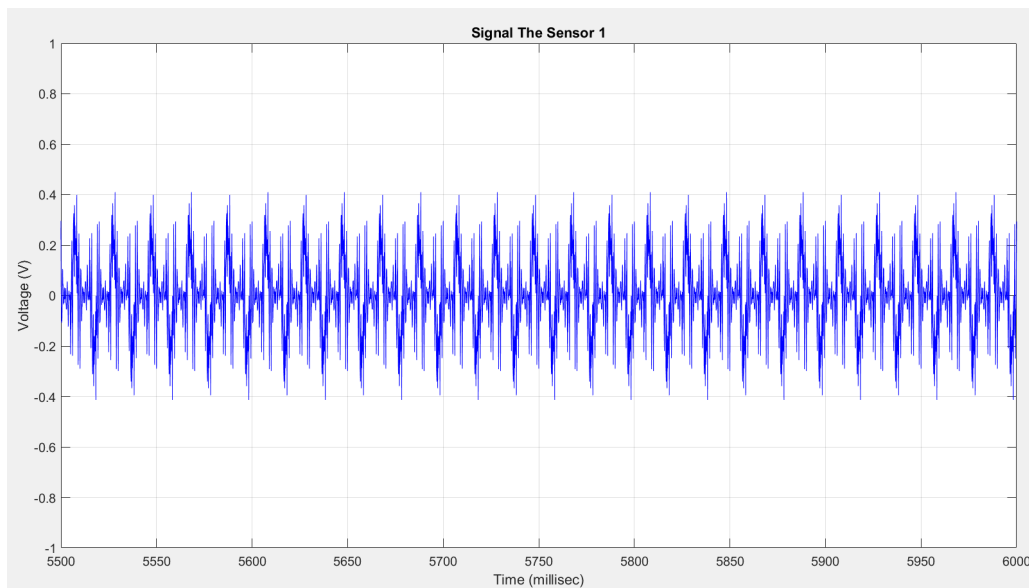


Figure 6.57: Σήμα από τον αισθητήρα 1 στην υγιή κατάσταση λειτουργίας ως προς το χρόνο.

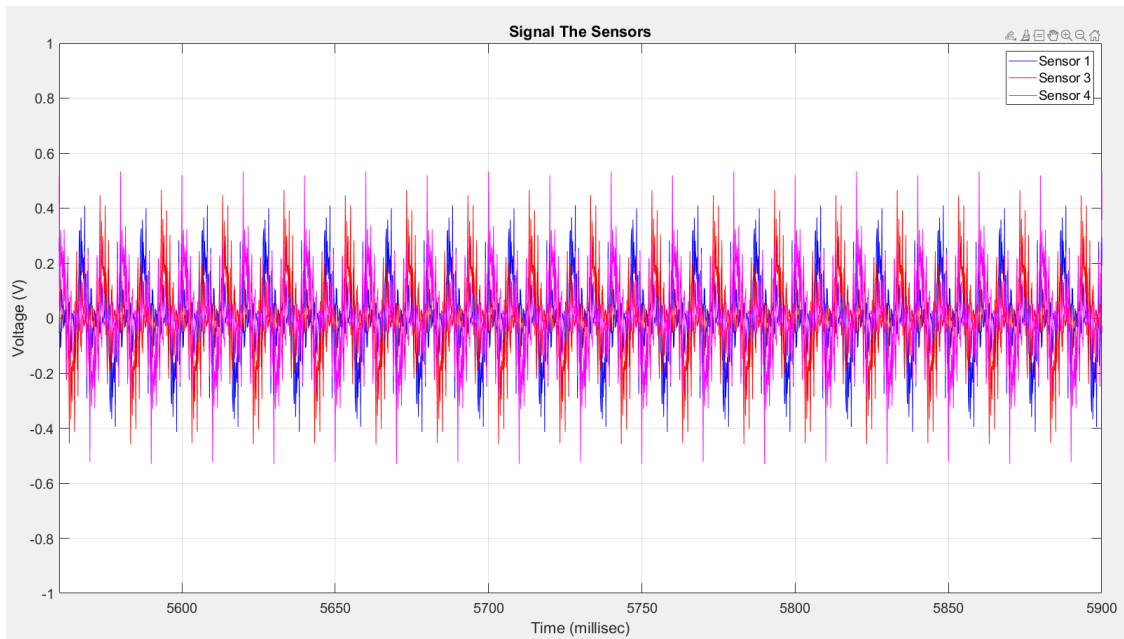


Figure 6.58: Σήματα αισθητήρων(1-3-4) με 120 μηχανικές μοίρες διαφορά μεταξύ τους στην υγιή κατάσταση λειτουργίας.

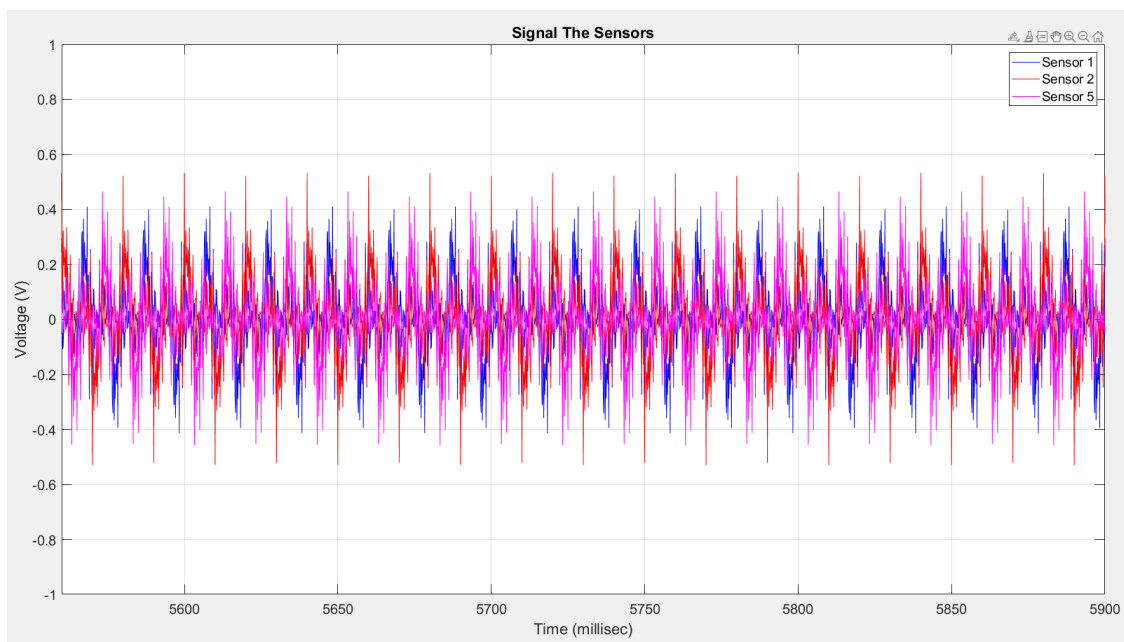


Figure 6.59: Σήματα αισθητήρων(1-2-5) με 120 ηλεκτρικές μοίρες διαφορά μεταξύ τους στην υγιή κατάσταση λειτουργίας.

Το εσωτερικό βραχυκύκλωμα σε όλες τις περιπτώσεις σφάλματος που έχουμε εξετάσει, αναπτύσσεται μεταξύ τυλιγμάτων στην αυλάκωση 2 και τυλιγμάτων στην αυλάκωση 10 (βλέπε σχήμα 5.15). Από το παραπάνω, εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι αισθητήρες 3, 4 και 5 δεν μπορούν να το ανιχνεύσουν. Για τον λόγο αυτό, το επόμενο βήμα ήταν να κάνουμε φασματική ανάλυση όλων των σημάτων από τους αισθητήρες 1 και 2, με σκοπό να δούμε αν μπορούν να ανιχνεύσουν τα εσωτερικά βραχυκυκλώματα.

- Περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

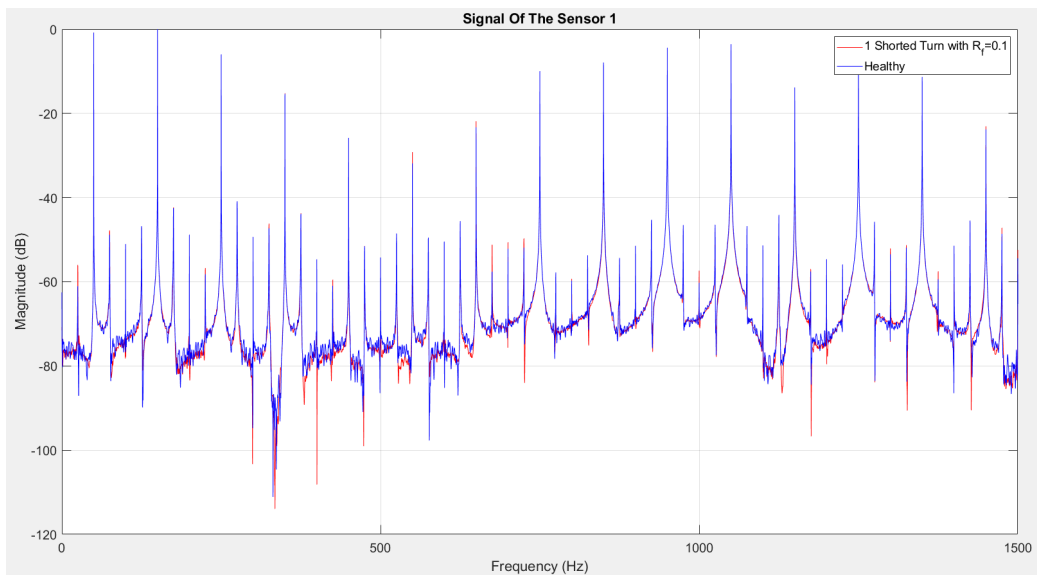


Figure 6.60: Φάσματική ανάλυση σήματος αισθητήρα 1, για τις περιπτώσεις α) υγιούς λειτουργίας και β) σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

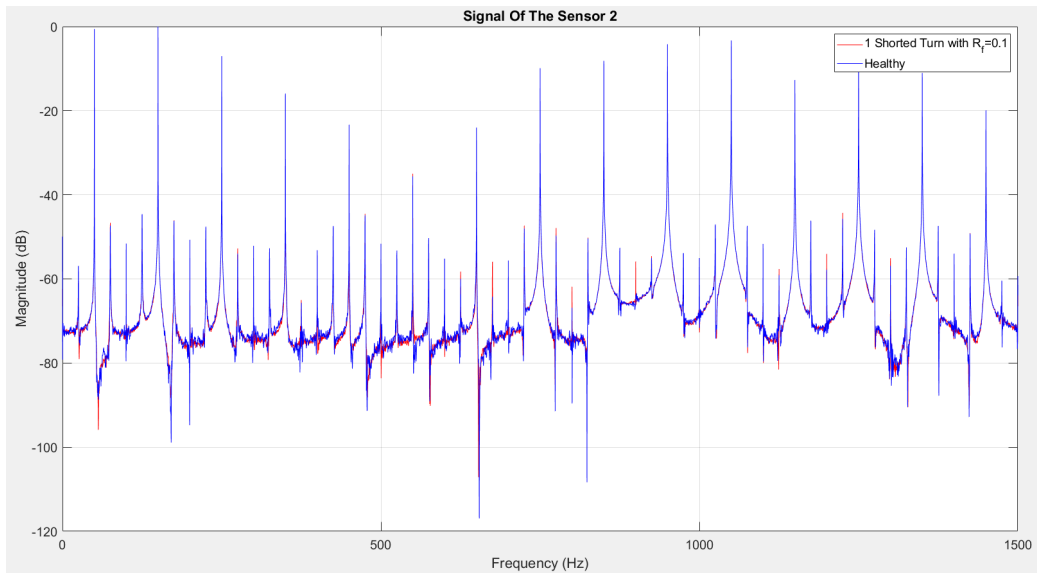


Figure 6.61: Φάσματική ανάλυση σήματος αισθητήρα 2, για τις περιπτώσεις α) υγιούς λειτουργίας και β) σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

- Περίπτωση μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .

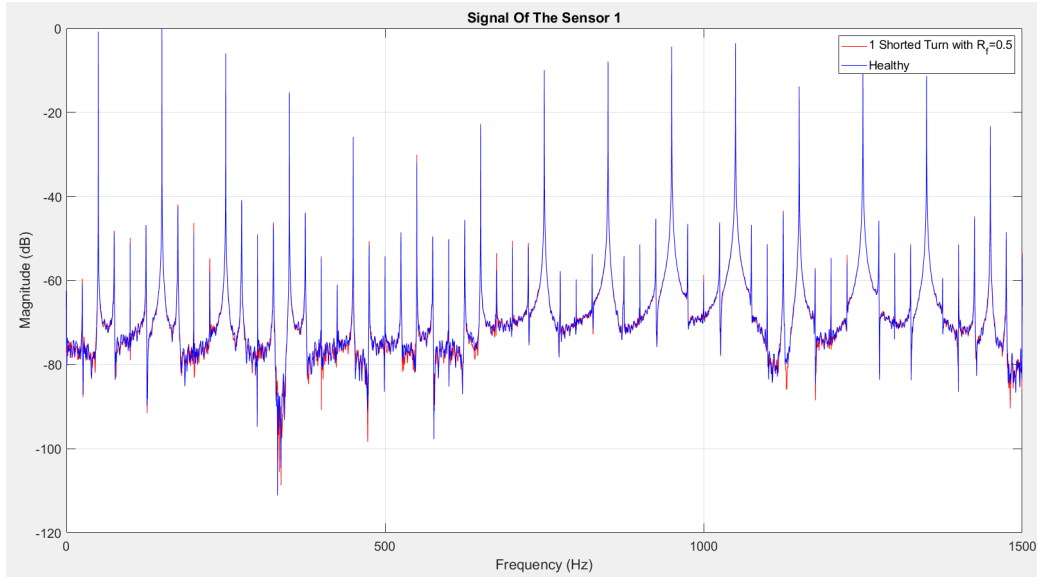


Figure 6.62: Φάσματική ανάλυση σήματος αισθητήρα 1, για τις περιπτώσεις α) υγιούς λειτουργίας και β) σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .

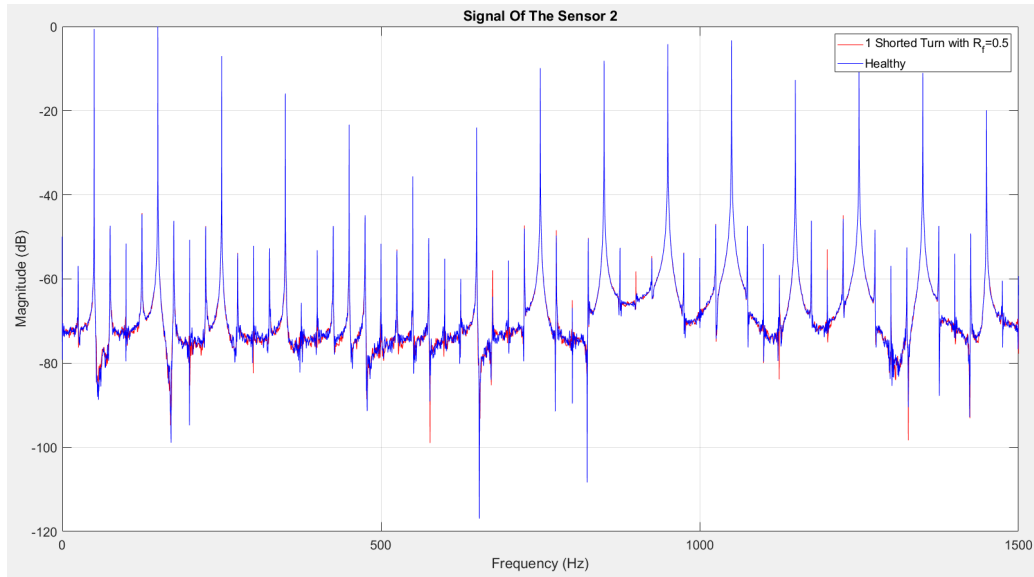


Figure 6.63: Φάσματική ανάλυση σήματος αισθητήρα 2, για τις περιπτώσεις α) υγιούς λειτουργίας και β) σφάλματος μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .

- Περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

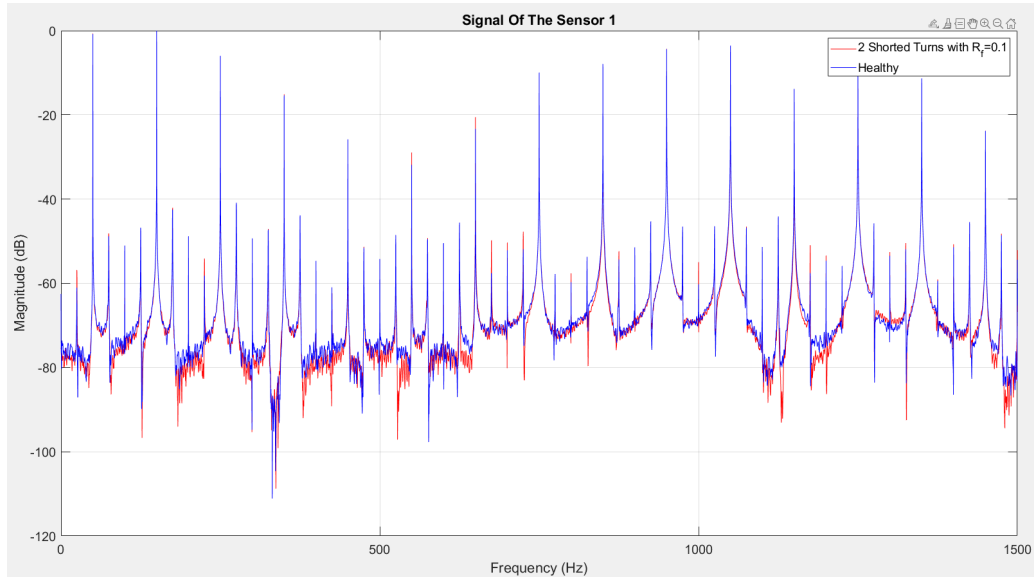


Figure 6.64: Φάσματική ανάλυση σήματος αισθητήρα 1, για τις περιπτώσεις α) υγιούς λειτουργίας και β) σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

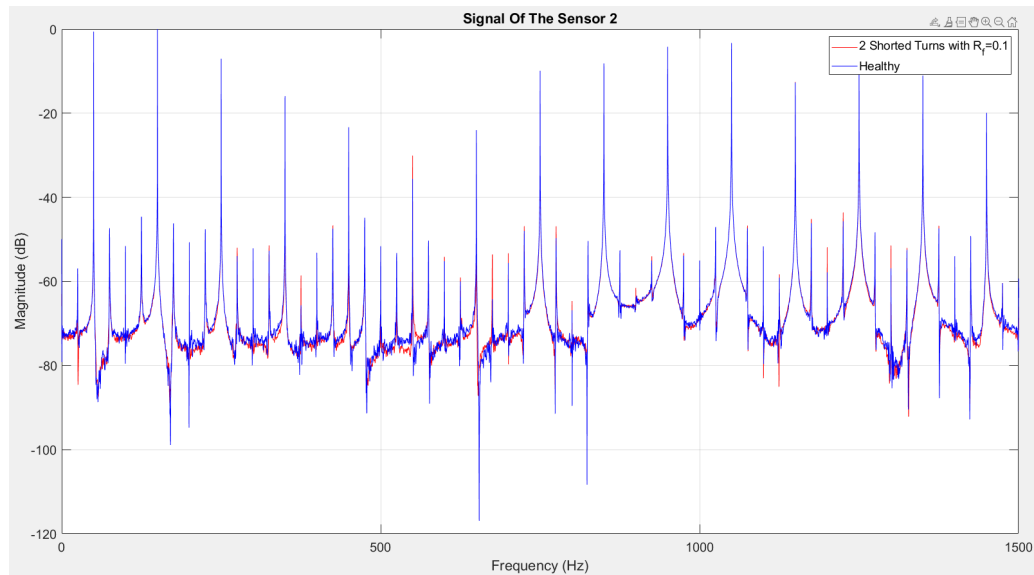


Figure 6.65: Φάσματική ανάλυση σήματος αισθητήρα 2, για τις περιπτώσεις α) υγιούς λειτουργίας και β) σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.1\Omega$ .

- Περίπτωση δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .

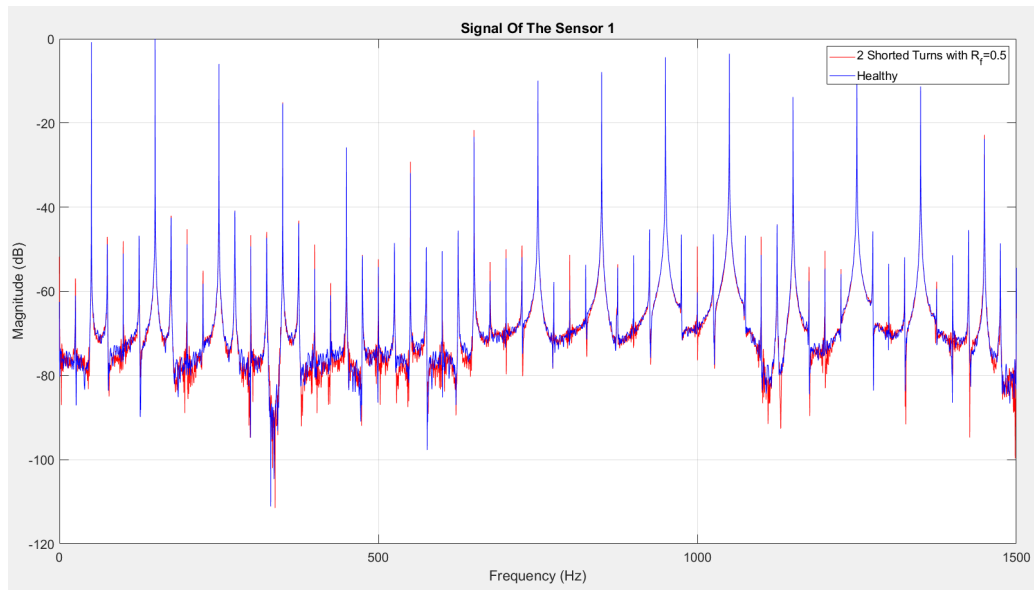


Figure 6.66: Φάσματική ανάλυση σήματος αισθητήρα 1, για τις περιπτώσεις α) υγιούς λειτουργίας και β) σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .



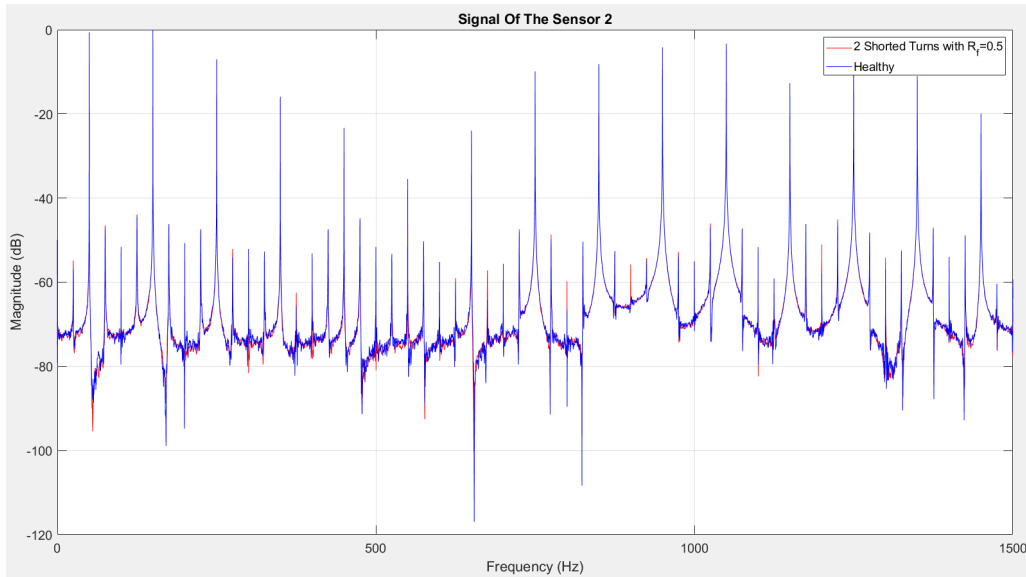


Figure 6.67: Φάσματική ανάλυση σήματος αισθητήρα 2, για τις περιπτώσεις α) υγιούς λειτουργίας και β) σφάλματος δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση σφάλματος  $R_f = 0.5\Omega$ .

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε πως η μέθοδος παρακολούθησης της εξωτερικής μαγνητικής ροής (Stray flux monitoring), δεν μπορεί να διαγνώσει τα εσωτερικά βραχυκυκλώματα. Το γεγονός αυτό συμβαίνει διότι το μαγνητικό πεδίο, το οποίο καταγράφεται από τους αισθητήρες που, είναι τοποθετημένοι στην εξωτερική επιφάνεια του κινητήρα, φτάνει σε αυτούς εξασθενημένο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, για να μπορεί να ανιχνευτεί το εσωτερικό βραχυκύκλωμα από τους εξωτερικούς αισθητήρες, ο βαθμός του σφάλματος να πρέπει να είναι πολύ μεγάλος. Η καταστροφική φύση όμως και η γρήγορη εξέλιξη των εσωτερικών βραχυκυκλωμάτων κάνει την παραπάνω υπόθεση μη ρεαλιστική.

## 7 Συμπεράσματα

---

### 7.1 Συμβάσεις Μελέτης Κινητήρα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε ένας σύγχρονος κινητήρας μονίμων μαγνητών με εκκίνηση γραμμής μέσω προσομοιώσεων με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Το γεγονός αυτό εισάγει την ανάγκη να λάβουμε υπόψιν μας κάποια δεδομένα που διαφοροποιούν τον προσομοιωμένο κινητήρα με έναν πραγματικό :

- Ο πραγματικός κινητήρας δεν έχει απολύτως ευθυγραμμισμένα μέρη σε αντίθεση με τον προσομοιωμένο κινητήρα που χαρακτηρίζεται από γεωμετρική συμμετρία.
- Στον προσομοιωμένο κινητήρα δεν λαμβάνονται υπόψιν οι δακτύλιοι βραχυκύκλωσης του κλωβού όπως επίσης ούτε και οι κεφαλές των τυλιγμάτων.
- Στον προσομοιωμένο κινητήρα δεν λαμβάνεται υπόψιν η γήρανση των υλικών του κινητήρα (π.χ. Μαγνητών) ούτε οι περιβαλλοντικές συνθήκες που βρίσκεται ο κινητήρας.
- Οι τρεις φάσεις στον κινητήρα όταν προσομοιώνεται είναι τέλεια συμμετρικές ενώ στην πραγματικότητα έχουν μια μικρή ασυμμετρία μεταξύ τους από το δίκτυο μεταφοράς.

## 7.2 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

Αρχικά, παρατηρήσαμε ότι η ανάλυση του ρεύματος στάτη στο πεδίο του χρόνου δεν μπορεί να εμφανίσει σημάδια ύπαρξης του εσωτερικού βραχυκυκλώματος. Έπειτα, χρησιμοποιήσαμε την μέθοδο MCSA, από την οποία συμπεράναμε ότι η τρίτη αρμονική δεν είναι αξιόπιστη για την διάγνωση των χαμηλών επιπέδων σοβαρότητας εσωτερικών βραχυκυκλωμάτων που εξετάσαμε. Αντιθέτως, προτείνεται η παρακολούθηση της χωρικής αρμονικής που δημιουργείται λόγω των αυλακώσεων του δρομέα (Lower Principal Slot Harmonic), η οποία παρουσίασε αύξηση πλάτους σε όλες τις περιπτώσεις σφάλματος.

Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε η μέθοδος EPVA, η οποία ήταν ικανή να διαγνώσει το σφάλμα σε όλες τις περιπτώσεις, καθώς το πλάτος της δεύτερης αρμονικής αυξανόταν όταν υπήρχε εσωτερικό βραχυκύκλωμα. Μετά αναλύθηκε το ρεύμα στάτη αρνητικής ακολουθίας, στο οποίο παρατηρήθηκε ότι, η πρώτη και η τρίτη αρμονική παρουσίασαν σημαντική αύξηση στο πλάτος τους. Ακολουθώντας, παρατηρήθηκε και αύξηση στο πλάτος της Lower PSH σε όλες τις περιπτώσεις σφάλματος, γεγονός που χαρακτηρίζει αυτήν την μέθοδο ικανή να διαγνώσει το εσωτερικό βραχυκύκλωμα .

Επιπροσθέτως, έγινε ανάλυση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής του κινητήρα και παρατηρήθηκε ότι μόνο η αρμονική που παράγεται από την Lower Principal Slot Harmonic του ρεύματος στάτη παρουσιάζει σημαντική αύξηση στο πλάτος της, έτσι ώστε να μπορούμε να διαγνώσουμε το σφάλμα. Οι αρμονικές των 100 hz , 200 hz και 400 hz δεν είναι αξιόπιστες αφού δεν παρουσίαζαν ικανά αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις σφάλματος. Τέλος, έγινε ανάλυση της εξωτερικής μαγνητικής ροής του κινητήρα, συμπεραίνοντας ότι οι περιπτώσεις σφάλματος που εξετάστηκαν είχαν χαμηλά επίπεδα σοβαρότητας με αποτέλεσμα η εξωτερική μαγνητική ροή να μην μπορεί να τα διαγνώσει.

Εν κατακλείδι, παρατηρήσαμε ότι η πιο "δύσκολη" περίπτωση διάγνωσης ήταν αυτή της μίας βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση επαφής  $R_f = 0.5\Omega$ , ενώ η πιο "εύκολη" ήταν αυτή των δύο βραχυκυκλωμένων σπειρών με αντίσταση επαφής  $R_f = 0.1\Omega$ . Από τα αποτελέσματα εμφανίστηκε η καταστροφική και γρήγορα εξελισσόμενη φύση του εσωτερικού βραχυκυκλώματος, αφού η προσθήκη μιας επιπλέον σπείρας ή η χαμηλή αντίσταση σφάλματος (καθαρό σημείο επαφής), αυξάνουν σημαντικά το ρεύμα βραχυκύκλωσης.

## 8 Βιβλιογραφία

### References

- [1] <https://www.eti.kit.edu/english/1376.php>.
- [2] <https://www.eti.kit.edu/english/1390.php>.
- [3] <https://physicsgg.me/2019/08/29/-CE--μ--faraday/>.
- [4] <https://www.oldbookillustrations.com/illustrations/gramme-machine/>.
- [5] <https://www.invent.org/inductees/nikola-tesla>.
- [6] <https://kathylovesphysics.com/history-of-two-phase-motor/>.
- [7] L. Romeral, J. C. Urresty, J.-R. R. Ruiz, and A. G. Espinosa, “Modeling of surface-mounted permanent magnet synchronous motors with stator winding interturn faults,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 5, pp. 1576–1585, 2010.
- [8] A. Mishra, P. Agarwal, and S. Srivastava, “A comprehensive analysis and implementation of vector control of permanent magnet synchronous motor,” *International Journal of Power and Energy Conversion*, vol. 5, no. 1, pp. 1–23, 2014.
- [9] J. Dong, Y. Huang, L. Jin, and H. Lin, “Comparative study of surface-mounted and interior permanent-magnet motors for high-speed applications,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 4, pp. 1–4, 2016.
- [10] A. Naina, S. Paryani, and S. S. N. Jani, “Comparison between surface-mounted and interior pm motor for ev application,” in *2021 International Conference on Intelligent Technologies (CONIT)*. IEEE, 2021, pp. 1–6.
- [11] P. Verma, H. Misra, and B. S. Rajpurohit, “Design and analysis of interior pmsm for low power ev applications in hilly terrain,” in *2022 IEEE 10th Power India International Conference (PIICON)*. IEEE, 2022, pp. 1–6.
- [12] J. Si, S. He, W. Cao, X. Xu, and G. Feng, “Electromagnetic characteristics analysis of surface-mounted and interior hybrid pmsm based on equivalent magnetic circuit method,” in *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. IEEE, 2014, pp. 1125–1131.

- [13] W.-S. Jung, H.-K. Lee, Y.-K. Lee, S.-M. Kim, J.-I. Lee, and J.-Y. Choi, “Analysis and comparison of permanent magnet synchronous motors according to rotor type under the same design specifications,” *Energies*, vol. 16, no. 3, p. 1306, 2023.
- [14] S. Naik, B. Bag, and K. Chandrasekaran, “Comparative analysis of surface mounted and interior permanent magnet synchronous motor for low rating power application,” in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2070, no. 1. IOP Publishing, 2021, p. 012119.
- [15] J. Kolehmainen and J. Ikäheimo, “Motors with buried magnets for medium-speed applications,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 1, pp. 86–91, 2008.
- [16] Α. Μπαρμπατζά, “Ανάλυση σφαλμάτων σε μηχανές μόνιμων μαγνητών αξονικής ροής για εφαρμογές ανεμογεννητριών με τη χρήση της τρισιδιάστατης μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων,” Ph.D. dissertation, Πανεπιστήμιο Πατρών. Σχολή Πολυτεχνική. Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και ..., 2021.
- [17] Κ. Λάσκαρης, “σχεδιασμός και κατασκευή κινητήρων μονίμων μαγνητών για ηλεκτρικά οχήματα,” Ph.D. dissertation, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ). Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και ..., 2011.
- [18] <https://www.controleng.com/understanding-permanent-magnet-motors/#:~:text=A%20PM%20motor%20can%20be,or%20inside%20of%20the%20rotor.>
- [19] <https://www.youtube.com/watch?v=HSd8Xp7OIh0&t=1s>.
- [20] <https://tymagnets.com/surface-permanent-magnet-motors-vs-interior-permanent-magnet-motors/>.
- [21] <https://www.everythingpe.com/community/what-is-a-permanent-magnet-synchronous-motor>.
- [22] <https://about-motors.com/motorcontrol/pmsm/>.
- [23] F. Lazăr, A. Simion, L. Livadaru, and I. Daniel, “F.e.m. analysis of a 3 kw line-start permanent magnet synchronous machine,” in *2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, 2014, pp. 402–405.
- [24] R. F. McElveen, R. Holub, and W. E. Martin, “Replacing induction motors with caged rotor permanent magnet motors: Application considerations & cost analysis,” in *2017 Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC)*. IEEE, 2017, pp. 435–442.

- [25] T. Marcic, B. Stumberger, G. Stumberger, M. Hadziselimovic, P. Virtic, and D. Dolinar, "Line-starting three-and single-phase interior permanent magnet synchronous motors—direct comparison to induction motors," *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 44, no. 11, pp. 4413–4416, 2008.
- [26] T. Marcic, B. Stumberger, and G. Stumberger, "Comparison of induction motor and line-start ipm synchronous motor performance in a variable-speed drive," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 6, pp. 2341–2352, 2012.
- [27] R. McElveen, M. Melfi, and R. Daugherty, "Line start permanent magnet motors-starting, standards and application guidelines," in *2014 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC)*. IEEE, 2014, pp. 129–139.
- [28] M. J. Melfi, S. D. Umans, and J. E. Atem, "Viability of highly efficient multi-horsepower line-start permanent-magnet motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 1, pp. 120–128, 2014.
- [29] F. R. Ismagilov, V. E. Vavilov, and D. V. Gusakov, "Line-start permanent magnet synchronous motor for aerospace application," in *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*. IEEE, 2018, pp. 1–5.
- [30] A. H. Isfahani and S. Vaez-Zadeh, "Line start permanent magnet synchronous motors: Challenges and opportunities," *Energy*, vol. 34, no. 11, pp. 1755–1763, 2009.
- [31] A. Smith, E. Peralta-Sanchez, and S. Purbrook, "Line-start permanent magnet motors for pump applications," in *3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2006)*. IET, 2006, pp. 526–530.
- [32] W. Fei, P. C.-K. Luk, J. Ma, J.-X. Shen, and G. Yang, "A high-performance line-start permanent magnet synchronous motor amended from a small industrial three-phase induction motor," *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 45, no. 10, pp. 4724–4727, 2009.
- [33] R. T. Ugale, B. N. Chaudhari, and A. Pramanik, "Overview of research evolution in the field of line start permanent magnet synchronous motors," *IET Electric Power Applications*, vol. 8, no. 4, pp. 141–154, 2014.
- [34] A. Chama, A. J. Sorgdrager, and R.-J. Wang, "Analytical synchronization analysis of line-start permanent magnet synchronous motors," *Progress In Electromagnetics Research M*, vol. 48, pp. 183–193, 2016.

- [35] S. Rabbi and M. Rahman, “Transient analysis of a line start hysteresis interior permanent magnet motor,” in *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. IEEE, 2014, pp. 4866–4873.
- [36] T. Marcic, “A short review of energy-efficient line-start motor design,” *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 87, no. 3, pp. 119–122, 2011.
- [37] D. Fonseca, C. Santos, and A. J. M. Cardoso, “Modelling of a line-start permanent magnet synchronous motor, using empirical parameters,” in *Proceedings of the International Conference on Engineering ICEUBI2017, Covilhã, Portugal*, 2017, pp. 5–7.
- [38] P. Millett, “Brushless vs brushed dc motors: When and why to choose one over the other,” *MPS*, 2022.
- [39] N. N. Mustafi, “An overview of hybrid electric vehicle technology,” *Engines and Fuels for Future Transport*, pp. 73–102, 2021.
- [40] J. Cros, G. Sincero, and P. Viarouge, “Design method for brush permanent magnet dc motors,” in *2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. IEEE, 2009, pp. 1625–1632.
- [41] D. Mohanraj, R. Arul david, R. Verma, K. Sathiyasekar, A. B. Barnawi, B. Chokkalingam, and L. Mihet-Popa, “A review of bl dc motor: state of art, advanced control techniques, and applications,” *Ieee Access*, vol. 10, pp. 54 833–54 869, 2022.
- [42] M. R. Hazari, E. Jahan, M. E. Siraj, M. T. I. Khan, and A. M. Saleque, “Design of a brushless dc (bl dc) motor controller,” in *2014 International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology*. IEEE, 2014, pp. 1–6.
- [43] D. S. Yadav and M. Manisha, “Electric propulsion motors: A comparative review for electric and hybrid electric vehicles,” in *2022 IEEE International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics (ICDCECE)*, 2022, pp. 1–6.
- [44] S. Prabhu, V. Arun, M. Balaji, V. Kalaimagal, A. Manikandan, and V. Chandrasekar, “Electromagnetic analysis on brushless dc hub motor for electrified transportation systems,” in *2023 9th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, 2023, pp. 179–183.
- [45] M. Shafiei, S. Niapour, G. Garjan, M. R. Feyzi, S. Danyali, and M. Bahrami Kouhshahi, “Review of permanent-magnet brushless dc motor basic drives based on analysis and simulation study,” 07 2015.

- [46] <https://blog.orientalmotor.com/technical-manual-series-brushless-motor-structure-and-principles>.
- [47] <https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-brushless-motor-and-esc-work/#what-is-brushless-dc-motor>.
- [48] <https://blog.orientalmotor.com/technical-manual-series-brushless-motor-structure-and-rotation-principles>.
- [49] F. Chai, Y. Bi, and L. Chen, “A comparison between axial and radial flux permanent magnet in-wheel motors for electric vehicle,” in *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, vol. 1, 2020, pp. 1685–1690.
- [50] V. de Aquino Neumann and R. P. Homrich, “Comparison between radial and axial permanent magnet generators for low speed application,” in *2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, 2014, pp. 251–256.
- [51] D. Slutskiy, S. H. Aung, and S. Basnet, “Comparison of axial and radial flux permanent magnet machines,” in *2022 North American Power Symposium (NAPS)*, 2022, pp. 1–6.
- [52] A. Echle, A. Neubauer, and N. Parspour, “Design and comparison of radial flux and axial flux brushless dc motors for power tool applications,” in *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2018, pp. 125–130.
- [53] Y. Chen, P. Pillay, and A. Khan, “Pm wind generator topologies,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 6, pp. 1619–1626, 2005.
- [54] L. Shao, R. Navaratne, M. Popescu, and G. Liu, “Design and construction of axial-flux permanent magnet motors for electric propulsion applications—a review,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 158 998–159 017, 2021.
- [55] B. Peng and X. Zhuang, “Design and performance analysis of axial flux permanent magnet machines with double-stator dislocation using a combined wye-delta connection,” *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 53–59, 2022.
- [56] H. Wang, X. Zeng, J. F. Eastham, and X. Pei, “Axial flux permanent magnet motor topologies magnetic performance comparison,” *Energies*, vol. 17, no. 2, 2024.
- [57] A. Mahmoudi, S. Kahourzade, M. N. Uddin, N. A. Rahim, and W. P. Hew, “Line-start axial-flux permanent-magnet synchronous motor,” in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2013, pp. 3210–3216.



- [58] A. Kallaste and A. Kilk, “Permanent magnet axial-flux generator with toroidal winding,” 2007.
- [59] N. Gadiyar, J. Van Verdegheem, and E. L. Severson, “A review of axial flux permanent magnet machine technology,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 59, no. 4, pp. 3920–3933, 2023.
- [60] <https://lammotor.com/axial-flux-motor-vs-radial-flux-moto/>.
- [61] <https://traxial.com/uncategorized/axial-flux-motor-vs-radial-flux-motor-a-focus-on-magnetic-field-orientation/>.
- [62] <https://www.emworks.com/blog/electromechanical/axial-and-radial-flux-permanent-magnet-machines-what-is-the-difference>.
- [63] <https://www.oemoffhighway.com/electronics/power-systems/electric-motors/article/22922172/turntide-technologies-axial-flux-motors-moving-to-mainstream-applications>.
- [64] Y. Duan and H. Toliyat, “A review of condition monitoring and fault diagnosis for permanent magnet machines,” in *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012, pp. 1–4.
- [65] H. Li, Z.-Q. Zhu, Z. Azar, R. Clark, and Z. Wu, “Fault detection of permanent magnet synchronous machines: An overview,” *Energies*, vol. 18, no. 3, 2025.
- [66] J. Zhao, X. Guan, C. Li, Q. Mou, and Z. Chen, “Comprehensive evaluation of inter-turn short circuit faults in pmsm used for electric vehicles,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 611–621, 2021.
- [67] Z. Wang, J. Yang, H. Ye, and W. Zhou, “A review of permanent magnet synchronous motor fault diagnosis,” in *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 2014, pp. 1–5.
- [68] Y. Chen, S. Liang, W. Li, H. Liang, and C. Wang, “Faults and diagnosis methods of permanent magnet synchronous motors: A review,” *Applied Sciences*, vol. 9, no. 10, 2019.
- [69] T. Orłowska-Kowalska, M. Wolkiewicz, P. Pietrzak, M. Skowron, P. Ewert, G. Tar-chala, M. Krzysztofiak, and C. T. Kowalski, “Fault diagnosis and fault-tolerant control of pmsm drives—state of the art and future challenges,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 59 979–60 024, 2022.

- [70] M. Karami, N. Mariun, M. Z. A. Ab Kadir, M. A. M. Radzi, and N. Misron, "Analysis of rotor asymmetry fault in three-phase line start permanent magnet synchronous motor," *Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics*, vol. 34, no. 4, pp. 483–498, 2021.
- [71] E. A. Bhuiyan, M. M. A. Akhand, S. K. Das, M. F. Ali, Z. Tasneem, M. R. Islam, D. Saha, F. R. Badal, M. H. Ahamed, and S. Moyeen, "A survey on fault diagnosis and fault tolerant methodologies for permanent magnet synchronous machines," *International Journal of Automation and Computing*, vol. 17, pp. 763–787, 2020.
- [72] A. Usman, N. T. Doiphode, and B. S. Rajpurohit, "Stator winding faults investigation in permanent magnet synchronous motor using motor signatures: Part i," in *2019 international conference on electrical drives & power electronics (EDPE)*. IEEE, 2019, pp. 160–168.
- [73] M. Rezazadeh Mehrjou, N. Mariun, N. Misron, M. A. M. Radzi, and S. Musa, "Broken rotor bar detection in ls-pmsm based on startup current analysis using wavelet entropy features," *Applied sciences*, vol. 7, no. 8, p. 845, 2017.
- [74] M. Izadi, N. Mariun, M. R. Mehrjou, M. Z. A. Ab Kadir, N. Misron, and M. A. M. Radzi, "Broken rotor bar fault detection in line start permanent magnet synchronous motor using transient current signal," in *2016 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*. IEEE, 2016, pp. 51–54.
- [75] M. R. Mehrjou, N. Mariun, M. H. Marhaban, and N. Misron, "Rotor fault condition monitoring techniques for squirrel-cage induction machine—a review," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 25, no. 8, pp. 2827–2848, 2011.
- [76] A. Choudhary, S. Shimi, and A. Akula, "Bearing fault diagnosis of induction motor using thermal imaging," in *2018 international conference on computing, power and communication technologies (GUCON)*. IEEE, 2018, pp. 950–955.
- [77] A. Nabhan, N. Ghazaly, A. Samy, and M. Mousa, "Bearing fault detection techniques-a review," *Turkish Journal of Engineering, Sciences and Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 1–18, 2015.
- [78] J. A. Rosero, J. Cusido, A. Garcia, J. Ortega, and L. Romeral, "Broken bearings and eccentricity fault detection for a permanent magnet synchronous motor," in *IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*. IEEE, 2006, pp. 964–969.
- [79] J. Hong, S. Park, D. Hyun, T.-j. Kang, S. B. Lee, C. Kral, and A. Haumer, "Detection and classification of rotor demagnetization and eccentricity faults for pm synchronous

- motors,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 3, pp. 923–932, 2012.
- [80] J.-X. Shen, P. Li, M.-J. Jin, and G. Yang, “Investigation and countermeasures for demagnetization in line start permanent magnet synchronous motors,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 7, pp. 4068–4071, 2013.
- [81] N. Yassa, M. Rachek, and H. Houassine, “Motor current signature analysis for the air gap eccentricity detection in the squirrel cage induction machines,” *Energy Procedia*, vol. 162, pp. 251–262, 2019.
- [82] <https://www.bdsbearing.com/blog/bearing-failures>.
- [83] <https://www.astbearings.com/failure-analysis.html>.
- [84] J. Faiz and H. Nejadi-Koti, “Demagnetization fault indexes in permanent magnet synchronous motors—an overview,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 4, pp. 1–11, 2015.
- [85] P. Zhou, D. Lin, Y. Xiao, N. Lambert, and M. Rahman, “Temperature-dependent demagnetization model of permanent magnets for finite element analysis,” *IEEE transactions on magnetics*, vol. 48, no. 2, pp. 1031–1034, 2012.
- [86] F. Mahmouditabar, A. Vahedi, and F. Marignetti, “The demagnetization phenomenon in pm machines: principles, modeling, and design considerations,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 47 750–47 773, 2023.
- [87] M. A. S. Nejad and M. Taghipour, “Inter-turn stator winding fault diagnosis and determination of fault percent in pmsm,” in *2011 IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC)*, 2011, pp. 128–131.
- [88] J. Rosero, L. Romeral, J. Cusido, A. Garcia, and J. Ortega, “On the short-circuiting fault detection in a pmsm by means of stator current transformations,” in *2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 2007, pp. 1936–1941.
- [89] S. Grubic, J. M. Aller, B. Lu, and T. G. Habetler, “A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, pp. 4127–4136, 2008.
- [90] J. Hang, S. Ding, J. Zhang, M. Cheng, W. Chen, and Q. Wang, “Detection of interturn short-circuit fault for pmsm with simple fault indicator,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 4, pp. 1697–1699, 2016.

- [91] P. Pietrzak and M. Wolkiewicz, "On-line detection and classification of pmsm stator winding faults based on stator current symmetrical components analysis and the knn algorithm," *Electronics*, vol. 10, no. 15, 2021.
- [92] —, "Comparison of selected methods for the stator winding condition monitoring of a pmsm using the stator phase currents," *Energies*, vol. 14, no. 6, 2021.
- [93] S. Wei, X. Zhang, Y. Xu, Y. Fu, Z. Ren, and F. Li, "Extended park's vector method in early inter-turn short circuit fault detection for the stator windings of offshore wind doubly-fed induction generators," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 18, pp. 3905–3912, 2020.
- [94] D. S. B. Fonseca, C. M. C. Santos, and A. J. M. Cardoso, "Stator faults modeling and diagnostics of line-start permanent magnet synchronous motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 3, pp. 2590–2599, 2020.
- [95] A. Paz Parra, M. C. Amaya Enciso, J. Olaya Ochoa, and J. A. Palacios Peñaranda, "Stator fault diagnosis on squirrel cage induction motors by esa and epva," in *2013 Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, 2013, pp. 1–6.
- [96] C. Bouchareb and M. S. Nait-Said, "Pmsm model with phase-to-phase short-circuit and diagnosis by esa and epva," *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 14, no. 5, p. 522, 2016.
- [97] C. Jiang, S. Li, and T. G. Habetler, "A review of condition monitoring of induction motors based on stray flux," in *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2017, pp. 5424–5430.
- [98] V. Gurusamy, E. Bostanci, C. Li, Y. Qi, and B. Akin, "A stray magnetic flux-based robust diagnosis method for detection and location of interturn short circuit fault in pmsm," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1–11, 2021.
- [99] Y. Park, C. Yang, J. Kim, H. Kim, S. B. Lee, K. N. Gyftakis, P. A. Panagiotou, S. H. Kia, and G.-A. Capolino, "Stray flux monitoring for reliable detection of rotor faults under the influence of rotor axial air ducts," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 10, pp. 7561–7570, 2019.
- [100] M. Awadallah, M. Morcos, S. Gopalakrishnan, and T. Nehl, "A neuro-fuzzy approach to automatic diagnosis and location of stator inter-turn faults in csi-fed pm brushless dc motors," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 2, pp. 253–259, 2005.

- [101] Κ. Γυφτάκης, “Διάγνωση Ηλεκτρικών Σφαλμάτων Στάτη σε Επαγωγικούς Κινητήρες,” Διάλεξη στο πλαίσιο του μαθήματος: Ειδικά Κεφάλαια Ηλεκτρικών Μηχανών.
- [102] J. Zhao, X. Guan, C. Li, Q. Mou, and Z. Chen, “Comprehensive evaluation of inter-turn short circuit faults in pmsm used for electric vehicles,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 611–621, 2021.
- [103] Κ. Γυφτάκης, “Παρακολούθηση Κατάστασης, Διάγνωση και Πρόγνωση Σφαλμάτων σε ΗΜ – ΕΙΣΑΓΩΓΗ,” Διάλεξη στο πλαίσιο του μαθήματος: Ειδικά Κεφάλαια Ηλεκτρικών Μηχανών.
- [104] S. A. Bednarz, M. Dybkowski, and M. Wolkiewicz, “Identification of the stator faults in the induction motor drives using parameter estimator,” in *2018 IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, 2018, pp. 688–693.
- [105] Κ. Γυφτάκης, “Διάγνωση Ηλεκτρικών Σφαλμάτων Δρομέα σε Επαγωγικούς Κινητήρες,” Διάλεξη στο πλαίσιο του μαθήματος: Ειδικά Κεφάλαια Ηλεκτρικών Μηχανών.
- [106] Z. Gao, C. Cecati, and S. X. Ding, “A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques—part i: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 6, pp. 3757–3767, 2015.
- [107] Κ. Γυφτάκης, “Ηλεκτρομαγνητισμός και Μαγνητικά Κυκλώματα,” Διάλεξη στο πλαίσιο του μαθήματος: Ηλεκτρικές Μηχανές.
- [108] <https://www.youtube.com/watch?v=EZEvJ97JvqU>.
- [109] <https://www.hellenicaworld.com/Science/Physics/gr/SkinEffect.html>.
- [110] <https://www.hellenicaworld.com/Science/Physics/gr/Dinorevmata.html>.
- [111] C. Clement, “Skin effect in electrical conductors: Any commercially viable solution,” *Universidade of Aberdeen*, 2014.
- [112] N. Fatsea, T. A. Garcia-Calva, D. Morinigo-Sotelo, and K. N. Gyftakis, “Rotor faults condition monitoring in direct on line start permanent magnet motors,” in *2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. IEEE, 2024, pp. 1–6.
- [113] <https://www.alamy.com/cylinder-induction-machine-electric-generator-with-a-double-t-armature-winding-by-werner-von-siemens-19th-century-image572836516.html>.