
Αποφυγή Εσφαλμένα Αρνητικών Διαγνώσεων Σφαλμάτων Δρομέα σε Βιομηχανικούς Επαγωγικούς Κινητήρες

Του φοιτητή τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών του Πολυτεχνείου Κρήτης

Τραχαλάκης Νικόλαος



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

6 Νοεμβρίου 2024

Avoidance of False Negative Rotor False Diagnoses in Industrial Induction Motors

*By the student of the Department
"Electrical and Computer Engineering"
Technical University of Crete*

Trachalakis Nikolaos



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

6 November 2024

Πιστοποίηση

Πιστοποιείται ότι το έργο που περιλαμβάνεται σε αυτήν τη διπλωματική εργασία με τίτλο “Αποφυγή Εσφαλμένα Αρνητικών Διαγνώσεων Σφαλμάτων Δρομέα σε Βιομηχανικούς Επαγωγικούς Κινητήρες” του Τραχαλάκης Νικόλαος πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη των καθηγητών και ότι δεν έχει υποβληθεί αλλού για την απόκτηση πτυχίου.

Γυφτάκης Κωνσταντίνος
Αναπληρωτής Καθηγητής
Πολυτεχνείο Κρήτης
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Γεώργιος Πέππας
Επίκουρος Καθηγητής
Πολυτεχνείο Κρήτης
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Panagiotou Panagiotis
Lecturer
University of Sheffield
Department of Electronics Engineering

Περίληψη

Ένα από τα πιο συχνά προβλήματα που παρουσιάζουν οι ηλεκτρικές μηχανές και μπορούν να διαγνωστούν πριν προκαλέσουν σοβαρές βλάβες, λόγω της αργής τους εξέλιξης, είναι τα ηλεκτρικά σφάλματα του δρομέα. Χάρη στην φύση τους, αφήνουν περιθώρια στην διαγνωστική επιστήμη των ηλεκτρικών μηχανών να μελετηθούν και να ληφθούν οι απαραίτητες αποφάσεις για να αποφευχθούν οι περιττές διακοπές λειτουργίας αλλά και οι καταστροφικές επιπτώσεις τους στη μηχανή και στα υπόλοιπα συνδεδεμένα συστήματα σε αυτή, αποφεύγοντας έτσι σημαντικές δαπάνες και κόστη συντήρησης.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εστιάζει σε ασύγχρονες μηχανές κλωβού, οι οποίες συχνά παρουσιάζουν σπασίματα ή ραγίσματα στις μπάρες και στους δακτυλίους σύνδεσης του δρομέα. Σε πολλές περιπτώσεις, με την εφαρμογή παραδοσιακών διαγνωστικών μεθόδων, τέτοια σφάλματα δεν μπορούν να εντοπιστούν μέχρι να προκαλέσουν σοβαρές επιπτώσεις στην λειτουργικότητα της μηχανής. Αυτό το φαινόμενο είναι ακόμα πιο έντονο σε περιπτώσεις σπασμένων μη γειτονικών μπαρών, που οι ασυμμετρίες του πεδίου που προκαλούν η κάθε μία από αυτές αλληλοαναιρούνται και έτσι προκύπτουν εσφαλμένα αρνητικές διαγνώσεις ενώ στην πραγματικότητα υπάρχει πρόβλημα στη μηχανή.

Μια λύση που έχει δώσει η βιβλιογραφία μέχρι τώρα για αυτές τις περιπτώσεις, είναι οι μετρήσεις ρεύματος και μαγνητικής ροής σε μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, όπως για παράδειγμα κατά την εκκίνηση, όπου το αρμονικό περιεχόμενο των σπασμένων μπαρών διακρίνεται ανάμεσα στις φυσιολογικές αρμονικές της μηχανής κατά την μεταβολή της ταχύτητας. Σε πολλές πρακτικές εφαρμογές όμως στη βιομηχανία, η λύση αυτή είναι πολύ δαπανηρή και ασύμφορη, καθώς ο αριθμός των εκκινήσεων κάποιων μηχανών συνδέεται άμεσα με την διάρκεια ζωής τους ή την απώλεια παραγωγής για κάποιο σημαντικό χρονικό διάστημα.

Μια λύση στο παραπάνω πρόβλημα έρχεται να δώσει η παρούσα διπλωματική εργασία, βασισμένη στην ανάλυση της μαγνητικής ροής μηδενικής ακολουθίας κατά τη μόνιμη λειτουργία. Για την διεκπεραίωση αυτής της έρευνας, σχεδιάστηκε επαγωγικός κινητήρας 400V σε λογισμικό ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (**Simcenter Magnet**), το οποίο προσομοίωσε την εκκίνηση και την σταθερή λειτουργία της μηχανής στην υγιή περίπτωση αλλά και σε περιπτώσεις με σπασμένες μπάρες. Τα δεδομένα αυτών των περιπτώσεων υποβλήθηκαν σε επεξεργασία μέσω του λογισμικού **Matlab**, και εξετάστηκε η αξιοπιστία της παραπάνω διαγνωστικής μεθόδου σε σχέση με όλες τις προηγούμενες, τόσο κατά την εκκίνηση όσο και κατά τη σταθερή λειτουργία της μηχανής.

Abstract

One of the most common problems that electric machines exhibit, which can be diagnosed before causing serious damage due to their slow progression, are rotor electrical faults. Thanks to their nature, these faults provide diagnostic science with the opportunity to study them and take the necessary actions to avoid unnecessary operational interruptions as well as the catastrophic effects on the machine and other connected systems, thereby avoiding significant maintenance costs.

This thesis focuses on squirrel-cage induction motors, which often experience breaks or cracks in the bars and end rings of the rotor. In many cases, traditional diagnostic methods fail to detect such faults until they cause severe impacts on the machine's functionality. This phenomenon is even more pronounced in cases of non-adjacent broken bars, where the field asymmetries caused by each broken bar cancel each other out, leading to false negative diagnoses even though a fault exists in the machine.

One solution provided in the literature for such cases involves measuring current and magnetic flux during transient operation, such as during startup, where the harmonic content caused by the broken bars stands out among the machine's normal harmonics as the speed changes. However, in many industrial applications, this solution is costly and impractical, as the number of starts for certain machines is directly tied to their lifespan or may result in production loss for a significant period.

This thesis proposes a solution to this problem, based on the analysis of zero-sequence magnetic flux during steady-state operation. For the execution of this research, we modeled an induction motor 400V in finite element analysis software (Simcenter Magnet), which simulated both the startup and steady-state operation of the motor in healthy conditions as well as in cases with broken bars. The data from these cases were processed using Matlab software, and the reliability of this diagnostic method was examined in comparison to previous methods, both during startup and steady-state operation of the machine.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Γυφτάκη Κωνσταντίνο, που αποτέλεσε πηγή έμπνευσης για εμένα και με έκανε να αγαπήσω τον τομέα της Ενέργειας και των Ηλεκτρικών Μηχανών. Η συνεχής καθοδήγηση, η στήριξη και οι γνώσεις του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και η αφοσίωσή του στα ακαδημαϊκά δρόμενα της σχολής συνέβαλαν καθοριστικά στην ποιότητα και την αποτελεσματικότητα της εργασίας αυτής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον Δόκτορα Παναγιώτου Παναγιώτη, που ενώ βρισκόταν στην άλλη άκρη της Ευρώπης με πολλές υποχρεώσεις πάνω στην δική του ακαδημαϊκή καριέρα, πάντα ήταν διαθέσιμος και πρόθυμος να προσφέρει την πολύτιμη βοήθεια του. Μαζί με τον Επίκουρο Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, Πέππα Γεώργιο, ήταν πάντα διαθέσιμοι να καθοδηγήσουν την έρευνά μου, βελτιώνοντας σημαντικά την αποτελεσματικότητά της.

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω επίσης και στον συνεργάτη μου, Σαλίνα Μάριο, για την έντονη αφοσίωση του, τα ξενύχτια που κάναμε προσπαθώντας να βελτιστοποιήσουμε τα αποτελέσματα της έρευνας, την άψογη συνεργασία και την απίστευτα χρήσιμη συμβολή του και υποστήριξη του καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, την κοπέλα μου και τους φίλους μου, των οποίων η αδιάλειπτη υποστήριξη και αγάπη με συνόδευσαν σε κάθε βήμα αυτής της ακαδημαϊκής διαδρομής. Η ενθάρρυνση και η κατανόησή τους ήταν το στήριγμά μου στις δύσκολες στιγμές και μου έδωσαν τη δύναμη να συνεχίσω.

Σας ευχαριστώ όλους που σταθήκατε δίπλα μου και αποτελέσατε μέρος αυτού του σημαντικού σταθμού της ζωής μου. Αυτή η επιτυχία ανήκει εξίσου σε εσάς και σας ευχαριστώ που με στηρίζατε όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	v
Περιεχόμενα	vi
Λίστα Εικόνων	viii
Λίστα με Πίνακες	xi
1 Εισαγωγή	1
1.1 Κίνητρα της έρευνας	1
1.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο	2
1.3 Οι στόχοι της Διπλωματικής Εργασίας	3
1.4 Η Δομή της Διπλωματικής Εργασίας	4
2 Ασύγχρονες Ηλεκτρικές Μηχανές	6
2.1 Ηλεκτρομηχανική Μετατροπή Ενέργειας και Ηλεκτρικές Μηχανές	6
2.2 Τριφασικές Ασύγχρονες Μηχανές	8
2.2.1 Ασύγχρονη μηχανή κλωβού :	8
2.2.2 Ασύγχρονη μηχανή δακτυλιοφόρου δρομέα :	9
2.2.3 Ασύγχρονη μηχανή χωρίς αυλακώσεις :	9
2.3 Βασικές Αρχές Λειτουργίας των Ασύγχρονων Μηχανών	10
2.4 Συχνότητα και ολίσθηση	13
2.5 Ισοδύναμο κύκλωμα και απώλειες επαγωγικού κινητήρα	15
2.6 Χαρακτηριστική ροπής - στροφών επαγωγικού κινητήρα	17
2.7 Ανάλυση ηλεκτρικών μηχανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	19
3 Καταπόνηση, σφάλματα και διάγνωση	22
3.1 Καταπονήσεις και γήρανση ηλεκτρικών μηχανών	22
3.1.1 Θερμική καταπόνηση :	22
3.1.2 Ηλεκτρική καταπόνηση :	23
3.1.3 Περιβαλλοντική καταπόνηση :	24
3.1.4 Μηχανική καταπόνηση :	25
3.2 Σφάλματα και επιπτώσεις	26
3.2.1 Πορότητα	26

3.2.2	Στατική Εκκεντρότητα	27
3.2.3	Ανθρώπινος Παράγοντας	27
3.2.4	Ποσοστά αστοχίας	28
3.3	Περιπτώσεις διάγνωσης	29
3.4	Διαγνωστικές μέθοδοι ηλεκτρικών μηχανών	30
3.4.1	Ανάλυση Υπογραφής Ρεύματος Στάτη (MCSA) :	30
3.4.2	Ανάλυση Φάσματος Μαγνητικής Ροής :	34
3.4.3	Ανάλυση Υπογραφών Ροπής :	35
3.4.4	Park Vector Approach (PVA) :	36
3.4.5	Μέθοδος Μηδενικής Ακολουθίας	38
3.4.6	Υπογραφές Ρεύματος Σε Μεταβατικό Στάδιο	39
3.4.7	Άλλες διαγνωστικές μέθοδοι :	39
4	Μοντελοποίηση Με	
	Πεπερασμένα Στοιχεία	40
4.1	Ανάλυση Σχεδίου Της Μηχανής	40
4.2	Σχεδιασμός μηχανής στο πρόγραμμα προσομοιώσεων Simcenter Magnet	42
4.2.1	Σχεδιασμός βασικών κύκλων μηχανής	42
5	Επεξεργασία Σημάτων και Αποτελέσματα	56
5.1	Περιπτώσεις Προσομοίωσης	56
5.2	Επιδόσεις Ανά Περίπτωση	57
5.3	Ανάλυση Ρεύματος Στάτη	59
5.3.1	Χαρακτηριστική Έντασης-Χρόνου	59
5.3.2	Motor Current Signature Analysis (MCSA)	62
5.3.3	Short Time Fourier Transform (STFT)	65
5.4	Ανάλυση Μαγνητικής Ροής	68
5.4.1	Κατανομή Μαγνητικού Πεδίου	68
5.4.2	Stray Flux Signature Analysis (SFSA)	69
5.5	Ανάλυση Μηχανικής Ροπής	75
5.6	Μαγνητική Ροή Μηδενικής Ακολουθίας	79
6	Συμπεράσματα και Προοπτικές Εξέλιξης	88
6.1	Συμπεράσματα	88
6.2	Μελλοντική Έρευνα	88
	Βιβλιογραφία	90

Λίστα Εικόνων

2.1	Απεικόνιση μιας Ηλεκτρικής Μηχανής [7]	6
2.2	(α) Μονοφασική και (β) Τριφασική Ασύγχρονη Μηχανή [10]	7
2.3	Δρομέας Μηχανής Κλωβού [12]	8
2.4	Δακτυλιοφόρος δρομέας - Δρομέας από Φερρομαγνητικό υλικό [13]	9
2.5	Δυνάμεις Lorentz στον Κλωβό [15]	11
2.6	Λειτουργίες στο διάγραμμα ροπής - στροφών [17]	12
2.7	Διαφορετικές ταχύτητες πεδίου - δρομέα ασύγχρονης μηχανής [17]	14
2.8	Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης επαγωγικού κινητήρα [20]	15
2.9	Ισοδύναμο κύκλωμα δρομέα επαγωγικού κινητήρα [20]	16
2.10	Διάγραμμα Απωλειών Ισχύος Επαγωγικού Κινητήρα [23]	17
2.11	Χαρακτηριστική (α) Ροπής - Στροφών (β) Ρεύμα - Στροφών [17]	19
2.12	Διαδικασία Ανάλυσης σε 3D Software [28]	20
2.13	Πλέγμα σε σχεδιασμένη ηλεκτρική μηχανή πεπερασμένων στοιχείων [29]	21
3.1	Θερμική καταπόνηση ηλεκτρικής μηχανής [31]	23
3.2	Ηλεκτρική διάσπαση στη μόνωση ηλεκτρικής μηχανής [34]	24
3.3	Μόλυνση από σκόνη (εικόνα α και β) και τσιμέντο (εικόνα γ)	25
3.4	Αστοχία ρουλεμάν ηλεκτρικής μηχανής λόγω μηχανικής καταπόνησης [37]	26
3.5	Σκανάρισμα με ακτίνες Χ πορότητας (α) δρομέα (b) δακτυλίων σύνδεσης [39]	27
3.6	Μετατοπισμένος άξονας λόγω στατικής εκκεντρότητας [39]	27
3.7	Λανθασμένος χειρισμός σύμπλεξης φορτίου [41]	28
3.8	Κατανομή σφαλμάτων ηλεκτρικών μηχανών βάση τάσης τροφοδοσίας [39]	29
3.9	Διαδικασία διάγνωσης μηχανής σε βιομηχανικό περιβάλλον [46]	30
3.10	Διαδικασία διάγνωσης με μέθοδο MCSA στον πίνακα ελέγχου [48]	31
3.11	Τοποθέτηση αισθητήρων για εντοπισμό ακτινικής/αξονικής ροής [53]	34
3.12	(a)Υγής και 2,6,12 σπείρες βραχυκυκλωμένες στην μια φάση (b)Υγής και 12 σπείρες βραχυκυκλωμένες σε όλες τις φάσεις [58]	37
3.13	Σχήμα V κατά την ανάλυση του ρεύματος εκκίνησης μηχανής [60]	39
4.1	Draw Dropdown Menu	42
4.2	Πρώιμος Σχεδιασμός Δρομέα	42
4.3	Τριπλός Κύκλος Διακένου και Κύκλος Στάτη	43
4.4	Πρώιμος Σχεδιασμός Αυλάκωσης Δρομέα	44
4.5	Σχεδιασμός Αυλάκωσης Δρομέα	44
4.6	Σχεδιασμός Υπόλοιπων Αυλακώσεων Δρομέα	45

4.7	Σχεδιασμός Υπόλοιπων Αυλακώσεων Δρομέα	45
4.8	Τελικό Σχέδιο Αυλακώσεων Δρομέα	45
4.9	Πρώιμος Σχεδιασμός Τυλίγματος Στάτη	46
4.10	Σχεδιασμός Τυλίγματος Στάτη	46
4.11	Σχεδιασμός Τυλίγματος Στάτη	46
4.12	Σχεδιασμός Τυλίγματος Στάτη	47
4.13	Σχεδιασμός Τυλίγματος Στάτη	47
4.14	Τελικός Σχεδιασμός Στάτη	47
4.15	Δημιουργία Stator και Rotor Component	48
4.16	Δημιουργία Stator και Rotor Component	48
4.17	Δημιουργία Stator και Rotor Component	48
4.18	Δημιουργία Stator και Rotor Component	48
4.19	Δημιουργία Coils στον Στάτη	49
4.20	Δημιουργία Coils στον Στάτη	49
4.21	Σύνδεση Coils Στάτη	49
4.22	Σύνδεση Coils Στάτη	49
4.23	Τοποθέτηση AIR στο διάκενο και στον άξονα περιστροφής	50
4.24	Τοποθέτηση AIR στο διάκενο και στον άξονα περιστροφής	50
4.25	Κυκλωματική απεικόνιση στάτη	51
4.26	Τιμές τροφοδοσίας της δεύτερης πηγής (120 μοίρες)	51
4.27	Σύνδεση Coils Δρομέα	52
4.28	Σύνδεση Coils Δρομέα	52
4.29	Κυκλωματική Απεικόνιση Αισθητήρων Μαγνητικής Ροής	53
4.30	Τελικό Σχέδιο Ηλεκτρικής Μηχανής Με Αισθητήρες Μαγνητικής Ροής	53
4.31	Επιλογή πεπερασμένων στοιχείων κίνησης	54
4.32	Επιλογή πεπερασμένων στοιχείων κίνησης	54
4.33	Επιλογές Προσομοίωσης	55
4.34	Επιλογές Προσομοίωσης	55
5.1	Ένταση Ρεύματος στον χρόνο με φορτίο 26 Nm (Healthy)	59
5.2	Ένταση Ρεύματος στον χρόνο με φορτίο 26Nm (Healthy, 1bb, 2bb, 2bbhpp)	60
5.3	Ένταση Ρεύματος στον χρόνο με φορτίο 13Nm (Healthy)	60
5.4	Ένταση Ρεύματος στον χρόνο χωρίς φορτίο (Healthy)	61
5.5	Φάσμα Συχνοτήτων Ρεύματος με φορτίο 26 Nm (40Hz - 60Hz)	62
5.6	Φάσμα Συχνοτήτων Ρεύματος με φορτίο 26 Nm (0Hz - 500Hz)	63
5.7	Φάσμα Συχνοτήτων Ρεύματος με φορτίο 13 Nm	64
5.8	Φάσμα Συχνοτήτων Ρεύματος με φορτίο 13 Nm	64
5.9	Φάσμα Συχνοτήτων Ρεύματος χωρίς φορτίο (1Nm)	65
5.10	Φάσμα Συχνοτήτων Ρεύματος χωρίς φορτίο (1Nm)	65
5.11	Short Time Fourier Transform Healthy	66
5.12	Short Time Fourier Transform 1 broken bar	66
5.13	Short Time Fourier Transform 2 broken bars	67
5.14	Short Time Fourier Transform 2 broken bars half pole pitch	67
5.15	Κατανομή Μαγνητικού Πεδίου στην Υγιή Μηχανή	68

5.16 Κατανομή Μαγνητικού Πεδίου με γειτονικές σπασμένες μπάρες	69
5.17 Κατανομή Μαγνητικού Πεδίου με μη γειτονικές σπασμένες μπάρες	69
5.18 Μαγνητική Εξωτερική Ροή στον χρόνο με φορτίο 26Nm	70
5.19 Φάσμα Μαγνητικής Εξωτερικής Ροής με φορτίο 26Nm (40Hz - 60Hz)	70
5.20 Φάσμα Μαγνητικής Εξωτερικής Ροής με φορτίο 26Nm (0Hz - 500Hz)	71
5.21 Φάσμα Μαγνητικής Εξωτερικής Ροής με φορτίο 13Nm (40Hz - 60Hz)	72
5.22 Φάσμα Μαγνητικής Εξωτερικής Ροής με φορτίο 13Nm (0Hz - 500Hz)	72
5.23 Φάσμα Μαγνητικής Εξωτερικής Ροής χωρίς φορτίο (40Hz - 60Hz)	73
5.24 Φάσμα Μαγνητικής Εξωτερικής Ροής χωρίς φορτίο (0Hz - 500Hz)	73
5.25 Μηχανική Ροπή στον χρόνο με φορτίο 26 Nm (0 - 300 sec)	75
5.26 Μηχανική Ροπή στον χρόνο με φορτίο 26 Nm (1630 - 1650 sec)	75
5.28 Ανάλυση Fourier Μηχανικής Ροπής με φορτίο 13 Nm (0Hz - 10Hz)	76
5.29 Ανάλυση Fourier Μηχανικής Ροπής χωρίς φορτίο (0Hz - 10Hz)	76
5.30 Ανάλυση Fourier Μηχανικής Ροπής με φορτίο 26 Nm (260Hz - 320Hz)	77
5.31 Ανάλυση Fourier Μηχανικής Ροπής με φορτίο 13 Nm (260Hz - 320Hz)	78
5.32 Ανάλυση Fourier Μηχανικής Ροπής χωρίς φορτίο (260Hz - 320Hz)	78
5.33 Μαγνητική Ροή Μηδενικής Ακολουθίας στον χρόνο με φορτίο 26 Nm	80
5.34 Μαγνητική Ροή Μηδενικής Ακολουθίας στον χρόνο με φορτίο 26 Nm	80
5.35 Φάσμα Μαγνητικής Ροής Μηδενικής Ακολουθίας με φορτίο 26 Nm (140Hz - 160Hz)	81
5.36 Φάσμα Μαγνητικής Ροής Μηδενικής Ακολουθίας με φορτίο 26 Nm (0Hz - 500Hz)	82
5.37 Φάσμα Μαγνητικής Ροής Μηδενικής Ακολουθίας με φορτίο 26 Nm (430Hz - 470Hz)	83
5.38 Φάσμα Μαγνητικής Ροής Μηδενικής Ακολουθίας με φορτίο 13 Nm (140Hz - 160Hz)	84
5.39 Φάσμα Μαγνητικής Ροής Μηδενικής Ακολουθίας με φορτίο 13 Nm (0Hz - 500Hz)	84
5.40 Φάσμα Μαγνητικής Ροής Μηδενικής Ακολουθίας με φορτίο 13 Nm (430Hz - 470Hz)	85
5.41 Φάσμα Μαγνητικής Ροής Μηδενικής Ακολουθίας χωρίς φορτίο (1 Nm) (140Hz - 160Hz)	86
5.42 Φάσμα Μαγνητικής Ροής Μηδενικής Ακολουθίας χωρίς φορτίο (1 Nm) (0Hz - 500Hz)	86
5.43 Φάσμα Μαγνητικής Ροής Μηδενικής Ακολουθίας χωρίς φορτίο (1 Nm) (430Hz - 470Hz)	87

Λίστα με Πίνακες

4.1	Ονομαστικά Στοιχεία Της Μηχανής	40
5.1	Επιδόσεις σε σταθερή λειτουργία με ονομαστικό φορτίο (26 Nm)	57
5.2	Επιδόσεις σε σταθερή λειτουργία με μισό ονομαστικό φορτίο (13 Nm)	57
5.3	Επιδόσεις σε σταθερή λειτουργία χωρίς φορτίο (1 Nm)	57
5.4	Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου ρεύματος	63
5.5	Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου μαγνητικής ροής	71
5.6	$2ksf_s$ Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου ροπής	77
5.7	Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου μηδενικής ακολουθίας ροής	81
5.8	Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου μηδενικής ακολουθίας ροής	83
5.9	Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου μηδενικής ακολουθίας ροής στα 13 Nm . .	85

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Κίνητρα της έρευνας

Οι βιομηχανικές ανάγκες για αξιόπιστους ασύγχρονους κινητήρες, δημιουργούν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στις ερευνητικές ομάδες για την ανάπτυξη διαγνωστικών μεθόδων και στρατηγικών παρακολούθησης της κατάστασης των ηλεκτρικών μηχανών, που είναι ικανές να αντιμετωπίσουν εγκαίρως και επιτυχώς τυχόν σφάλματα κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους. Οι μηχανές αυτές αναμένεται να λειτουργούν αποδοτικά για τεράστια χρονικά διαστήματα και υπό διάφορες αντίξοες συνθήκες. Προκειμένου να διασφαλιστεί η αδιάκοπη λειτουργία και παραγωγικότητα των μηχανών, η διαγνωστική κοινότητα συνεχίζει την έρευνα, καθώς μια πιθανή διακοπή προκαλεί σημαντικές οικονομικές απώλειες, όχι μόνο λόγω του κόστους αποκατάστασης της βλάβης, αλλά και την απώλεια παραγωγικότητας και πιθανή ζημιά σε άλλους μηχανισμούς που είναι συνδεδεμένοι σε αυτό το σύστημα [1].

Πιο συγκεκριμένα, ο εντοπισμός και η διάγνωση σφαλμάτων όπως οι σπασμένες μπάρες δρομέα είναι πολύ σημαντικές, μιας και αποτελούν κλασική περίπτωση βλάβης στις Ασύγχρονες Μηχανές και οι επιπτώσεις της είναι καλά μελετημένο θέμα. Μπορεί να προκαλέσει προβλήματα όπως αυξημένη κατανάλωση ενέργειας, μείωση απόδοσης, ακόμα και μηχανικές φθορές που μπορούν να μειώσουν την διάρκεια ζωής και την ασφάλεια της μηχανής. Ως αποτέλεσμα, η δυνατότητα εντοπισμού αυτής της βλάβης πριν αυτή προχωρήσει σε πιο εξελιγμένο στάδιο, δεν είναι απλά μια προσπάθεια για την διατήρηση της απόδοσης αλλά μια στρατηγική γενικότερης μείωσης του κόστους λειτουργίας και φθορών και συνεπώς ένας σημαντικός παράγοντας για την διατήρηση του ανταγωνισμού στην αγορά [2].

Επιπρόσθετα με την ραγδαία βιομηχανική εξέλιξη δημιουργείται όλο και περισσότερο η ανάγκη να αναγνωρίζονται και λιγότερο προφανή σφάλματα, όπως αυτό σε περίπτωση σπασμένων μη γειτονικών μπαρών, όπου οι κλασικές μέθοδοι όπως η MCSA πολλές φορές αδυνατούν να εντοπίσουν εγκαίρως, πριν δημιουργήσουν περεταίρω επιπτώσεις. Έτσι το ενδιαφέρον

της διαγνωστικής επικεντρώνεται , ακόμα πιο συγκεκριμένα σε περίπτωση που οι σπασμένες μπάρες απέχουν μεταξύ τους κενό ίσο με μισό πόλο (*half pole pitch* ή *hpp*), όπου οι υπογραφές σφαλμάτων των σπασμένων μπαρών αλληλοαναιρούνται , και είναι σχεδόν αδύνατο να διαγνωστούν με τις κλασικές διαγνωστικές μεθόδους. Σε αυτές τις περιπτώσεις , προτείνεται ένα νέο προηγμένο διαγνωστικό εργαλείο που επικεντρώνεται ειδικά στην ανίχνευση αυτών των βλαβών. Η ανάπτυξη αυτού του εργαλείου αποτελεί ένα κρίσιμο βήμα για το μέλλον της βιομηχανικής αποδοτικότητας και καινοτομίας [3].

1.2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Από τις πιο γνωστές περιπτώσεις βλάβης στον δρομέα στις ασύγχρονες μηχανές κλωβού αποτελούν οι σπασμένες ή ραγισμένες μπάρες του δρομέα και η αποκόλληση των δακτυλίων σύνδεσης. Τέτοιες βλάβες πολλές φορές δεν μπορούν να εντοπιστούν καθώς στα αρχικά τους στάδια , ο αντίκτυπος στην απόδοση της μηχανής είναι αμελητέος.

Όταν μια μπάρα σπάσει στον δρομέα , μπορεί να αποδειχτεί μαθηματικά ότι οι γειτονικές μπάρες θα υπερφορτωθούν , με αποτέλεσμα να σπάσουν αυτές στη συνέχεια επειδή δεν έχουν σχεδιαστεί να αντέξουν την πυκνότητα του ρεύματος που προκύπτει. Σε αυτές τις περιπτώσεις συνήθως η βλάβη εντοπίζεται εγκαίρως και με τις κλασικές διαγνωστικές μεθόδους εφόσον πλέον η απόδοση έχει μειωθεί σημαντικά.

Σε πολλές περιπτώσεις όμως έχει παρατηρηθεί το σπάσιμο μη γειτονικών μπαρών του δρομέα , συνήθως σε μεγάλες μηχανές κλωβού από χαλκό. Σε αυτές τις περιπτώσεις η φασματική ανάλυση του ρεύματος κατά την διάρκεια λειτουργίας της μηχανής με ονομαστικό φορτίο δεν εμφανίζει το πρόβλημα σε όλες τις περιπτώσεις, με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε σε ψευδείς αρνητική διάγνωση σφαλμάτων της μηχανής. Ιδιαίτερα στην περίπτωση που οι σπασμένες μπάρες απέχουν κατά μισό πολικό βήμα , αλληλοαναιρείται η μαγνητική ανισορροπία και δύσκολα μπορεί να εντοπιστεί στα γραφήματα του φάσματος [4].

Μια πολύ αποτελεσματική μέθοδος για την ανίχνευση των συγκεκριμένων βλαβών , είναι η διαγνωστική ανάλυση κατά την διάρκεια μεταβατικών καταστάσεων της μηχανής , συνήθως κατά την διάρκεια εκκίνησης. Συγκεκριμένες τεχνικές όπως η μέθοδος *STFT* και η μέθοδος *MUSIC* μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτές τις περιπτώσεις με πολύ αξιόπιστα αποτελέσματα. Οι μέθοδοι αυτοί βασίζονται στο επιδερμικό φαινόμενο λόγω των υψηλών ρευμάτων του δρομέα κατά την εκκίνηση που ενισχύουν την μαγνητική ασυμμετρία και δίνουν ένα ξεκάθαρο, πλούσιο σε αρμονικό περιεχόμενο αποτέλεσμα με τις προφανείς υπογραφές σφαλμάτων [5].

Πολλές μηχανές ωστόσο δεν έχουν σχεδιαστεί , με βάση την εφαρμογή τους , για συχνές εκκινήσεις με αποτέλεσμα να δημιουργείται η ανάγκη εύρεσης νέων αξιόπιστων διαγνωστικών μεθόδων που να εντοπίζουν σπασμένες μη γειτονικές μπάρες ακόμα και κατά την διάρκεια ονομαστικής λειτουργίας.

1.3 Οι στόχοι της Διπλωματικής Εργασίας

Στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση των κλασικών διαγνωστικών μεθόδων και η εισαγωγή μιας νέας μεθόδου για την παρακολούθηση σπασμένων μη γειτονικών μπαρών σε ασύγχρονους κινητήρες κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους. Συγκεκριμένα γίνεται ανάλυση των σημάτων μέσω *MCSA*, *SFSA* και *Torque Monitoring*, συγκρίνονται τα αποτελέσματα μεταξύ τους και προτείνεται η επεξεργασία του σήματος μηδενικής ακολουθίας εξωτερικής μαγνητικής ροής, ως μια ακόμα περισσότερο αξιόπιστη μέθοδος για συγκεκριμένες περιπτώσεις σπασμένων μπαρών στις ασύγχρονες μηχανές.

Επιπρόσθετα η διατριβή αυτή στοχεύει στην εις βάθος κατανόηση της επεξεργασίας σημάτων που επιβλέπονται κατά την λειτουργία μιας μηχανής καθώς και η επακριβής μοντελοποίηση πραγματικών ηλεκτρικών μηχανών σε 3D περιβάλλοντα που επιτρέπουν την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία. Μέσω αυτών των στόχων η μελέτη προτείνει μια νέα διαγνωστική μέθοδο και συμβάλλει στη διεύρυνση της γνώσης στον τομέα της διαγνωστικής επιστήμης των ηλεκτρικών μηχανών.

1.4 Η Δομή της Διπλωματικής Εργασίας

- Κεφάλαιο 2 - Ασύγχρονες Ηλεκτρικές Μηχανές :

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια ιστορική αναδρομή καθώς και μια θεωρητική εισαγωγή σχετικά με τους ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες και την λειτουργία τους. Καλύπτονται οι θεμελιώδεις αρχές των ασύγχρονων μηχανών , ο σχεδιασμός τους , η μαθηματική τους ανάλυση και η ευρεία χρήση τους σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές.

- Κεφάλαιο 3 - Καταπόνηση, σφάλματα και διάγνωση :

Η ενότητα αυτή καλύπτει τους μηχανισμούς καταπόνησης των ηλεκτρικών μηχανών και παρουσιάζει τους διάφορους τύπους βλαβών που προκύπτουν εστιάζοντας το ενδιαφέρον στις βλάβες δρομέα στις μηχανές κλωβού. Επιπρόσθετα εξετάζει τις διαγνωστικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται τόσο για την σταθερή κατάσταση λειτουργίας όσο και για την εκκίνηση, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα των εργαλείων και μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την αξιόπιστη ταυτοποίηση σφαλμάτων.

- Κεφάλαιο 4 - Μοντελοποίηση Με Πεπερασμένα Στοιχεία :

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία σχεδιασμού ενός πραγματικού κινητήρα 4kw , από τα σχέδια στο χαρτί μέχρι την 3D υλοποίηση του στο πρόγραμμα SIMCENTER MAGNET , όπου γίνεται η ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Παρουσιάζονται επίσης αναλυτικά όλοι οι παράμετροι καθώς και τα κυκλωματικά ισοδύναμα της μηχανής.

- Κεφάλαιο 5 - Επεξεργασία Σημάτων και Αποτελέσματα :

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα επεξεργασμένα μέσω MATLAB αποτελέσματα των προσομοιώσεων που λάβαμε από το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων για όλες τις περιπτώσεις. Συγκρίνεται η απόδοση των διαφορετικών διαγνωστικών μεθόδων και

αναλύονται τα αποτελέσματα εις βάθος. Επίσης σε αυτή την ενότητα προτείνεται η μέθοδος μηδενικής ακολουθίας της μαγνητικής ροής για τον εντοπισμό κρυμμένων αρμονικών βλαβών κατά την διάρκεια λειτουργίας της μηχανής.

- Κεφάλαιο 6 - Συμπεράσματα και Προοπτικές Εξέλιξης

Το τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζει τα αποτελέσματα της έρευνας και εξάγει συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα της κάθε διαγνωστικής μεθόδου ανά περίπτωση. Τέλος παρουσιάζει μελλοντικές κατευθύνσεις για πιθανή επέκταση της έρευνας ανοίγοντας νέους ορίζοντες στην επιστήμη της διαγνωστικής ηλεκτρικών μηχανών.

Κεφάλαιο 2

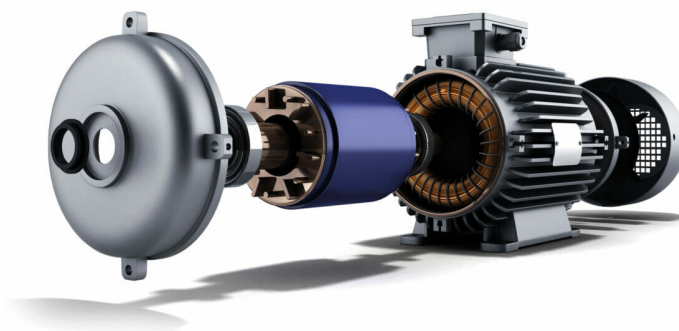
Ασύγχρονες Ηλεκτρικές Μηχανές

Προκειμένου να ικανοποιήσει τις ανάγκες του ο άνθρωπος χρησιμοποιεί διάφορες μορφές ενέργειας. Μια από τις πιο ευρέως διαδεδομένες μορφές ενέργειας είναι η ηλεκτρική, η οποία χρησιμοποιείται για φωτισμό, κίνηση, θέρμανση και πολλές άλλες χρήσεις, από τις πιο μικρές κατοικίες μέχρι τα μεγαλύτερα εργοστάσια και εργοτάξια.

2.1 Ηλεκτρομηχανική Μετατροπή Ενέργειας και Ηλεκτρικές Μηχανές

Η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε κίνηση είναι μια πολύ συνηθισμένη μέθοδος για την κίνηση μηχανημάτων και κάθε είδους φορτίου. Για να το πετύχουμε αυτό χρειαζόμαστε ηλεκτρομηχανικούς μετατροπείς ενέργειας που ονομάζονται ηλεκτρικοί κινητήρες [6].

Οι ίδιες αυτές μηχανές, αν χρησιμοποιηθούν αντίστροφα, δηλαδή αν εμείς τους προσφέρουμε κινητική (μηχανική) ενέργεια (μέσω π.χ. ενός ατμοστροβίλου), μπορούμε να λάβουμε πίσω ηλεκτρική ενέργεια. Για αυτόν τον λόγο τις ονομάζουμε ηλεκτρικές μηχανές, και λειτουργούν ως κινητήρες ή ως γεννήτριες ανάλογα με την μορφή ενέργειας που τους προσφέρουμε.

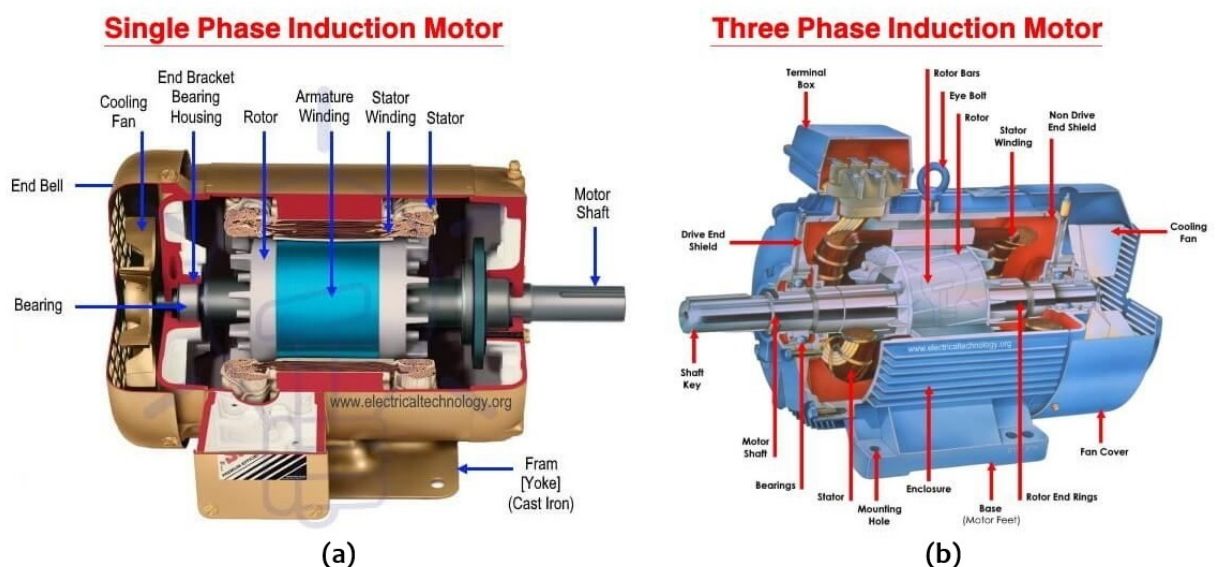


Εικόνα 2.1: Απεικόνιση μιας Ηλεκτρικής Μηχανής [7]

Οι ηλεκτρικές μηχανές διακρίνονται σε μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος και μηχανές συνεχούς ρεύματος, ανάλογα με την τροφοδοσία που χρειάζονται για να λειτουργήσουν. Μια από τις μεγαλύτερες κατηγορίες μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος αποτελούν οι ασύγχρονες μηχανές οι οποίες στις περισσότερες εφαρμογές τους χρησιμοποιούνται ως κινητήρες. Η ισχύς τους μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ μερικών κλασμάτων του ίππου, έως και 80 MW (LNG Industry, NANCY, FRANCE). Τα τελευταία χρόνια όμως οι ασύγχρονες μηχανές βρίσκουν και μεγάλη εφαρμογή και ως γεννήτριες, κυρίως σε αιολικά πάρκα [8].

Η ονομασία “ασύγχρονες” οφείλεται στο γεγονός ότι ο δρομέας των μηχανών αυτών στρέφεται με διαφορετική ταχύτητα από το μαγνητικό πεδίο που προκαλούν τα ρεύματα στα τυλίγματα του στάτη. Επίσης, επειδή τα ρεύματα που αναπτύσσονται στον δρομέα προκαλούνται μέσω επαγωγής από τα ρεύματα που ρέουν στα τυλίγματα του στάτη, οι μηχανές αυτές ονομάζονται και επαγωγικές μηχανές. Σε αντίθεση με αυτές, οι σύγχρονες μηχανές, στις οποίες η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα “κλειδώνει” μαγνητικά με την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου, έχουν ανεξάρτητη τροφοδοσία στον δρομέα.

[9] Οι ασύγχρονες μηχανές χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες με βάση την τροφοδοσία τους, στις μονοφασικές και τις τριφασικές. Στη δική μας περίπτωση θα εξετάσουμε τις τριφασικές ασύγχρονες μηχανές, οι οποίες κυρίως χρησιμοποιούνται για εφαρμογές μέσης και μεγάλης ισχύος.



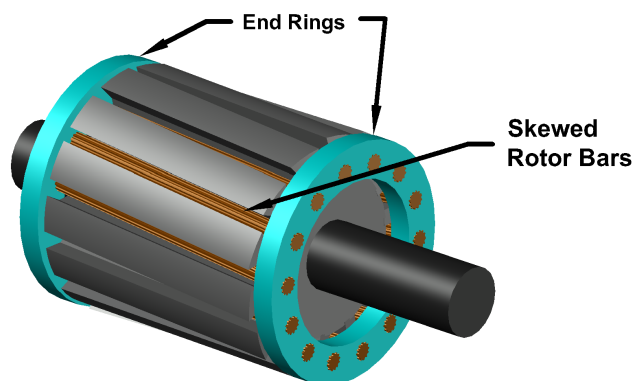
Εικόνα 2.2: (α) Μονοφασική και (β) Τριφασική Ασύγχρονη Μηχανή [10]

2.2 Τριφασικές Ασύγχρονες Μηχανές

Όπως και οι σύγχρονες μηχανές, έτσι και οι τριφασικές ασύγχρονες μηχανές έχουν ένα συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα στο στάτη. Ανάλογα με την κατασκευή του δρομέα όμως μπορούμε να τις διακρίνουμε σε 3 μεγάλες κατηγορίες.

2.2.1 Ασύγχρονη μηχανή κλωβού :

Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι για την δημιουργία δρομέων για τις μηχανές αυτές. Ο πρώτος αποτελείτε από έτοιμους αγωγούς (μπάρες), συνήθως από χαλκό ή από ορείχαλκο, οι οποίοι μονώνονται από το σιδηρομαγνητικό υλικό του δρομέα και τοποθετούνται στις υπέρχουσες αυλακώσεις του. Η γεωμετρία αυτών των αυλακώσεων καθορίζουν την χαρακτηριστική ροπής - στροφών του κινητήρα. Στα δύο άκρα των αγωγών υπάρχουν κάποιοι δακτύλιοι, οι οποίοι ενώνουν (βραχυκυκλώνουν) όλες τις μπάρες μεταξύ τους. Έτσι σχηματίζεται ένας βραχυκυκλωμένος κλωβός γύρω απ' το σιδηρομαγνητικό υλικό. Στην δεύτερη περίπτωση χυτεύεται ρευστός χαλκός ή αλουμίνιο στις αυλακώσεις του δρομέα και όταν στερεοποιηθεί δημιουργείται ξανά ένας βραχυκυκλωμένος κλωβός. Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει μόνωση μεταξύ του σιδηρομαγνητικού υλικού και του χυτευτού μετάλλου. Ωστόσο λόγω της αρκετά καλύτερης αγωγιμότητας αλλά και της σχετικά μεγάλης αντίστασης επαφής αγωγού και σιδήρου, τα ρεύματα κινούνται κατά βάση μέσα στους αγωγούς. Οι ασύγχρονες μηχανές κλωβού λειτουργούν χωρίς καμία τροφοδοσία στον δρομέα, γεγονός που τις καθιστά αρκετά πιο απλές στην κατασκευή και γι' αυτό τον λόγο έχουν ευρέα χρήση και ανταγωνιστικές τιμές στην αγορά [11].



Squirrel Cage Rotor

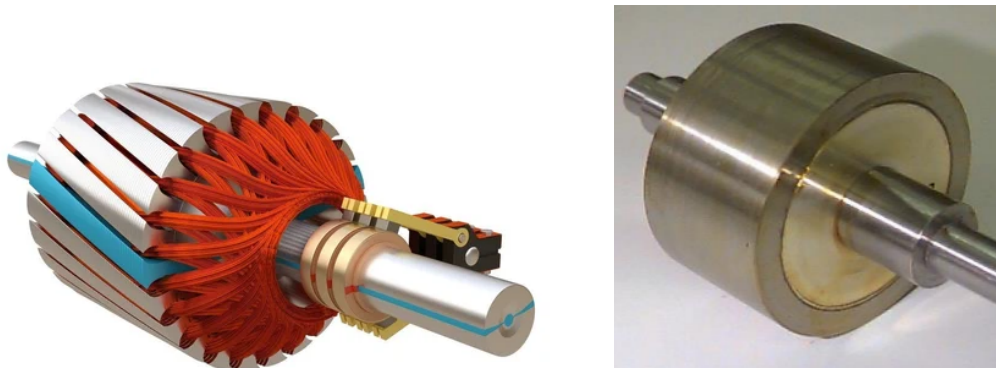
Εικόνα 2.3: Δρομέας Μηχανής Κλωβού [12]

2.2.2 Ασύγχρονη μηχανή δακτυλιοφόρου δρομέα :

Σε αυτή την κατηγορία τριφασικών ασύγχρονων μηχανών , ο δρομέας φέρει αυλακώσεις στις οποίες τοποθετείται ένα συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα , όπως ακριβώς εκείνο του στάτη. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις το τύλιγμα αυτό βρίσκεται σε συνδεσμολογία αστέρα , ενώ τα άλλα τρία άκρα καταλήγουν σε τρεις δακτυλίους , που μέσω ψηκτρών συνδέονται με εξωτερικό κύκλωμα είτε βραχυκυκλωμένο , είτε σε σειρά με ρυθμιζόμενες αντιστάσεις. Έτσι τροποποιείται ανάλογα με την περίπτωση η χαρακτηριστική ροπής - στροφών της μηχανής.

2.2.3 Ασύγχρονη μηχανή χωρίς αυλακώσεις :

Στην κατηγορία αυτή ο δρομέας κατασκευάζεται από συμπαγές σίδηρο χωρίς αυλακώσεις. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στα δινορρέυματα μέσα στον σίδηρο, που σε συνδυασμό με το μαγνητικό πεδίο, προκαλούν ροπές και περιστρέφουν τον δρομέα. Εφαρμογή βρίσκουν σε περιπτώσεις που χρειάζεται μεγάλος αριθμός στροφών (π.χ. 10.000 rpm) όπου λόγω της γεωμετρίας τους παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε φυγοκεντρικές δυνάμεις.



Εικόνα 2.4: Δακτυλιοφόρος δρομέας - Δρομέας από Φερρομαγνητικό υλικό [13]

2.3 Βασικές Αρχές Λειτουργίας των Ασύγχρονων Μηχανών

[14] Όλες οι κατηγορίες μηχανών εναλλασσομένου ρεύματος έχουν την ίδια βασική αρχή λειτουργίας. Η ροπή που στρέφει τον δρομέα, τείνει να ευθυγραμμίσει τα μαγνητικά πεδία του στάτη με αυτά του δρομέα. Από τα συμμετρικά τροφοδοτούμενα και συμμετρικά τοποθετημένα τυλίγματα του στάτη, προκαλείται στο διάκενο της μηχανής ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, με γωνιακή ταχύτητα ανάλογη της συχνότητας των ρευμάτων του στάτη. Αυτή η ταχύτητα ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα και δίνεται από τον τύπο :

$$\omega_s = \frac{2\pi f_s}{p} \text{ (rad/sec)} \quad (2.1)$$

όπου p τα ζεύγη των μαγνητικών πόλων της μηχανής και f_s η ηλεκτρική συχνότητα. Μια ακόμη πιο συνηθισμένη μονάδα μέτρησης της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα μιας μηχανής είναι οι στροφές ανά λεπτό (**rpm** ή **ΣΑΛ**), η οποία υπολογίζεται από τον τύπο :

$$n_s = \frac{60f_s}{p} \text{ (RPM)} \quad (2.2)$$

Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο είναι μια συνάρτηση του τόπου και του χρόνου, ή αλλιώς κύμανση όπως ονομάζεται, και μπορεί να εκφραστεί με την εξής σχέση :

$$B(x,t) = B_{max} \cdot \sin\left(\omega t + \pi \frac{x}{\tau_p}\right) \quad (2.3)$$

όπου : τ_p : πολική απόσταση (η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών πόλων)

x : η απόσταση επί της περιφέρειας του εσωτερικού κύκλου, που σχηματίζεται κατά την εγκάρσια τομή του στάτη, υπολογισμένη από ορισμένο σημείο που επιλέγεται ελεύθερα.

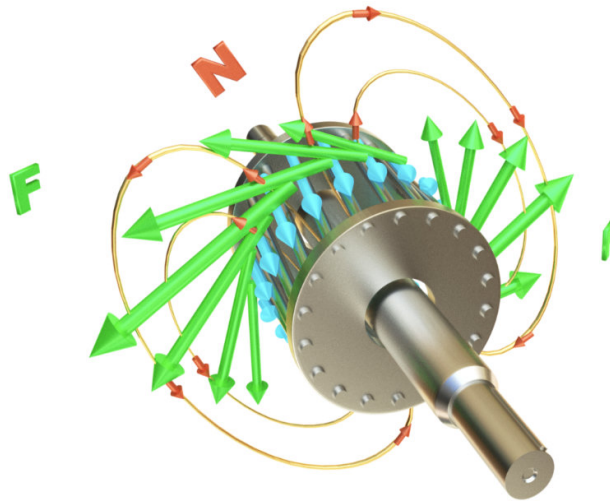
t : ο χρόνος

ω : η σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα :

$$\omega = 2\pi f_s \text{ (rad/sec)} \quad (2.4)$$

Όπως αναφέραμε και παραπάνω τα τυλίγματα πρέπει να είναι συμμετρικά τοποθετημένα στον χώρο, με διαφορά 120 μοιρών μεταξύ τους και να τροφοδοτούνται από συμμετρικό ημιτονοειδές τριφασικό σύστημα τάσεων με διαφορά φάσης 120 μοίρες μεταξύ τους, προκειμένου το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο να έχει σταθερό εύρος και σταθερό αριθμό στροφών.

Το πεδίο αυτό επάγει ρεύματα στον δρομέα της ασύγχρονης μηχανής, τα οποία δημιουργούν με το ίδιο αυτό πεδίο μια ηλεκτρομαγνητική ροπή, τέτοια που τείνει να περιστρέψει τον δρομέα κατά τη φορά του πεδίου, έτσι ώστε να αντισταθεί στην αιτία που προκάλεσε την κίνηση.



Εικόνα 2.5: Δυνάμεις Lorentz στον Κλωβό [15]

Δυνάμεις Lorentz εμφανίζονται στις μπάρες του κλωβού. Οι μπάρες τοποθετούνται συμμετρικά στην περιφέρεια του δρομέα και σε αντικρυστά ζεύγη, οπότε δυνάμεις προκαλούν ροπή που θα περιστρέψει τον δρομέα. Η συνολική ροπή στις μπάρες υπολογίζεται ως εξής :

$$T_{mech} = T_L + J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.5)$$

Όπου T_{mech} : Ροπή της Μηχανής

T_L : Ροπή του φορτίου

J : Αδράνεια δρομέα και φορτίου

ω : Γωνιακή Ταχύτητα

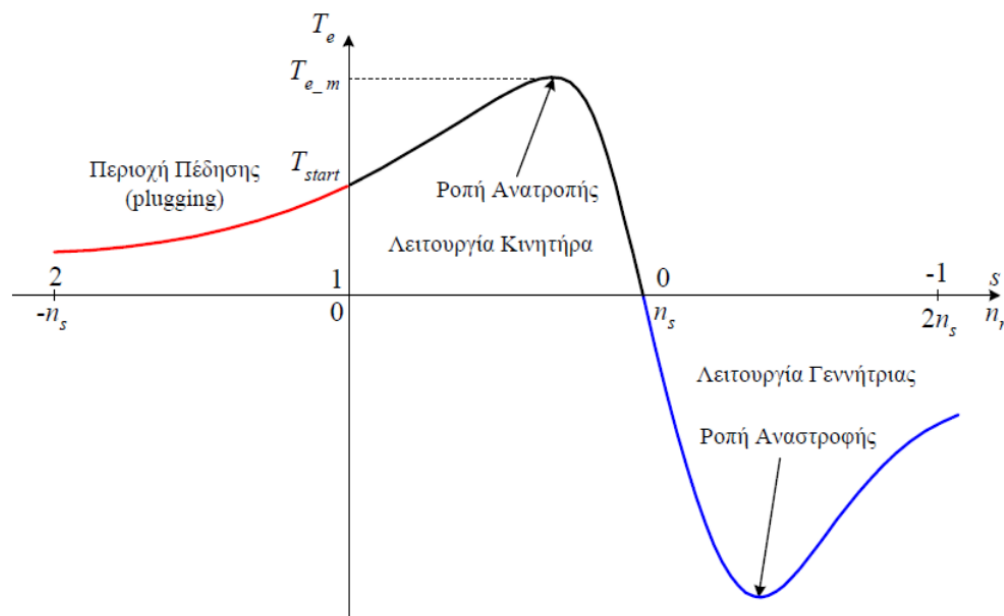
t : Χρόνος

Έτσι ο δρομέας “προσπαθεί” να φτάσει την ταχύτητα του μαγνητικού πεδίου, ώστε όταν η μεταξύ τους ταχύτητα μηδενιστεί, να μηδενιστεί και το ρεύμα. Όμως στην ασύγχρονη μηχανή ο δρομέας δεν καταφέρνει ποτέ να αποκτήσει την σύγχρονη ταχύτητα n_s , διότι σε αυτή την περίπτωση η ροπή θα μηδενιζόταν, η οποία όμως είναι απαραίτητη για να αντιμετωπίσει το μηχανικό φορτίο και τις τριβές στον άξονα περιστροφής. Σε ιδανική περίπτωση χωρίς τριβές και με μηδενικό φορτίο, ο δρομέας θα αποκτούσε σύγχρονη ταχύτητα. Όμως στην πράξη ο δρομέας παρουσιάζει ολίσθηση s , δηλαδή διαφορά μεταξύ της ταχύτητας περιστροφής του και την ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου, γι’ αυτό και αυτή η μηχανή ονομάζεται “ασύγχρονη μηχανή”.

Όσο αυξάνεται το φορτίο που συμπλέκεται με τον περιστρεφόμενο δρομέα, τόσο αυξάνεται και η ολίσθηση, δηλαδή μειώνεται ο αριθμός των στροφών περιστροφής του. Το ρεύμα εξ’ επαγωγής αυξάνεται, όπως και η ροπή. Αυτή η αύξηση συμβαίνει μέχρι ένα συγκεκριμένο

σημείο που ονομάζεται σημείο ανατροπής, ενώ σε εκείνο το σημείο η ροπή ονομάζεται ροπή ανατροπής και η ολίσθηση ονομάζεται ολίσθηση ανατροπής. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.6, στο σημείο αυτό παρουσιάζεται η μέγιστη δυνατή ροπή με βάση τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης ασύγχρονης μηχανής. Η περιοχή από το σημείο αυτό μέχρι τον συγχρονισμό ονομάζεται περιοχή ευστάθειας, στην οποία η ασύγχρονη μηχανή συμπεριφέρεται, με μεγάλη προσέγγιση, όπως μια μηχανή συνεχούς ρεύματος με παράλληλη διέγερση.

Στην περιοχή από την ακινησία έως το σημείο ανατροπής επικρατεί αστάθεια. Στην περίπτωση που ο δρομέας στρέφεται με μεγαλύτερη ταχύτητα από το μαγνητικό πεδίο, τότε έχουμε αρνητική ολίσθηση και η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια, προσφέροντας ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο μέσω του στάτη. Υπάρχει και μια τρίτη περίπτωση λειτουργίας, όπου η ασύγχρονη μηχανή δέχεται ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο και μηχανική ενέργεια από φορτίο, και όλη αυτή μετατρέπεται σε θερμότητα εντός της μηχανής. Η περιοχή αυτής της λειτουργίας ονομάζεται πέδη. Στην περίπτωση πέδης η ολίσθηση είναι θετική αλλά μεγαλύτερη από την ολίσθηση της περιοχής λειτουργίας της μηχανής ως κινητήρας. Μια τέτοια περίπτωση προκύπτει όταν π.χ. ένας κινητήρας προσπαθεί να ανυψώσει ένα φορτίο αλλά η ροπή του φορτίου είναι μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να παράγει ο κινητήρας. Τότε ο δρομέας αναγκάζεται να στραφεί σε αντίθετη φορά από εκείνη που τείνει να στραφεί λόγω των ρευμάτων που τον δι-αρρέουν [16]. Στο σχήμα παρακάτω διακρίνονται ξεκάθαρα όλες οι παραπάνω περιπτώσεις :



Εικόνα 2.6: Λειτουργίες στο διάγραμμα ροπής - στροφών [17]

Στην περίπτωση που αντί να τροφοδοτήσουμε τον στάτη τροφοδοτήσουμε τον δρομέα και τον βραχυκυκλώσουμε, δημιουργείται ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα n_s ως προς τον στάτη. Έτσι στον στάτη προκαλούνται ρεύματα εξ' επαγωγής που αντιτίθενται στην αιτία που τα προκάλεσε. Δημιουργείται δηλαδή ηλεκτρομαγνητική ροπή η οποία προσπαθεί να μειώσει την ταχύτητα του πεδίου ως προς τον στάτη, άρα ο δρομέας αρχίζει να στρέφεται σε αντίθετη κατεύθυνση από το πεδίο.

Στην περίπτωση που ο δρομέας ηρεμεί (π.χ. ανοιχτοκυκλωμένος ή κλειδωμένος) τότε η ασύγχρονη μηχανή συμπεριφέρεται ακριβώς όπως ένας τριφασικός μετασχηματιστής, με το πρωτεύον τύλιγμα να αντιστοιχεί σε αυτό του στάτη, και δευτερεύον στον δρομέα. Μάλιστα υπάρχουν εφαρμογές που συναντάμε τέτοιους μετασχηματιστές που ονομάζονται "στρεφόμενοι μετασχηματιστές". Σε αυτή την περίπτωση αφήνουμε τον δρομέα να στραφεί φρεναρισμένος με μια μικρή γωνία ως προς τον στάτη, ρυθμίζοντας έτσι την τάση στο δευτερεύον τύλιγμα.

Τέλος υπάρχει η περίπτωση ασύγχρονης μηχανής στην οποία τροφοδοτείται και ο δρομέας αλλά και ο στάτης. Αυτές οι μηχανές ονομάζονται μηχανές διπλής τροφοδοσίας, και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου επιδιώκουμε καλύτερη ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα.

2.4 Συχνότητα και ολίσθηση

[18] Όταν ο δρομέας μιας ασύγχρονης μηχανής είναι ανοιχτοκυκλωμένος, ενώ ο στάτης της τροφοδοτείται από το δίκτυο, λέμε ότι η μηχανή προσλαμβάνει ρεύμα εν κενώ, το οποίο δημιουργεί μαγνητικό πεδίο και καλύπτει θερμικές απώλειες. Η ταχύτητα περιστροφής του πεδίου ορίζεται απ' τη σχέση :

$$n_s = \frac{60 \cdot f_s}{p} \quad (2.6)$$

Θα δούμε παρακάτω ότι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στην ονομαστική λειτουργία της μηχανής είναι συνήθως πολύ κοντά στην σύγχρονη ταχύτητα n_s , λίγο μεγαλύτερη στην περίπτωση λειτουργίας γεννήτριας ενώ λίγο μικρότερη στην περίπτωση λειτουργίας κινητήρα. Από την παραπάνω σχέση, όταν γνωρίζουμε τη σύγχρονη ταχύτητα n_s και τη συχνότητα του πεδίου f_s , προκύπτει ο αριθμός p που εκφράζει τα ζεύγη πόλων της μηχανής. Έστω ότι n η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Τότε η σχετική ταχύτητα περιστροφής του ως προς το μαγνητικό πεδίο υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$n_R = n_s - n \quad (2.7)$$

Τα εναλλασσόμενα ηλεκτρικά μεγέθη του δρομέα έχουν συχνότητα :

$$f_R = \frac{p \cdot n_R}{60} \quad (2.8)$$

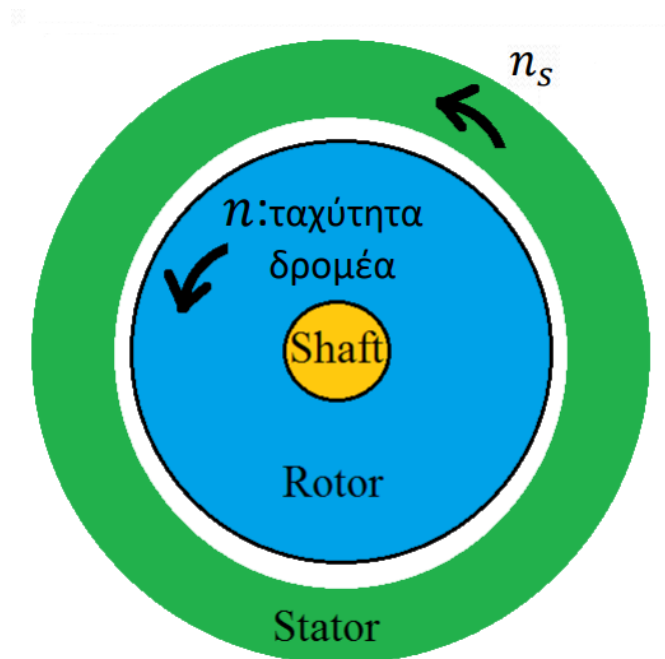
Επίσης από την σχέση 2.7 προκύπτει η σχέση :

$$n_s = n_R + n \quad (2.9)$$

Πολλαπλασιάζοντας την παραπάνω σχέση με τον αριθμό των ζευγών πόλων p της μηχανής προκύπτει η εξίσωση συχνοτήτων :

$$f_s = f_R + \frac{p \cdot n}{60} \quad (2.10)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι αν εμείς τροφοδοτήσουμε με τάση συχνότητας f_s τον στάτη και τάση συχνότητας f_R τον δρομέα, τότε μπορούμε μεταβάλλοντας τα μεγέθη αυτά να ρυθμίσουμε ακριβώς την ταχύτητα. Επίσης από τον ίδιο τύπο προκύπτει ότι αν τροφοδοτήσουμε τον στάτη με σταθερή f_s συχνότητα, τότε μεταβάλλοντας την ταχύτητα n , μπορούμε να ρυθμίσουμε επακριβώς την συχνότητα f_R [14].



Εικόνα 2.7: Διαφορετικές ταχύτητες πεδίου - δρομέα ασύγχρονης μηχανής [17]

Η ολίσθηση s (**slip**) είναι ένα πολύ βασικό μέγεθος των ασύγχρονων μηχανών και ορίζει την διαφορά της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα από την σύγχρονη ταχύτητα του μαγνητικού πεδίου , ως προς το πεδίο αυτό. Συνεπώς η σχέσεις που την ορίζουν φαίνονται παρακάτω :

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad (2.11)$$

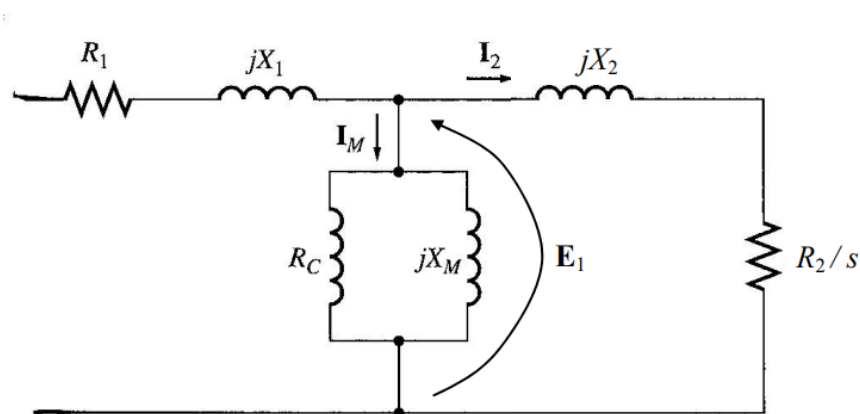
Επίσης από τις σχέσεις 2.10 και 2.11 προκύπτει η σχέση :

$$s = \frac{f_R}{f_s} \quad (2.12)$$

Από τους παραπάνω τύπους διακρίνουμε εύκολα ότι η ολίσθηση προκύπτει ως δεκαδικός αριθμός όμως πολύ συχνά εκφράζεται και σε ποσοστό επί τοις εκατό. Όταν ο δρομέας περιστρέφεται με μικρότερη ταχύτητα από αυτή του μαγνητικού πεδίου ($n < n_s$) τότε από την σχέση 2.11 βλέπουμε ότι η ολίσθηση προκύπτει θετικός αριθμός , και η μηχανή απορροφά ισχύ από το ηλεκτρικό δίκτυο, επομένως βρίσκεται σε λειτουργία κινητήρα. Σε αντίθετη περίπτωση (όταν $n > n_s$) έχουμε αρνητική ολίσθηση και η μηχανή βρίσκεται σε λειτουργία γεννήτριας.

[19] Στην ονομαστική λειτουργία οι περισσότερες μηχανές έχουν μικρή ολίσθηση , συνήθως από $+1\%$ έως $+3\%$. Είναι σχεδιασμένες για να λειτουργούν κοντά στην σύγχρονη ταχύτητα , γιατί όπως προαναφέραμε , η ροπή ,άρα και τα ρεύματα σε αυτές τις συνθήκες, είναι πολύ μικρότερα από τις μέγιστες τιμές τους (στο σημείο ανατροπής) , άρα οι απώλειες χαλκού στο δρομέα είναι αρκετά χαμηλότερες , κερδίζουμε καλή απόδοση και ασφάλεια της μηχανής και γλυτώνουμε σενάρια όπως υπερθέρμανση ή πρόωρη γήρανση.

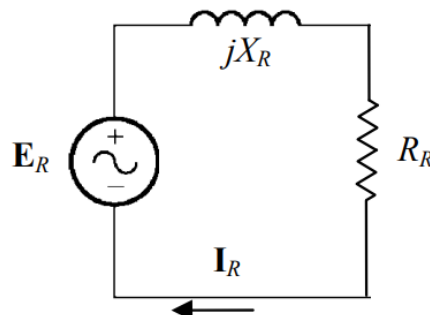
2.5 Ισοδύναμο κύκλωμα και απώλειες επαγωγικού κινητήρα



Εικόνα 2.8: Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης επαγωγικού κινητήρα [20]

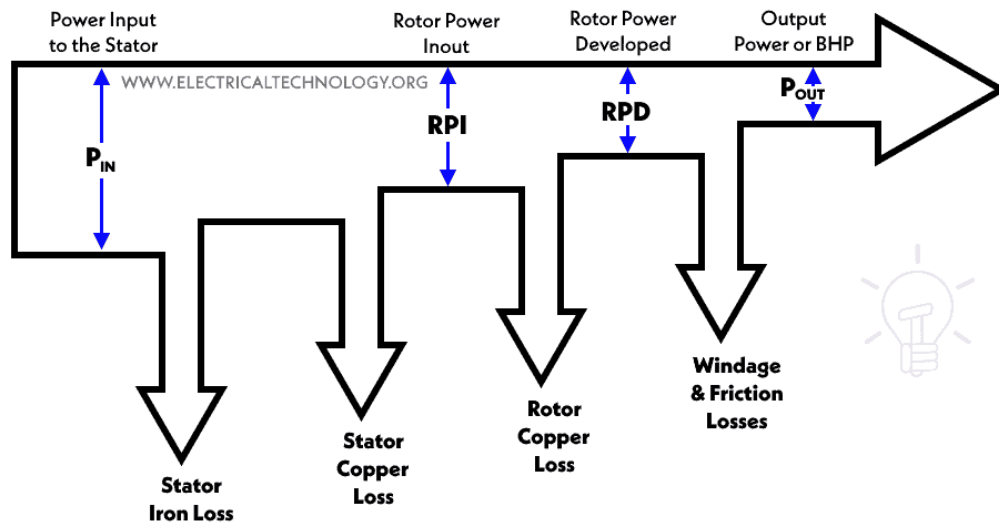
[21] Για να αποτυπώσουμε κυκλωματικά το ισοδύναμο ενός επαγωγικού κινητήρα, λαμβάνουμε υπόψη ότι η λειτουργία του μοιάζει με αυτή ενός μετασχηματιστή, με εξαίρεση ότι η συχνότητα της τάσης του δρομέα διαφέρει από αυτή του στάτη. Το τύλιγμα στον στάτη μπορεί να αποτυπωθεί σαν το πρωτεύον τύλιγμα ενός σχηματιστή με αντίσταση R_1 , αποτυπώνοντας τις θερμικές απώλειες στα τυλίγματά του.

Λόγω διακένου ωστόσο υπάρχουν περεταίρω απώλειες σε σχέση με την περίπτωση ενός καλά σχεδιασμένου μετασχηματιστή. Ένα κομμάτι της μαγνητικής ροής σκεδάζεται, κάτι που αποτυπώνουμε ως αντίδραση X_1 . Επίσης υπολογίζουμε την αντίδραση X_M που προέρχεται από το ρεύμα μαγνήτησης I_M . Υπάρχουν προφανώς και θερμικές απώλειες του σιδηρομαγνητικού υλικού, που συμβολίζονται ως R_c λόγω υστέρησης και δινορρευσμάτων. Θερμικές απώλειες έχει και ο δρομέας και συμβολίζεται ως R_R . Μέσω κάποιου λόγου μετασχηματισμού α , σχετίζουμε την εσωτερική τάση E_1 με την τάση E_R που επάγεται στον δρομέα. Η μεγαλύτερη διαφορά ανάμεσα στο ισοδύναμο κύκλωμα ενός μετασχηματιστή και ενός επαγωγικού κινητήρα εντοπίζεται κυρίως στα μεγέθη του δρομέα και προέρχονται από την μεταβολή της συχνότητας στα μεγέθη E_R , R_R και X_R [22].



Εικόνα 2.9: Ισοδύναμο κύκλωμα δρομέα επαγωγικού κινητήρα [20]

Προφανώς λοιπόν η αρχική ενέργεια που προσφέρεται στον στάτη του κινητήρα (P_{IN}) δεν μετατρέπεται ολόκληρη σε κινητική ενέργεια του δρομέα, λόγω των απωλειών που προαναφέρθηκαν. Στο σχήμα 2.10 μπορούμε να δούμε το διάγραμμα ροής ισχύος από την είσοδο P_{IN} μέχρι την έξοδο της μηχανής P_{OUT} . Μετά τις απώλειες ισχύος του στάτη λόγω του σιδήρου αλλά και λόγω του χαλκού, μπορούμε να μετρήσουμε την είσοδο ισχύος που δέχεται ο δρομέας, ή αλλιώς την ισχύ διακένου (RPI). Έπειτα αφαιρούμε τις θερμικές απώλειες λόγω του χαλκού στον δρομέα και υπολογίζουμε την Ηλεκτρομαγνητική Ισχύ (RPD). Αν αφαιρέσουμε από αυτή τις τριβές και τις υπόλοιπες μηχανικές απώλειες παίρνουμε την Μηχανική Ισχύ που είναι και η έξοδος του συστήματος (P_{OUT}). Με βάση την έξοδο σε σχέση με την ισχύ εισόδου που είχαμε προσφέρει μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε την απόδοση της μηχανής.



Εικόνα 2.10: Διάγραμμα Απωλειών Ισχύος Επαγωγικού Κινητήρα [23]

2.6 Χαρακτηριστική ροπής - στροφών επαγωγικού κινητήρα

Ας θεωρήσουμε αρχικά ότι ο κινητήρας λειτουργεί χωρίς φορτίο. Η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι σχεδόν όση και η σύγχρονη ταχύτητα. Το ρεύμα που ρέει στον στάτη I_s παράγει μαγνητικό πεδίο B_{sr} . Το συνολικό μαγνητικό πεδίο B_m είναι ανάλογο με το ρεύμα μαγνήτισης I_m , το οποίο εξαρτάται από την τάση E όταν ο κινητήρας δεν έχει κορεστεί. Όμως επειδή η σύνθετη αντίσταση στον στάτη ($R_1 + jX_1$) είναι πολύ μικρή, η τάση E παραμένει σταθερή και σχεδόν ίση με την τάση τροφοδοσίας V , συνεπώς το ολικό μαγνητικό πεδίο στο διάκενο της μηχανής παραμένει σταθερό ανεξαρτήτως από την ροπή του φορτίου που θα συμπλέξουμε [24].

Στην περίπτωση χωρίς φορτίο, λόγω της μικρής ολίσθησης η τάση εξ' επαγωγής στο τύλιγμα του δρομέα E_r είναι επίσης πολύ μικρή, όπως και το ρεύμα στον δρομέα I_r και το πεδίο που αναπτύσσει B_{rs} . Επιπρόσθετα η αντίδραση του δρομέα είναι πολύ μικρή σε σχέση με την ωμική του αντίσταση λόγω της χαμηλής συχνότητας των επαγόμενων τάσεων, άρα τα I_r και E_r είναι σχεδόν συμφασικά.

Η ροπή που αναπτύσσεται συνολικά υπολογίζεται από τον τύπο :

$$T_e = C_T * B_m * B_{rs} * \sin\delta \quad (2.13)$$

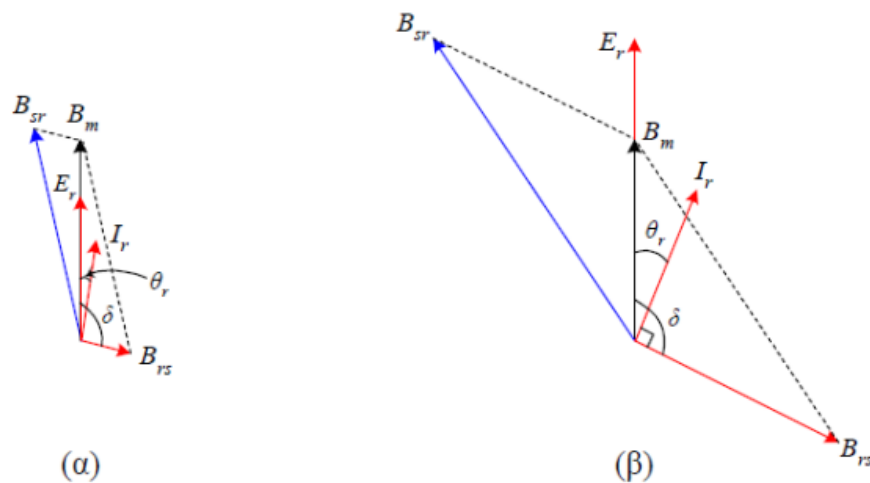
Στην περίπτωση χωρίς φορτίο το B_{rs} είναι πολύ μικρό, επομένως και η ροπή είναι πολύ μικρή, ίσα ίσα όση χρειάζεται για να "υπερνικήσει" τις απώλειες.

Στην περίπτωση που αυξηθεί το φορτίο, η ολίσθηση αυξάνεται, συνεπώς και η τάση που επάγεται στον δρομέα. Μαζί αυξάνεται και η συχνότητα των ηλεκτρικών μεγεθών στον

δρομέα , άρα και η διαφορά φάσης μεταξύ των E_r και I_r , αφού πλέον η αντίδραση με την αντίσταση του δρομέα είναι συγκρίσιμες. Η επίδραση του μαγνητικού πεδίου του δρομέα B_{rs} υπερσχύει της γωνίας δ , μέχρι το σημείο ανατροπής.

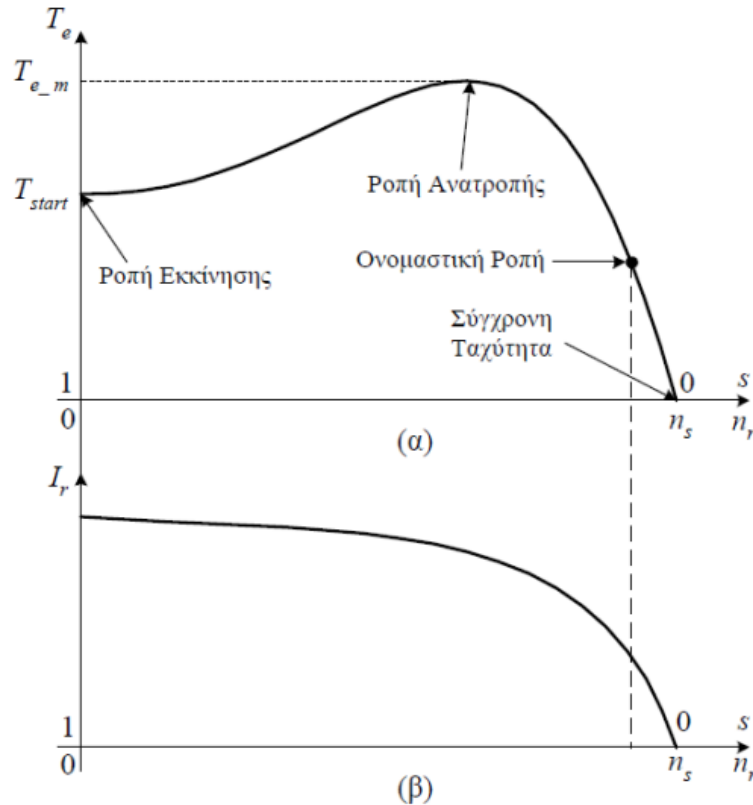
Όταν η ροπή του φορτίου γίνει μεγαλύτερη από την ροπή ανατροπής , η επίδραση του $\sin\delta$ είναι μεγαλύτερη από αυτή του μαγνητικού πεδίου και ως αποτέλεσμα η ροπή που αναπτύσσει ο κινητήρας μειώνεται μέχρι που σταματάει (παθητικό φορτίο). Στην ονομαστική λειτουργία του κινητήρα, η ροπή είναι συνήθως περίπου 3 φορές μικρότερη από την ροπή ανατροπής [25].

Παρακάτω βλέπουμε ένα σχήμα για κάθε περίπτωση με την διαφορά φάσης αλλά και τα μέτρα μεταξύ των μεγεθών της επαγωγικής μηχανής α) χωρίς φορτίο και β) με φορτίο :



Η μεταβολή το ρεύματος στον δρομέα σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του απεικονίζεται στο σχήμα 2.11. Κατά την εκκίνηση της μηχανής, η ροπή είναι συνήθως 150% μεγαλύτερη από την ροπή στην ονομαστική λειτουργία.

Σε τιμές κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα η μεταβολή του ρεύματος και της ροπής αλλάζει γραμμικά επειδή η αντίσταση (που είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ολίσθηση) είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίδραση του δρομέα , άρα η αντίδραση δεν επηρεάζει την συνάρτηση. Σε ροπές πριν το σημείο ανατροπής ο συντελεστής ισχύος στον δρομέα γίνεται πολύ μικρός και η ροπή μειώνεται , αντί να συνεχίσει να αυξάνεται.



Εικόνα 2.11: Χαρακτηριστική (α) Ροπής - Στροφών (β) Ρεύμα - Στροφών [17]

2.7 Ανάλυση ηλεκτρικών μηχανών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

[26] Όταν μια μηχανή δουλεύει σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, η ταχύτητα είναι σταθερή ενώ οι τάσεις και τα ρεύματα εκφράζονται σε ημιτονοειδής συναρτήσεις. Είναι γνωστό ότι σε αυτή την κατάσταση μπορούμε, αν γνωρίζουμε την τάση και τις παραμέτρους της μηχανής, να υπολογίσουμε ρεύματα και ολίσθηση. Όμως κατά την εκκίνηση και στις υπόλοιπες δυναμικές καταστάσεις, μπορούμε μεν μέσω μετασχηματισμού PARK να υπολογίσουμε κάποια αποτελέσματα, χωρίς όμως μεγάλη ακρίβεια, λόγω των πολλών συμβάσεων που κάνουμε στην μέθοδο αυτή.

[27] Με την χρήση Ηλεκτρονικού Υπολογιστή μπορούμε να προσεγγίσουμε ακόμα καλύτερα τέτοια ζητήματα. Εξετάζουμε σε 2D περιβάλλον το μοντέλο, επιλύοντας τις εξισώσεις Maxwell για κάθε σημείο του χώρου κάθε χρονική στιγμή. Έτσι υπολογίζουμε τα ρεύματα αυτεπαγωγής καθώς τα ρεύματα και οι τάσεις στην είσοδο μεταβάλλονται ημιτονοειδώς με τον χρόνο. Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής επιλύει τη διανυσματική εξίσωση Helmholtz, θεωρώντας σαν άγνωστο το μαγνητικό δυναμικό A , το οποίο προκύπτει από τον τύπο :

$$\nabla^2 A = -\mu J \quad (2.14)$$

Αφού υπολογίσουμε το A μπορούμε πλέον να επιλύσουμε το B από τη σχέση :

$$B = \nabla \times A \quad (2.15)$$

Η εξίσωση που επιλύεται είναι η εξής :

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J_V - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (2.16)$$

όπου J_V : τα ρεύματα στα τυλίγματα των εξωτερικών κυκλωμάτων

$\sigma \frac{\partial A}{\partial t}$: τα επαγόμενα ρεύματα

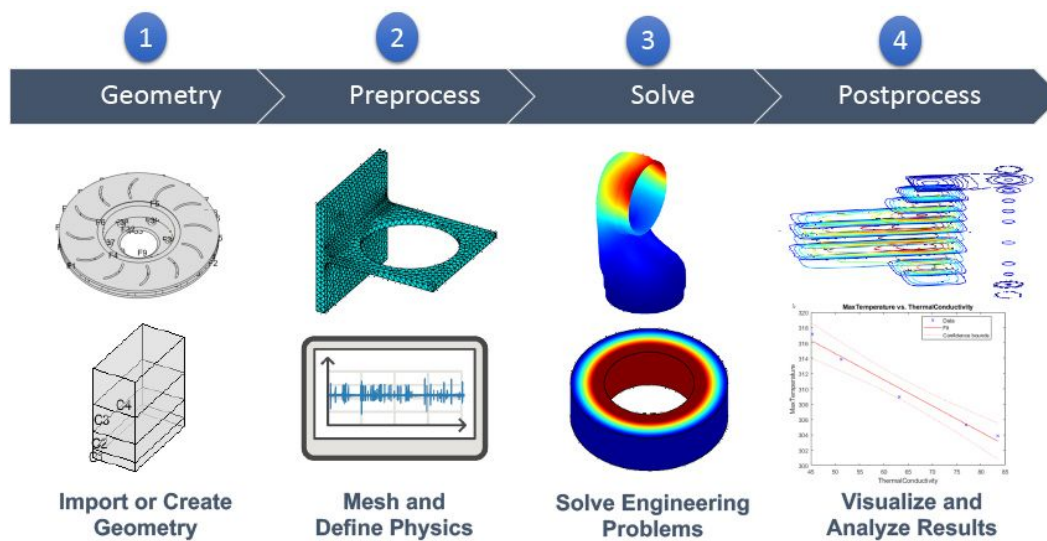
Ο παραπάνω τύπος μπορεί να απλουστευθεί ως :

$$-\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla A_z = J_V - \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} \quad (2.17)$$

Αφού το μαγνητικό δυναμικό και τα ρεύματα μεταβάλλονται ημιτονοειδώς , μπορούν να εκφραστούν σαν τα πραγματικά μέρη των μιγαδικών ποσοτήτων $A_c e^{j\omega t}$ και $J_c e^{j\omega t}$. Η εξίσωση λοιπόν 2.18 μετασχηματίζεται ως εξής :

$$-\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla A_c = J_V - i\omega\sigma A_c \quad (2.18)$$

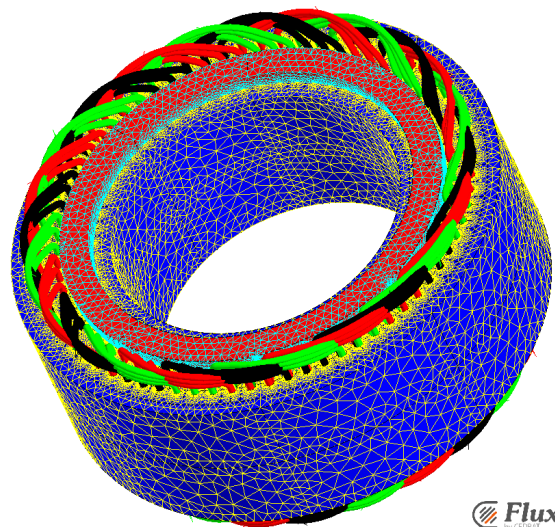
την οποία μπορούμε να λύσουμε με μιγαδική ανάλυση.



Εικόνα 2.12: Διαδικασία Ανάλυσης σε 3D Software [28]

[25] Για την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων απαιτούνται τα εξής βασικά στάδια :

- Αρχικά, η γεωμετρία της ασύγχρονης μηχανής εισάγεται σε ένα ειδικό λογισμικό (**Sim-center Magnet**) , όπου δημιουργείται το μοντέλο είτε σε δύο είτε σε τρεις διαστάσεις ανάλογα με την περίπτωση και την υπολογιστική ισχύ.
- Στη συνέχεια, το μοντέλο χωρίζεται σε πεπερασμένα στοιχεία και υπολογίζεται το πλέγμα (**mesh**). Μετά επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος επίλυσης και εισάγονται τυχόν επιπλέον δεδομένα που μπορεί να χρειάζονται. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται με τη βοήθεια λογισμικών που ονομάζονται προεπεξεργαστές (**pre-processors**).
- Μόλις ολοκληρωθεί η προετοιμασία των δεδομένων, αυτά εισάγονται σε ένα λογισμικό επίλυσης (**solver**), το οποίο χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους για την επίλυση προβλήματος στις δύο ή τρεις διαστάσεις.
- Τέλος, όταν η επίλυση ολοκληρωθεί, τα αποτελέσματα πρέπει να επεξεργαστούν και να παρουσιαστούν μέσω ενός μετεπεξεργαστή(**post-processor**), ώστε ο χρήστης να μπορεί να τα αναλύσει και να τα αξιοποιήσει (στην περίπτωση μας **Matlab**).



Εικόνα 2.13: Πλέγμα σε σχεδιασμένη ηλεκτρική μηχανή πεπερασμένων στοιχείων [29]

Κεφάλαιο 3

Καταπόνηση, σφάλματα και διάγνωση

3.1 Καταπονήσεις και γήρανση ηλεκτρικών μηχανών

Υπάρχουν τέσσερις βασικές κατηγορίες καταπόνησης των ηλεκτρικών μηχανών κατά την διάρκεια λειτουργίας τους, οι οποίες είναι γνωστές και ως TEAM : Thermal , Electrical , Ambient και Mechanical .

3.1.1 Θερμική καταπόνηση :

Σε μη ιδανικές καταστάσεις , όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ρεύμα , από την στιγμή που υπάρχει έστω και ελάχιστη αντίσταση , παράγει θερμικές απώλειες και η θερμοκρασία του ανεβαίνει.

[30] Αυτή η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει κυρίως το μονωτικό υλικό που βρίσκεται ανάμεσα στους αγωγούς. Υπό σταθερή θερμοκρασία T η καταπόνηση του μονωτικού υλικού εκφράζεται μαθηματικά με τον εξής τύπο (εξίσωση Arrhenious) :

$$L_T(T) = L_0 e^{\frac{B}{T} - \frac{B}{T_0}} \quad (3.1)$$

όπου L_0 ο χρόνος ζωής υπό θερμοκρασία αναφοράς T_0 ,

B παράμετρος για την ενέργεια ενεργοποίησης της διαδικασίας γήρανσης.

Επιπρόσθετα , λόγω της μη ομογενής κατανομής της θερμοκρασίας κατά το μήκος του κάθε αγωγού , υπάρχει καταπόνηση που προκαλείται λόγω των διαφορετικών επιπέδων διαστολής μεταξύ αγωγού και μόνωσης. Όσο γρηγορότερη είναι η αύξηση της θερμοκρασίας , τόσο πιο ανομοιόμορφη είναι και η θερμοκρασία κατά μήκος του αγωγού.

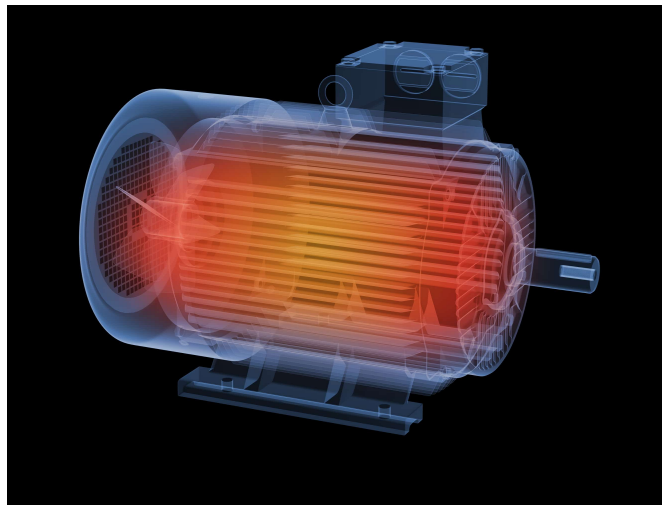
Η θερμο-μηχανική καταπόνηση , όπως ονομάζεται, είναι συνάρτηση της μεταβολής της θερμοκρασίας

ως προς τον χρόνο και μοντελοποιείται μαθηματικά ως εξής :

$$L_M(v) = (1 + k|v|)^{-N} \quad (3.2)$$

Όπου L_m ο χρόνος ζωής της μόνωσης υπο σταθερή μεταβολή θερμοκρασίας v , ενώ k και N παράμετροι που υπολογίζονται κατά τα τεστ γήρανσης.

Τέλος , το μονωτικό υλικό διαλέγεται έτσι ώστε να έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα ώστε να δημιουργούν μονοπάτι μετάδοσης θερμότητας από τους αγωγούς προς τον πυρήνα. Για αυτόν τον λόγο δεν πρέπει να υπάρχουν κενά αέρος , τα οποία αυξάνουν τη θερμική αντίσταση της μόνωσης.



Εικόνα 3.1: Θερμική καταπόνηση ηλεκτρικής μηχανής [31]

3.1.2 Ηλεκτρική καταπόνηση :

[32] Λόγω μη ομοιόμορφης κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου στα τυλίγματα του στάτη , πολλές φορές εμφανίζονται ηλεκτρικοί σπινθηρισμοί , είτε στα διάκενα αέρα είτε στο μονωτικό υλικό. Με αυτόν τον τρόπο υποβαθμίζεται προοδευτικά η διηλεκτρική ιδιότητα των μονωτικών υλικών και τελικά δημιουργούν ηλεκτρική διάσπαση.

Οι ηλεκτρικές αυτές διασπάσεις ονομάζονται μερικές εκκενώσεις και προϋποθέτουν να υπάρχει υψηλή τάση , πάνω από 1 kV , για να εμφανιστούν σε μονωτικό υλικό. Υπάρχουν μονωτικά υλικά όπως η εποξική ρητίνη με αντοχές της τάξεως των 200kV/mm , δηλαδή 100 φορές ισχυρότερα από τον αέρα. Πολλές φορές επίσης η ψύξη της μηχανής γίνεται μέσω πεπιεσμένου υδρογόνου αντί για αέρα , κάτι που αυξάνει σημαντικά την τάση διάσπασης.

[33] Η αντοχή της αέριας ηλεκτρικής μόνωσης εξαρτάται και αυτή από την πίεση αλλά και την υγρασία, με βάση τον νόμο του paschen :

$$V_B = \frac{B_{pd}}{\ln(Apd) - \ln[\ln(1 + \frac{1}{\gamma_{SE}})]} \quad (3.3)$$

,όπου V_B η τάση διάσπασης, p η πίεση σε pascals, d η απόσταση του διακένου, A ο κορεσμός ιονισμού και B η ενέργεια ιονισμού. Τα A και B υπολογίζονται πειραματικά. Τέλος το γ_{SE} είναι ο αριθμός των δευτερεύοντων ηλεκτρονίων που παράγονται ανά προσπίπτον θετικό ιόν.

Πέρα από την μη ομοιόμορφη κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου με τις παραπάνω επιπτώσεις, υπάρχουν φυσικά και άλλοι λόγοι και καταστάσεις ηλεκτρικής καταπόνησης της μηχανής, όπως η ασταθής τροφοδοσία, οι υπερφορτώσεις και τα μη ισορροπημένα ηλεκτρικά φορτία.



Εικόνα 3.2: Ηλεκτρική διάσπαση στη μόνωση ηλεκτρικής μηχανής [34]

3.1.3 Περιβαλλοντική καταπόνηση :

Σε περίπτωση λειτουργίας μίας μηχανής σε περιβάλλον με πολλή σκόνη, διάφορα χημικά στοιχεία που προκαλούν διάβρωση ή σε περιβάλλον με υγρασία υπάρχει μεγάλη πιθανότητα υποβάθμισης και πρόωρης γήρανσης, δηλαδή μπορεί να επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό τόσο η αποδοτικότητα της όσο και η διάρκεια ζωής της.

[35] Η σκόνη συσσωρεύεται στις εξωτερικές και εσωτερικές επιφάνειες της μηχανής. Μπορεί να καλύψει τα πτερύγια ψύξης και να κλείσει τις οπές εξαερισμού του κινητήρα, εμποδίζοντας την σωστή ψύξη και προκαλώντας υπερθέρμανση. Επίσης πολλές φορές η σκόνη περιέχει σωματίδια μετάλλων που μπορούν να προκαλέσουν βραχυκυκλώματα, σχηματίζοντας ένα αγώγιμο μονοπάτι ανάμεσα σε σημεία που θα έπρεπε να είναι μονωμένα. Για την αντιμετώπιση

της σκόνης συνήθως τοποθετούνται φίλτρα αέρα σε όλα τα απαραίτητα σημεία της μηχανής και προγραμματίζεται τακτική συντήρηση και καθαρισμός των επιφανειών της.



Εικόνα 3.3: Μόλυνση από σκόνη (εικόνα α και β) και τσιμέντο (εικόνα γ)

Όταν υπάρχει τοξικό περιβάλλον με χημικά στοιχεία που διαβρώνουν τη μηχανή ή όταν υπάρχει παρουσία υγρασίας ή αλάτων, μεταλλικά μέρη όπως ο δρομέας ή τα ρουλεμάν αρχίζουν να αλλοιώνονται. Αυτό μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια, να προκαλέσει τριβές και να μειώσει την απόδοση της μηχανής. Σε ακόμα πιο προχωρημένα στάδια μπορεί να υπάρξει πλήρης αποτυχία λειτουργίας του κινητήρα. Η τακτική συντήρηση και η εφαρμογή αντιδιαβρωτικών επιστρώσεων είναι η πιο συχνή μέθοδος αντιμετώπισης καθώς και η επιλογή εξαρχής του σημείου τοποθέτησης της μηχανής ώστε να δέχεται την λιγότερη δυνατή φθορά από το περιβάλλον.

3.1.4 Μηχανική καταπόνηση :

[36] Μερικοί από τους πιο συχνούς παράγοντες που συμβάλλουν στην μηχανική καταπόνηση της μηχανής είναι η κακή ευθυγράμμιση, μη ομοιόμορφη κατανομή βάρους του δρομέα ή του φορτίου, προβλήματα στον δρομέα και βλάβες στα ρουλεμάν.

Τα ρουλεμάν υποστηρίζουν τον δρομέα και επιτρέπουν την ομαλή περιστροφή του. Για πολλούς λόγους όπως σκόνη και υγρασία, διάβρωση, κατασκευαστικό λάθος ή λόγω της βαρύτητας σε βάθος χρόνου, κάποιο ρουλεμάν μπορεί να ξεκινήσει να δυσλειτουργεί. Σε περίπτωση αστοχίας ενός ρουλεμάν, η μηχανή μπορεί παράγει αυξημένες δονήσεις και θόρυβο που σε βάθος χρόνου αυξάνουν την γήρανση της μηχανής. Επίσης λόγω της ελάχιστης απόστασης του διαχένου, η αστοχία σε κάποιο ρουλεμάν μπορεί να φέρει σε επαφή τον δρομέα με τον στάτη προκαλώντας σοβαρές ζημιές στην μηχανή.

Επίσης ένα πολύ συχνό κατασκευαστικό λάθος είναι η λανθασμένη ευθυγράμμιση μεταξύ του άξονα του φορτίου και της μηχανής, κάτι που εισάγει αρμονικές κατά την περιστροφή τους και προκαλεί υπερβολική φθορά στα ρουλεμάν.

Ακόμα, προβλήματα στον δρομέα όπως σπασμένες μπάρες ή κατεστραμμένοι δακτύλιοι μπορούν να προκαλέσουν ταλαντώσεις στην ροπή επιδεινώνοντας ακόμα περισσότερο τη μηχανική φθορά.

Η προληπτική συντήρηση και η έγκαιρη ανίχνευση είναι κρίσιμα για την αποφυγή δαπανηρών επισκευών ή απρογραμμάτιστης διακοπής λειτουργίας. Παρακάτω θα αναλύσουμε τις μεθόδους για την πρόληψη και την διάγνωση τέτοιων καταστάσεων.



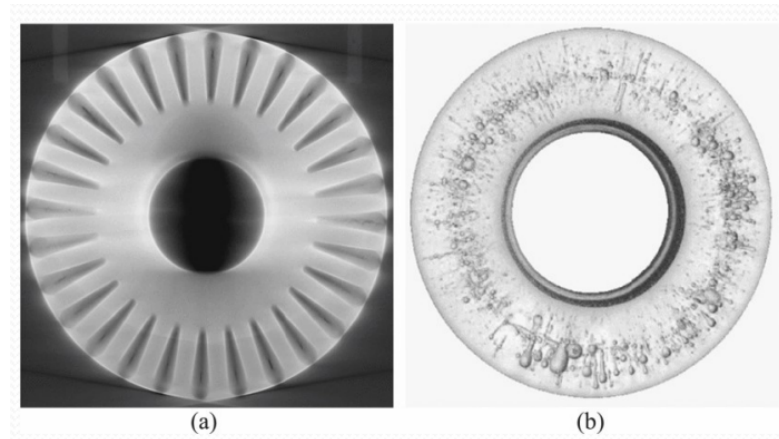
Εικόνα 3.4: Αστοχία ρουλεμάν ηλεκτρικής μηχανής λόγω μηχανικής καταπόνησης [37]

3.2 Σφάλματα και επιπτώσεις

Πέρα από τις καταπονήσεις που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, υπάρχουν και άλλοι λόγοι για τους οποίους η μηχανές εμφανίζουν σφάλματα. Σε πολλές περιπτώσεις υπάρχουν κατασκευαστικές ατέλειες.

3.2.1 Πορότητα

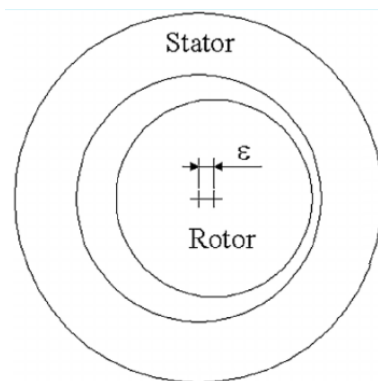
[38] Τίποτα στην φύση δεν είναι ιδανικό και απόλυτα συμμετρικό. Οι ασυμμετρίες αυτές προσπαθούμε να είναι όσο το δυνατόν μικρότερες αλλά πάντα υπάρχουν σε κάποιο βαθμό. Μικρές τρύπες είναι κατανεμημένες κατά το μήκος των υλικών κατασκευής του κινητήρα. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται πορότητα. Με βάση την πορότητα καθορίζεται σε κάποιο βαθμό η θερμοκρασία λειτουργίας και η αποδοτικότητα μιας μηχανής. Η πορότητα καθορίζεται από τον παράγοντα γεμίσματος (Fill Factor [39]) που αποτελεί το ποσοστό επι τοις εκατό συμπαγούς υλικού. Προφανώς όσο μεγαλύτερο είναι το Fill Factor τόσο μικρότερη είναι η πορότητα. Τυπικές τιμές του παράγοντα αυτού είναι 85%-98%.



Εικόνα 3.5: Σκανάρισμα με ακτίνες Χ πορότητας (a) δρομέα (b) δακτυλίων σύνδεσης [39]

3.2.2 Στατική Εκκεντρότητα

[40] Άλλη μια πιθανή κατασκευαστική ατέλεια αποτελεί η στατική εκκεντρότητα. Αυτή είναι πιθανό να προκύπτει από την λανθασμένη τοποθέτηση του δρομέα μέσα στον στάτη κατά την συναρμολόγηση της μηχανής είτε την ελλιπή στήριξή του δρομέα από τα ρουλεμάν. Άλλη μια πιθανή αιτία είναι η μη τέλεια κυκλική τομή του δρομέα κατά όλο του το μήκος. Παρά τις επιπτώσεις της στατικής εκκεντρότητας, το φαινόμενο αυτό δεν επιδεινώνεται με την πάροδο του χρόνου κατά τη λειτουργία της μηχανής.



Εικόνα 3.6: Μετατοπισμένος άξονας λόγω στατικής εκκεντρότητας [39]

3.2.3 Ανθρώπινος Παράγοντας

Επίσης σπουδαίο ρόλο παίζει και ο ανθρώπινος παράγοντας ο οποίος είναι μείζονος σημασίας παράγοντας για την αξιόπιστη λειτουργία μιας μηχανής. Ο άνθρωπος είναι υπεύθυνος να επιλέξει την σωστή μηχανή με βάση την εφαρμογή στην οποία θα αξιοποιηθεί. Έπειτα πρέπει να γίνεται σωστή συντήρηση αλλά και να λειτουργεί όπως ακριβώς προτείνει ο κατασκευαστής με βάση τις μελέτες που έχει κάνει. Τέλος σε περίπτωση που γίνει λανθασμένη εκτίμηση

από εξειδικευμένο άνθρωπο για πιθανά σφάλματα ή υγιής λειτουργία μιας μηχανής (ψευδούς διάγνωσης) μπορεί να υπάρξουν σοβαρές επιπτώσεις.



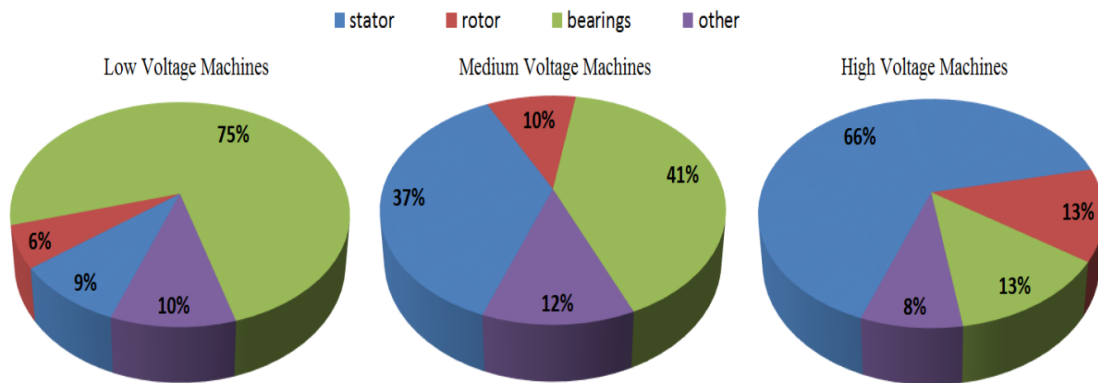
Εικόνα 3.7: Λανθασμένος χειρισμός σύμπλεξης φορτίου [41]

3.2.4 Ποσοστά αστοχίας

[42] Τα πιο συχνά σφάλματα που προκύπτουν σε μηχανές μικρής και μεσαίας τάσης είναι τα ρουλεμάν, ενώ στην περίπτωση μεγάλων τάσεων ο στάτης είναι αυτός που προκαλεί τα 2/3 των προβλημάτων.

Ηλεκτρικά σφάλματα στον δρομέα αποτελούν οι σπασμένες μπάρες ή η αποκόλληση των δακτυλίων στα άκρα των μπαρών (ανοιχτοκύκλωμα). Επίσης περιπτώσεις βραχυκυκλώματος αποτελεί η επαφή μεταξύ μπαρών και διαφορετικών τυλιγμάτων. Ως προς τα μαγνητικά σφάλματα , ο σίδηρος σε βάθος χρόνου μπορεί να παρουσιάσει μαγνητική ανισοτροπία. Σε περίπτωση μηχανής μονίμων μαγνητών υπάρχει η απομαγνήτωση τους ως βασικό πιθανό μαγνητικό σφάλμα. Σφάλματα εκκεντρότητας επίσης προκύπτουν είτε σε περίπτωση που λυγίσει ο άξονας είτε αν ο σίδηρος του δρομέα δεν παραμείνει απολύτως κυκλικός (ovality).

[43] Ο στάτης παρουσιάζει πολύ πιο σοβαρά ηλεκτρικά σφάλματα , ειδικά σε περίπτωση βραχυκυκλώματος. Εκεί θα παίζει καθοριστικό ρόλο το είδος του βραχυκυκλώματος για τον χρόνο που χρειάζεται η μηχανή μέχρι να σταματήσει να λειτουργεί. Όταν τα τυλίγματα της ίδιας φάσης βραχυκυκλώσουν ίσως προλάβουμε να διακόψουμε το πρόβλημα με κάποιο ρελέ ενώ αν υπάρξει βραχυκύκλωμα μεταξύ φάσης και γείωσης τα αποτελέσματα είναι καταστροφικά.



Εικόνα 3.8: Κατανομή σφαλμάτων ηλεκτρικών μηχανών βάση τάσης τροφοδοσίας [39]

3.3 Περιπτώσεις διάγνωσης

[44] Κατά την διαδικασία διάγνωσης σφαλμάτων σε μια μηχανή μπορούν να προκύψουν τέσσερα σενάρια σχετικά με το αποτέλεσμα της διάγνωσης αλλά και την ορθότητα αυτής :

- **False Negative (Ψευδώς Αρνητικό)** : Το διαγνωστικό σύστημα δεν ανιχνεύει μια υπάρχουσα βλάβη. Έτσι η μηχανή συνεχίζει να λειτουργεί έχοντας κάποιο πρόβλημα , το οποίο αν δεν εντοπιστεί εγκαίρως μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή βλάβη.
- **False Positive (Ψευδώς Θετικό)** : Το διαγνωστικό σύστημα εντοπίζει σφάλμα που στην πραγματικότητα δεν υπάρχει. Αν ο αριθμός των μπαρών ή των πτερυγίων ψύξης είναι ενός συγκεκριμένου αριθμού μπορούν να παρουσιάζουν αρμονικές παρόμοιες με αυτές σε περίπτωση βλάβης. Αυτή η περίπτωση μπορεί να οδηγήσει σε περιττές επεμβάσεις συντήρησης ή αντικατάστασης εξαρτημάτων , αυξάνοντας το κόστος χωρίς λόγο.
- **True Positive (Αληθώς Θετικό)** : Στην ιδανική περίπτωση το διαγνωστικό σύστημα εντοπίζει επακριβώς την βλάβη και δίνει την δυνατότητα στους τεχνικούς να επέμβουν εγκαίρως και να διορθώσουν την βλάβη πριν επιδεινωθεί.
- **True Negative (Αληθώς Αρνητικό)** : Το διαγνωστικό σύστημα σωστά δεν εντοπίζει κανένα πρόβλημα και συνεχίζεται ομαλά η λειτουργία της μηχανής.

[45] Η αξιοπιστία και η ακρίβεια των διαγνωστικών μεθόδων είναι κρίσιμες για να αποφεύγονται ψευδώς θετικά ή ψευδώς αρνητικά αποτελέσματα, ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία, η αξιοπιστία και η ελαχιστοποίηση του κόστους των μηχανών.



Εικόνα 3.9: Διαδικασία διάγνωσης μηχανής σε βιομηχανικό περιβάλλον [46]

3.4 Διαγνωστικές μέθοδοι ηλεκτρικών μηχανών

Η έγκαιρη ανίχνευση των βλαβών είναι κρίσιμη για την αποφυγή σοβαρών ζημιών, τη μείωση του κόστους συντήρησης και την ανατροπή διακοπής της λειτουργίας της μηχανής. Για αυτόν τον λόγο υπάρχουν κάποιες τυποποιημένες διαγνωστικές μέθοδοι για τον εντοπισμό τέτοιων βλαβών. Ανάλογα με την βλάβη υπάρχει και η κατάλληλη μέθοδος ανάλυσης κάποιου σήματος που θα αποκαλύψει την επίδραση του σφάλματος με την μορφή αρμονικών. Όλες οι διαγνωστικές μέθοδοι έχουν κοινή βάση. Το σφάλμα προκαλεί ασυμμετρία στο μαγνητικό πεδίο, και αυτή με την σειρά της προκαλεί ασυμμετρία σε όλες τις μαγνητικές, ηλεκτρικές και μηχανικές κυματομορφές. Εμείς στην δική μας περίπτωση αναλύουμε την κυματομορφή του ρεύματος και της μαγνητικής ροής και ψάχνουμε τις υπογραφές των σφαλμάτων στο φάσμα των συχνοτήτων. Παρόλα αυτά θα δούμε επιγραμματικά και τις υπόλοιπες πιο γνωστές μεθόδους διαγνωστικής.

3.4.1 Ανάλυση Υπογραφής Ρεύματος Στάτη (MCSA) :

[47] Η MCSA αποτελεί μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο για την ανίχνευση βλαβών σε ηλεκτρικές μηχανές, ειδικά στους επαγωγικούς κινητήρες. Λειτουργεί μέσω της ανάλυσης παραμορφώσεων στο ηλεκτρικό ρεύμα, οι οποίες μπορούν να υποδείξουν διάφορα είδη βλαβών, όπως ελαττώματα στις μπάρες του δρομέα, προβλήματα στα ρουλεμάν και εκκεντρότητες στο διάκενο. Αυτή η τεχνική παρακολουθεί το φάσμα συχνοτήτων του σήματος του ηλεκτρικού ρεύματος της μηχανής για να ανιχνεύσει ανωμαλίες και αποκλίσεις από την κανονική λειτουργία, ώστε να γίνεται έγκαιρος εντοπισμός πιθανών προβλημάτων.

Τα παραδοσιακά συστήματα παρακολούθησης συχνά απαιτούν φυσικούς αισθητήρες, οι οποίοι είναι δύσκολο και δαπανηρό να εγκατασταθούν και να συντηρηθούν, ειδικά σε περιπτώσεις όπως οι Ηλεκτρικές Υποβρύχιες Αντλίες (ESPs) που λειτουργούν σε αντίξοες συνθήκες. Η MCSA από την άλλη μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς άμεση παρέμβαση στη λειτουργία του κινητήρα, καθώς απαιτεί μόνο την εγκατάσταση αισθητήρων στον πίνακα ελέγχου της μηχανής. Αυτό την καθιστά μια ευρέως διαδεδομένη και οικονομικά αποδοτική λύση για προληπτική συντήρηση.



Εικόνα 3.10: Διαδικασία διάγνωσης με μέθοδο MCSA στον πίνακα ελέγχου [48]

Η MCSA είναι ακόμα υπό εξέλιξη, και για την ώρα έχει περιορισμούς κυρίως στα μηχανικά προβλήματα όπως βλάβες στα ρουλεμάν ή ανισορροπία φορτίου, όπου σε αυτές τις περιπτώσεις ενδείκνυται παραπάνω η ανάλυση δονήσεων (vibration analysis). Ωστόσο η έρευνα συνεχίζεται για την δημιουργία αποδοτικότερων αλγορίθμων και τον πιο αξιόπιστο εντοπισμό σφαλμάτων μέσω της MCSA. Γίνεται δηλαδή προσπάθεια να μειωθούν τα ψευδώς θετικά (False Positive) αποτελέσματα και να αντιμετωπιστούν τα ζητήματα μηχανικής παρεμβολής.

- Σπασμένες Μπάρες δρομέα

Μια τέτοια προσπάθεια κάνουμε και εμείς στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, στην περίπτωση ανάλυσης του ρεύματος σε μηχανή με σπασμένες μπάρες. Σε περίπτωση αρμονικής λειτουργίας της μηχανής οι μπάρες του δρομέα μεταφέρουν ρεύμα με συχνότητα $s \cdot f_s$. Εάν σπάσει μια μπάρα δημιουργείται ένα κύμα με συχνότητα $-s \cdot f_s$, άρα ως προς ακίνητο παρατηρητή δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο με συχνότητα $(1 - 2s) \cdot f_s$. Το σφάλμα σπασμένης μπάρας επάγει τάση στα τυλίγματα του στάτη με αυτή τη συχνότητα και προσπαθούμε μέσω MCSA να την εντοπίσουμε :

$$f_{bb} = (1 \pm 2ks)f_s, k \in \mathbb{N} \quad (3.4)$$

[49] Οι σπασμένες μπάρες, εκτός από την βασική αρμονική (50 Hz) έχουν αντίκτυπο και στις υπόλοιπες αρμονικές της μηχανής. Ο ακόλουθος τύπος περιγράφει γενικευμένα την παραγωγή αρμονικών σχετικών με σφάλματα σπασμένων μπαρών γύρω από οποιαδήποτε αρμονική του στάτη :

$$f_{bb2} = \left[\frac{k}{p}(1-s) \pm s \right] f_s, \frac{k}{p} \in \mathbb{N} \quad (3.5)$$

Η εμπειρία έχει δείξει ότι αυτές οι υπογραφές είναι ενδεικτικές σφάλματος όταν το πλάτος τους είναι μεγαλύτερο από -42 dB, κανονικοποιημένο ως προς το πλάτος της βασικής αρμονικής του ρεύματος στάτη.

- Εκκεντρότητα

Στην περίπτωση της εκκεντρότητας πάλι η MCSA μπορεί να εντοπίσει αρμονικό περιεχόμενο. Αναλύοντας μαθηματικά την αλληλεπίδραση των πόλων του στάτη με τις αυλακώσεις του δρομέα σε μια τριφασική ασύγχρονη μηχανή, προκύπτει ο τύπος της εκκεντρότητας :

$$f_{ecc} = \left[(R \pm n_d) \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm 2n_{sa} \pm n_{ws} \right] f_s \quad (3.6)$$

όπου R ο αριθμός των μπαρών του δρομέα

$n_d = 0$ για στατική και 1,2,3.... για δυναμική εκκεντρότητα

n_{sa} σχετίζεται με τα επίπεδα κορεσμού

n_{ws} σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά των τυλιγμάτων του στάτη

- Principal Slot Harmonics

[50] Μέσα από αυτόν τον τύπο επίσης μπορούμε να εντοπίσουμε τις βασικές αρμονικές λόγω των αυλακώσεων του δρομέα, όταν δεν υπάρχει κορεσμός ούτε δυναμική εκκεντρότητα ($n_{sa} = 0$ και $n_d = 0$). Αυτές ονομάζονται Principal Slot Harmonics (PSH) και δίνονται από τον τύπο :

$$f_{PSH} = \left[R \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm n_{ws} \right] f_s \quad (3.7)$$

Με βάση τους δύο τελευταίους τύπους, έχει αποδειχτεί ότι οι αρμονικές PSH παρουσιάζονται και στην υγιή κατάσταση της μηχανής, σε περιπτώσεις που ο αριθμός των αυλακώσεων του δρομέα είναι πολλαπλάσιος του αριθμού των πόλων της. Αυτή η σχέση εκφράζεται ως εξής :

$$R = 2p [3(m \pm q) \pm r], \quad m \pm q = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad r = 0, 1 \quad (3.8)$$

Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι αδύνατο να ανιχνευθεί στατική ή δυναμική εκκεντρότητα, αλλά είναι δυνατό να υπολογιστεί η μεικτή εκκεντρότητα μέσω της σχέσης :

$$f_{ecc2} = [f_s \pm k f_r], \quad k = 1, 2, 3, \dots, \quad f_r = \frac{1-s}{p} f_s \quad (3.9)$$

όπου f_r η συχνότητα περιστροφής του δρομέα k ακέραιος πολλαπλασιαστής που καταγράφει τις αρμονικές πλευρικής ζώνης υψηλότερης τάξης.

- Υπογραφές σφαλμάτων στάτη

Τέλος μέσω της MCSA μπορούμε να εντοπίσουμε βλάβες στα τυλίγματα του στάτη με αρμονικές της μορφής :

$$f_{sc} = \left(k_r R \frac{1-s}{p} \pm 2k_{sat} \pm k_s \right) f_s \quad (3.10)$$

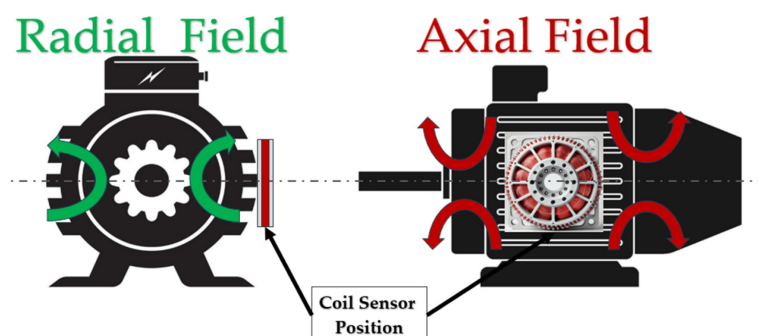
όπου k_r ακέραιος σχετικά με τον δρομέα
 k_{sat} ακέραιος που εξαρτάται από τον κορεσμό
 k_s ακέραιος σχετικά με τον στάτη
και R ο αριθμός των αυλακώσεων του δρομέα.

3.4.2 Ανάλυση Φάσματος Μαγνητικής Ροής :

[51] Η παρακολούθηση της μαγνητικής ροής στο διάκενο ή της σκέδασης αποτελεί μια ισχυρή διαγνωστική μέθοδο , προσφέροντας άμεσες πληροφορίες για την ασυμμετρία της ακτινικής ή αξονικής μαγνητικής ροής που προκαλείται από ανωμαλίες που σχετίζονται με βλάβες. Χρησιμοποιώντας τις συνιστώσες της ακτινικής και αξονικής σκέδασης υπολογίζεται η ροή διακένου η οποία είναι πιο ευαίσθητη στον εντοπισμό βραχυκυκλωμένων σπειρών, προβλήματα αγωγών δρομέα και εκκεντρότητας, σε σχέση με το MCSA και το Vibration Analysis.

[52] Η μελέτη της μαγνητικής ροής στο διάκενο παραμένει ανεπηρέαστη από τις μεταβολές του φορτίου και για αυτόν τον λόγο ενδείκνυται ακόμα παραπάνω για βλάβες δρομέα. Υπάρχουν όμως πρακτικά προβλήματα στην τοποθέτηση αισθητήρων στο διάκενο. Ωστόσο η τοποθέτηση αισθητήρων εξωτερικά της μηχανής, αν και μετράει ασθενέστερα σήματα , αποτελεί μια οικονομικά αποδοτική συμπληρωματική μέθοδο σε υπάρχουσες τεχνικές παρακολούθησης, για την εξέλιξη της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων τους. Στην δική μας περίπτωση θα χρησιμοποιήσουμε το φάσμα της εξωτερικής μαγνητικής ροής για να βγάλουμε αποτελέσματα και να δούμε πόσο αξιόπιστα είναι , τόσο μεμονωμένα , όσο και συνολικά με την μέθοδο μηδενικής ακολουθίας. Αυτή η μέθοδος ονομάζεται Ανάλυση Υπογραφής Εξωτερικής Μαγνητικής Ροής (Stray Flux Signature Analysis ή SFSA).

Η εξωτερική μαγνητική ροή (Stray Flux) είναι η ροή του μαγνητικού πεδίου που εκπέμπεται εξωτερικά από τον στάτη, κάποιο ποσοστό σκεδάζεται (ροή διαρροής) ενώ το υπόλοιπο επιστρέφει ξανά στην μηχανή. Η εξωτερική ροή μπορεί να χωριστεί σε δύο συνιστώσες, στην ακτινική εξωτερική ροή που διαφεύγει από το περίβλημα της μηχανής , και την αξονική εξωτερική ροή που διαφεύγει από τον άξονα περιστροφής του δρομέα. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της εξωτερικής ροής συνήθως αποτελούνται από πηνία με πολλές περιελίξεις για να βελτιώσουν τον λόγο μετασχηματισμού και να παρέχουν πιο ακριβή διαγνωστικά αποτελέσματα.



Εικόνα 3.11: Τοποθέτηση αισθητήρων για εντοπισμό ακτινικής/αξονικής ροής [53]

[54] Η μαγνητική ροή παρουσιάζει παρόμοιο αρμονικό περιεχόμενο με αυτό στα ρεύματα του στάτη. Η μεγάλη διαφοροποίηση τους είναι στις περιττές τριπλές αρμονικές που στην περίπτωση του στάτη αναιρούνται λόγω του σχήματος των τυλιγμάτων για την δημιουργία των μαγνητικών πόλων. Στην περίπτωση της μαγνητικής ροής έχει αποδειχθεί ότι τα ηλεκτρικά σφάλματα στάτη ενισχύουν αρμονικές που είναι στενά συνδεδεμένες με την μηχανική ταχύτητα του δρομέα και εκφράζονται μαθηματικά ως εξής :

$$f_{bb3} = \left[n \pm m \frac{(1-s)}{p} \right] f_s, \quad n, m \in \mathbb{N} \quad (3.11)$$

Επιπρόσθετα εμφανίζονται αρμονικές και στις πλευρικές ζώνες των παραπάνω αρμονικών που υπολογίζονται ως εξής :

$$f_{bb4} = \left[n \pm m \frac{(1-s)}{p} \pm 2ks \right] f_s, \quad n, m, k \in \mathbb{N} \quad (3.12)$$

3.4.3 Ανάλυση Υπογραφών Ροπής :

[55] Η παρακολούθηση της ροπής βοηθά στην ανίχνευση ανωμαλιών σε πραγματικό χρόνο , επιτρέποντας την έγκαιρη διάγνωση βλαβών και τον προγραμματισμό της συντήρησης. Με αυτή την μέθοδο είναι πιθανό να εντοπιστούν βλάβες όπως την κακή ευθυγράμμιση, την ανισορροπία ή τη μηχανική φθορά του συστήματος. Η μέθοδος μπορεί να είναι μη επεμβατική , χρησιμοποιώντας αισθητήρες που μετρούν είτε την περιστροφή του άξονα είτε παραμέτρους όπως το ηλεκτρικό ρεύμα και την τάση, τα οποία μετά από μαθηματική ανάλυση δίνουν την ροπή. Μπορούμε να χωρίσουμε την μέτρηση της ροπής σε δύο βασικές κατηγορίες :

- Άμεση μέτρηση ροπής :

Χρησιμοποιούμε αισθητήρες ροπής περιστροφής ή διατάξεις μέτρησης παραμόρφωσης υλικού (Strain Gauges) που τοποθετούνται στον άξονα της μηχανής για την άμεση μέτρηση της περιστροφικής δύναμης.

- Έμμεση εκτίμηση ροπής :

[56] Με την χρήση μαθηματικών μοντέλων από τα αποτελέσματα αισθητήρων μπορούμε να προσεγγίσουμε την ροπή με μεγάλη ακρίβεια ανάλογα με την διάταξη των αισθητήρων και την πολυπλοκότητα των αλγορίθμων επεξεργασίας. Είτε μέσω της τάσης , των ρευμάτων και της μαγνητικής ροής , είτε με αισθητήρες κυμάτων επιφανειακής ακουστικής (SAW Sensors) , είτε με οπτικούς αισθητήρες μπορούμε να λάβουμε αποτελέσματα για τον προσδιορισμό της ροπής.

Στο δικό μας μοντέλο θα χρησιμοποιήσουμε συμπληρωματικά και τις κυματομορφές της ροπής για να εξάγουμε ακόμα καλύτερα συμπεράσματα για την αποτελεσματικότητα της διαγνωστικής μας μεθόδου.

- Αρμονικό Περιεχόμενο Ροπής

Στην περίπτωση σπασμένων μπαρών του δρομέα μέσω της ανάλυσης **Fourier** εντοπίζονται οι εξής αρμονικές στη ροπή :

$$f_{bb} = 2ksf_s \quad (3.13)$$

όπου k θετικός ακέραιος.

Επιπλέον χαρακτηριστικές είναι και οι υπογραφές γύρω από τα 300 Hz, οι οποίες υπάρχουν ακόμα και στην υγιή λειτουργία αλλά τονίζονται ακόμα περισσότερο στην περίπτωση σπασμένης μπάρας. Αυτές οι αρμονικές μπορούν να εκφραστούν ως εξής.

$$f_{bb2} = 300 \pm 2ksf_s \quad (3.14)$$

Επειδή δεν επηρεάζεται από την ταχύτητα και την ολίσθηση, η ροπή αποτελεί ένα απλό και πολύτιμο εργαλείο για την ανίχνευση βλαβών.

3.4.4 Park Vector Approach (PVA) :

[57] Η προσέγγιση του διανύσματος **Park** αποτελεί ένα πολύτιμο διαγνωστικό εργαλείο για τις ηλεκτρικές μηχανές. Με τη μετατροπή των ρευμάτων του στάτη σε δισδιάστατη αναπαράσταση, η μέθοδος αυτή παρέχει διαγνωστικές ενδείξεις τόσο για ηλεκτρικά όσο και μηχανικά προβλήματα.

Για τον υπολογισμό του διανύσματος **Park**, μετατρέπουμε το τριφασικό σύστημα συντεταγμένων των ρευμάτων του στάτη σε ένα δισδιάστατο κινούμενο σύστημα που αναπαρίσταται από τις συντεταγμένες d και q .

Τα ρεύματα I_d και I_q καθορίζονται από τα προηγουμένως μετρημέρα ρεύματα σε κάθε φάση, I_a , I_b και I_c , υπολογιζόμενα ως εξής :

$$I_d = \sqrt{\frac{2}{3}}I_a - \sqrt{\frac{1}{6}}I_b - \sqrt{\frac{1}{6}}I_c \quad (3.15)$$

$$I_q = \sqrt{\frac{1}{2}}I_b - \sqrt{\frac{1}{2}}I_c \quad (3.16)$$

Υπό ιδανικές συνθήκες τα τριφασικά ρεύματα οδηγούν στο διάνυσμα **Park** ως εξής :

$$I_d = \frac{\sqrt{6}}{2}I_M \sin(\omega t) \quad (3.17)$$

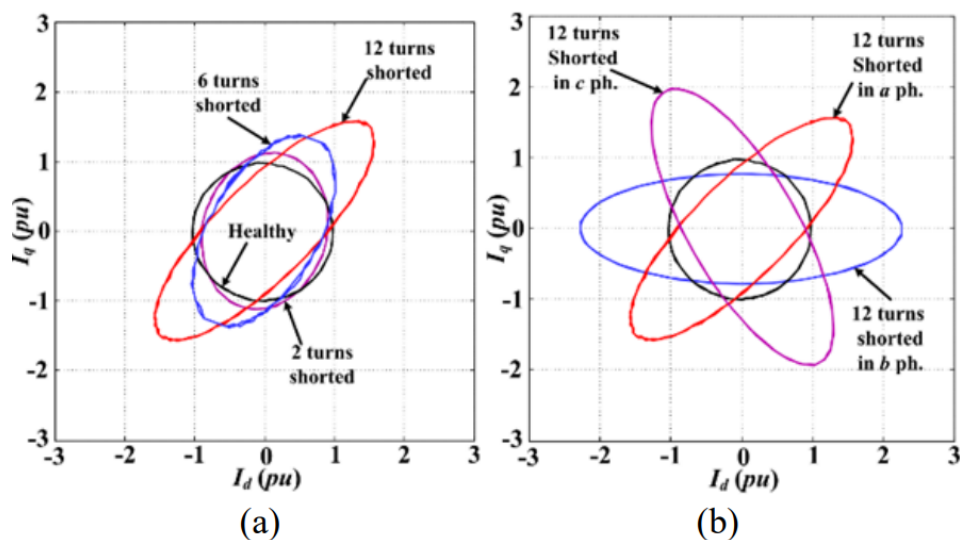
$$I_q = \frac{\sqrt{6}}{2}I_M \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (3.18)$$

Όπου I_M η μέγιστη τιμή του ρεύματος φάσης
και ω η γωνιακή συχνότητα.

Στο σύστημα συντεταγμένων d-p, το διάνυσμα Park για τη μηχανή περιγράφει ένα σχήμα κεντραρισμένο στην αρχή των αξόνων σύμφωνα με την εξίσωση :

$$I = I_d + jI_q \quad (3.19)$$

Συνεπώς, μια υγιείς μηχανή που τροφοδοτείται από ένα απολύτως συμμετρικό σύστημα τάσης, το διάγραμμα του διανύσματος Park παρουσιάζει έναν κανονικό κύκλο κεντραρισμένο στην αρχή των αξόνων του συστήματος d-p. Όταν όμως παρουσιαστεί κάποια βλάβη σε κάποιο τύλιγμα του στάτη, τύλιγμα του δρομέα, κάποιο ρουλεμάν ή υπάρχει ασυμμετρία παροχής τάσης, τα τριφασικά ρεύματα του στάτη οδηγούν σε μια τροποποιημένη μορφή του διανύσματος Park.



Εικόνα 3.12:

- (a) Υγιής και 2,6,12 σπείρες βραχυκυκλωμένες στην μια φάση
 (b) Υγιής και 12 σπείρες βραχυκυκλωμένες σε όλες τις φάσεις
 [58]

3.4.5 Μέθοδος Μηδενικής Ακολουθίας

[59] Η Μέθοδος Μηδενικής Ακολουθίας χρησιμοποιεί τις προαναφερθείσες τεχνικές όπως MCSA και SFSA, για να παρέχει μια πιο ολοκληρωμένη υπογραφή για ανάλυση. Το σήμα που υπολογίζει αποτελεί το άθροισμα των τριών φασικών συνιστωσών του ρεύματος και της μαγνητικής ροής αντίστοιχα, με κάθε μια να διαχωρίζεται κατά 120 ηλεκτρικές μοίρες.

- Ρεύμα Μηδενικής Ακολουθίας

Το Ρεύμα Μηδενικής Ακολουθίας (Zero-Sequence Current ή ZSC) υπολογίζεται ως εξής :

$$i_{ZSC} = i_a + i_b + i_c \quad (3.20)$$

Στην περίπτωση που η μηχανή είναι συνδεδεμένη σε αστέρα , μπορούμε να μετρήσουμε απευθείας μέσω του ρεύματος του ουδετέρου , ενώ σε περίπτωση σύνδεσης σε τρίγωνο, είναι απαραίτητο να μετρηθούν ξεχωριστά και τα τρία φασικά ρεύματα και στη συνέχεια να αθροιστούν. Είναι πλέον αποδεδειγμένο στην βιβλιογραφία ότι η ανάλυση ρεύματος μηδενικής ακολουθίας ανιχνεύει ευκολότερα υπογραφές βλαβών σπασμένης μπάρας (σχέση:3.5). Η βασική αρμονική σε αυτή την περίπτωση εμφανίζεται στα $3f_s$ (δηλαδή στη δική μας περίπτωση στα 150Hz). Η σπασμένη μπάρα δημιουργεί δύο πλευρικές αρμονικές στην μηδενική ακολουθία:

στα $3f_s - 2sf_s$

και $3f_s - 4sf_s$

αντί για μία στην MCSA ($f_s - 2sf_s$).

Επιπρόσθετα αφού πρόκειται για την τριπλάσια συχνότητα από τη θεμελιώδη, το πλάτος του σήματος είναι μεγαλύτερο, άρα σύμφωνα με τον νόμο της επαγωγής του Faraday, βελτιώνεται η ποιότητα του σήματος.

Τέλος για μεγαλύτερη συχνότητα το επιδερμικό φαινόμενο στον δρομέα είναι πιο έντονο , ενισχύοντας την μαγνητική ασυμμετρία κοντά στο διάκενο, άρα ενισχύοντας και τις υπογραφές των βλαβών.

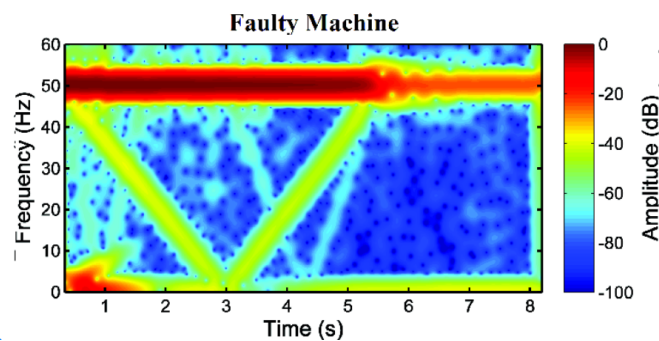
- Μαγνητική Ροή Μηδενικής Ακολουθίας

Η Μαγνητική Ροή Μηδενικής Ακολουθίας (Zero-Sequence Flux ή ZSF) υπολογίζεται από τα σήματα λαμβάνονται από τρία ακτινικά πηνία που μετράνε ροής διαρροής, τα οποία τοποθετούνται συμμετρικά γύρω από τον κινητήρα για να δημιουργήσουν μια ηλεκτρική διαφορά φάσης 120 μοιρών. Η ZSF παρέχει παρόμοιο φασματικό αποτέλεσμα με το ZSC με μερικές επιπλέον υπογραφές βλαβών που θα αναλύσουμε στο Κεφάλαιο 5.

3.4.6 Υπογραφές Ρεύματος Σε Μεταβατικό Στάδιο

Όλες οι προηγούμενες μέθοδοι αποτελούν λύσεις κατά την σταθερή λειτουργία μιας μηχανής. Όμως σε περίπτωση που γίνουν μετρήσεις κατά την διάρκεια κάποιου μεταβατικού σταδίου λειτουργίας της μηχανής, όπως για παράδειγμα κατά την εκκίνηση, κάποιες αρμονικές που μπορεί να κρύβονται ανάμεσα στις φυσιολογικές υπογραφές της μηχανής, εξελίσσονται με βάση την μεταβολή της ταχύτητας. Έτσι σφάλματα που κατά την σταθερή λειτουργία μπορεί να μην είναι προφανή, μπορούν να γίνουν ευδιάκριτα κατά την αλλαγή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα.

Αυτά τα σφάλματα δημιουργούν χαρακτηριστικά μοτίβα στο επεξεργασμένο σήμα που καταγράφεται κατά την εκκίνηση, που συνδέονται άμεσα με συγκεκριμένες βλάβες. Για παράδειγμα στην περίπτωση σπασμένης μπάρας στον δρομέα, δημιουργείται ένα χαρακτηριστικό 'V' σχήμα κατά την χρονική-συχνοτική ανάλυση του ρεύματος εκκίνησης (STFT). Ένα τέτοιο σχήμα δεν θα υπήρχε για άλλους τύπους βλαβών, επιτρέποντας την ακριβή ανίχνευση και διάγνωση.



Εικόνα 3.13: Σχήμα V κατά την ανάλυση του ρεύματος εκκίνησης μηχανής [60]

3.4.7 Άλλες διαγνωστικές μέθοδοι :

[61] Άλλες διαγνωστικές μέθοδοι αποτελούν το εκτεταμένο διάνυσμα Park (Extended Park Vector Approach), η ανάλυση δονήσεων (Vibration Analysis), η μέτρηση είτε ενεργού είτε άεργου ισχύος (power monitoring), η παρακολούθηση της ταχύτητας περιστροφής (speed monitoring), η παρακολούθηση της θερμοκρασίας (temperature monitoring) και η πιο διαισθητική, η παρακολούθηση θορύβων της μηχανής (Acoustic noise).

Ανάλογα με την εφαρμογή, το περιβάλλον, το είδος της μηχανής και το κόστος, επιλέγονται οι κατάλληλη αισθητήρες και η κατάλληλη μέθοδος για την ομαλή λειτουργία μιας μηχανής.

Κεφάλαιο 4

Μοντελοποίηση Με Πεπερασμένα Στοιχεία

4.1 Ανάλυση Σχεδίου Της Μηχανής

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήσαμε ασύγχρονο κινητήρα 400V φασικής τάσης, τεσσάρων kilowatt (4kw) με βάση τα σχέδια που μας δόθηκαν από πραγματική μηχανή. Παρακάτω υπάρχει η ταμπέλα σχετικά με την ονομαστική λειτουργία της μηχανής που μας δόθηκε :

Πίνακας 4.1: Ονομαστικά Στοιχεία Της Μηχανής

Parameter	Rotor Cage IM
Voltage	690 V
Power	4 kW
Current	4.9 A
Pole Pairs	2
Stator Slots	48
Rotor Slots	28
Stator Connection	Star

Ο δρομέας της συγκεκριμένης μηχανής έχει 28 αυλακώσεις με μπάρες , ενώ ο στάτης έχει 48 αυλακώσεις με τυλίγματα 40 σπειρών στην κάθε μια. Το ενεργό μήκος της μηχανής είναι 150mm και την τροφοδοτούμε με τριφασική τάση 690V σε αστέρα (φασική τάση 400V) με συχνότητα 50 Hz.

Μελετήσαμε την συγκεκριμένη μηχανή σε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις :

- Υγιής Μηχανή (Healthy)
- Μια σπασμένη μπάρα (1bb)
- Δύο σειριακές σπασμένες μπάρες (2bb)
- Δύο σπασμένες μπάρες με απόσταση μισού πόλου (2bbhpp)

και με τρία διαφορετικά φορτία σε κάθε περίπτωση :

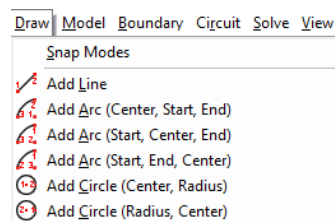
- Full Load (26 Nm)
- Half Load (13 Nm)
- Μόνο τριβές (1 Nm)

4.2 Σχεδιασμός μηχανής στο πρόγραμμα προσομοιώσεων **Simcenter Magnet**

Το εργαλείο **Simcenter Magnet** θα μας βοηθήσει, αφού σχεδιάσουμε σωστά τις γεωμετρίες και την τροφοδοσία της μηχανής, να αναλύσουμε μέσω πολύπλοκων μαθηματικών τύπων προσεγγιστικά τα αποτελέσματα κατά την προσομοίωση λειτουργίας της. Έτσι είναι πολύ σημαντικό να εστιάσουμε λεπτομερώς σε κάθε σημείο της μηχανής και να δημιουργήσουμε σωστά το 3d ψηφιακό μοντέλο.

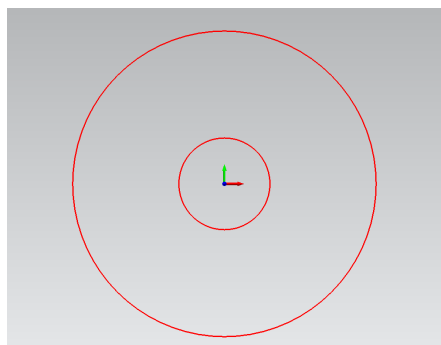
4.2.1 Σχεδιασμός βασικών κύκλων μηχανής

Ο πιο εύκολος τρόπος για να ξεκινήσουμε τον σχεδιασμό είναι να ζωγραφίσουμε τον εσωτερικό κύκλο (άξονας περιστροφής) και τον εξωτερικό κύκλο που έρχεται σε επαφή με το διάκενο. Χρησιμοποιούμε το dropdown menu “draw” και έπειτα επιλέγουμε “Add Circle (Center,Radius)”



Εικόνα 4.1: Draw Dropdown Menu

Δίνουμε στην γραμμή εντολών τις συντεταγμένες (0,0) και (0,16.5) εφόσον η διάμετρος του άξονα περιστροφής σύμφωνα με το σχέδιο είναι 33 χιλιοστά. Η εξωτερική διάμετρος του δρομέα σύμφωνα με το σχέδιο είναι 110 χιλιοστά, άρα η ακτίνα είναι 55. Επομένως πατώντας ξανά “Add Circle” με συντεταγμένες (0,0) και (0,55) έχουμε πλέον περικλείσει την επιφάνεια του δρομέα από τους 2 αυτούς κύκλους.



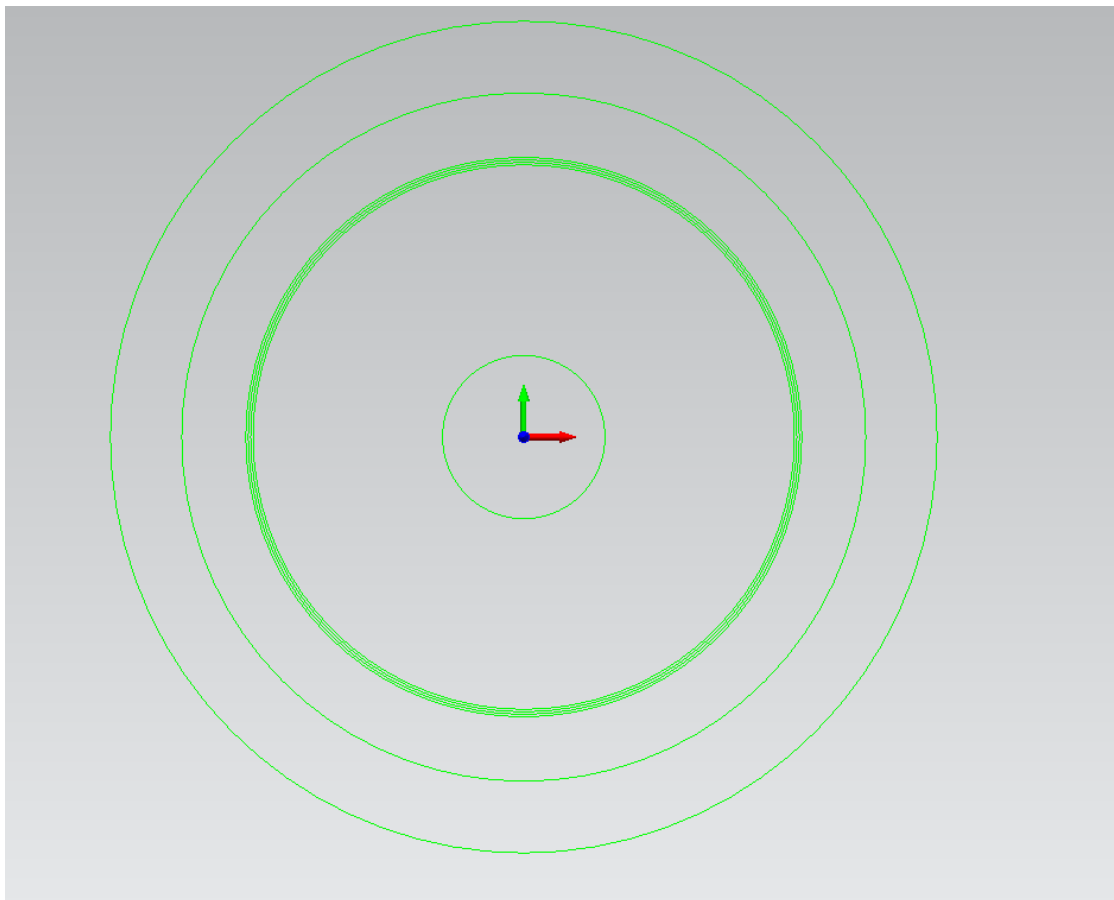
Εικόνα 4.2: Πρώιμος Σχεδιασμός Δρομέα

- Σχεδιασμός Διακένου

Όρα να σχεδιάσουμε το διάκενο, το οποίο για να αναλυθεί επαρκώς μαθηματικά πρέπει να το χωρίσουμε σε τουλάχιστον 3 μέρη, ένα που θα τοποθετηθεί στην ομάδα κίνησης του δρομέα, ένα που θα θεωρηθεί ακίνητο όπως ο στάτης και ένα ενδιάμεσα από αυτά τα δύο. Το διάκενο είναι 1,5mm οπότε κάθε ένα από αυτά τα 3 layers θα είναι 0,5mm. Συνεπώς σχεδιάζουμε άλλους 3 κύκλους με ακτίνες 55.5mm, 56mm και 56.5mm αντίστοιχα.

- Βασικοί Κύκλοι Στάτη

Ο τελευταίος θα είναι και ο εσωτερικός κύκλος του στάτη. Τέλος μένει να σχεδιάσουμε τον εξωτερικό κύκλο του στάτη με διάμετρο 168mm (άρα συντεταγμένες (0,0) και (0,84)) και έναν ενδιάμεσο κύκλο με διάμετρο 139mm (άρα συντεταγμένες (0,0) και (0,69.5)) στο σημείο που σταματάνε οι αυλακώσεις του. Το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω, με όλους τους απαραίτητους βασικούς κύκλους πάνω στους οποίους θα ξεκινήσουμε να αναπτύσσουμε τη γεωμετρία της μηχανής.

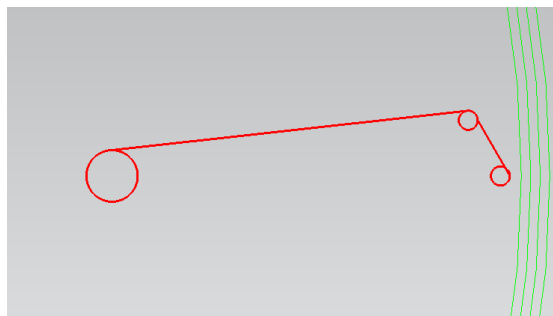


Εικόνα 4.3: Τριπλός Κύκλος Διακένου και Κύκλος Στάτη

- Σχεδιασμός Αυλακώσεων Δρομέα

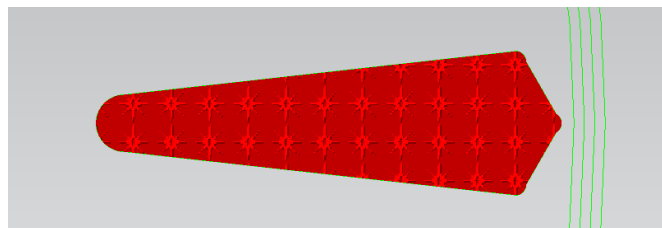
Τις αυλακώσεις του δρομέα τις σχεδιάζουμε με την βοήθεια 4 κύκλων. Ο πρώτος έχει κέντρο $0.6+0.5$ χιλιοστά από τον εξωτερικό κύκλο του δρομέα, με ακτίνα 0.5 . Συνεπώς χρησιμοποιούμε το σχεδιαστικό εργαλείο κύκλων με συντεταγμένες $(53.9,0)$ και $(54.4,0)$ για να σχεδιάσουμε τον κεντρικό βασικό κύκλο. Το άκρο του μακρινού κύκλου με βάση το σχήμα απέχει 21.8 από το κέντρο του κύκλου που σχεδιάσαμε και έχει ακτίνα 1.35 συνεπώς έχει συντεταγμένες $(33.45, 0)$ και $(32.1, 0)$.

Για τους άλλους δύο αντιδιαμετρικούς κύκλους αρκεί να σχεδιάσουμε τον 1 και να του κάνουμε καθρεπτισμό (**mirror**) ως προς τον άξονα $x'x$. Σύμφωνα με το σχέδιο η απόσταση των κέντρων αυτών των 2 κύκλων είναι 5.826 και ισαπέχουν από τον $x'x$, άρα καθένας απέχει 2.913 από αυτόν τον άξονα. Επίσης σε σχέση με τον πρώτο κύκλο απέχουν 1.692 άρα τελικά οι συντεταγμένες αυτού του κύκλου θα είναι $(52.208, 2.913)$ και επειδή έχει ακτίνα 0.5 έχουμε $(52.708, 2.913)$. Τέλος τραβάμε τις εφαπτόμενες γραμμές, υπολογίζοντας τα σημεία του κύκλου με βάση το κέντρο τους. Οι δύο γραμμές που πρέπει να φτιάξουμε δίνονται από τις συντεταγμένες: $(33.45, 1.35)$ $(52.208, 3.413)$ και $(52.708, 2.913)$ $(54.4, 0)$. Έτσι ενώνουμε τους κύκλους και το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω:



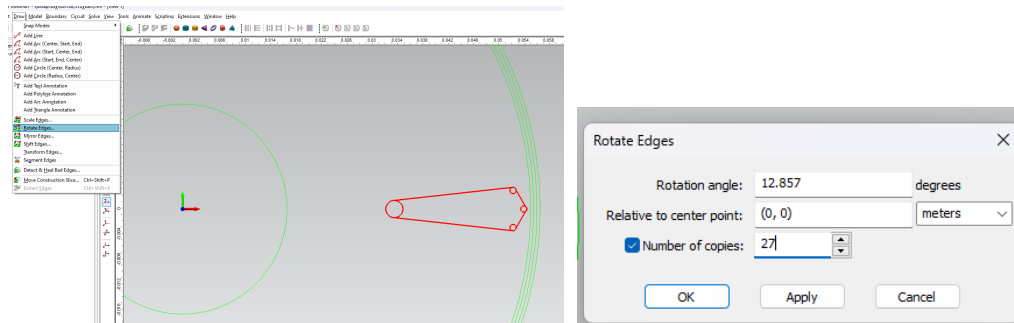
Εικόνα 4.4: Πρώτος Σχεδιασμός Αυλάκωσης Δρομέα

Επιλέγοντας το εργαλείο "**mirror**" του πάνω κύκλου και των δύο γραμμών, με τις παραμέτρους ως προς τον άξονα $x'x$, δημιουργούμε τα αντιδιαμετρικά τους σημεία και πλέον έχουμε ένα ολοκληρωμένο σχέδιο για την 1 αυλάκωση του δρομέα:



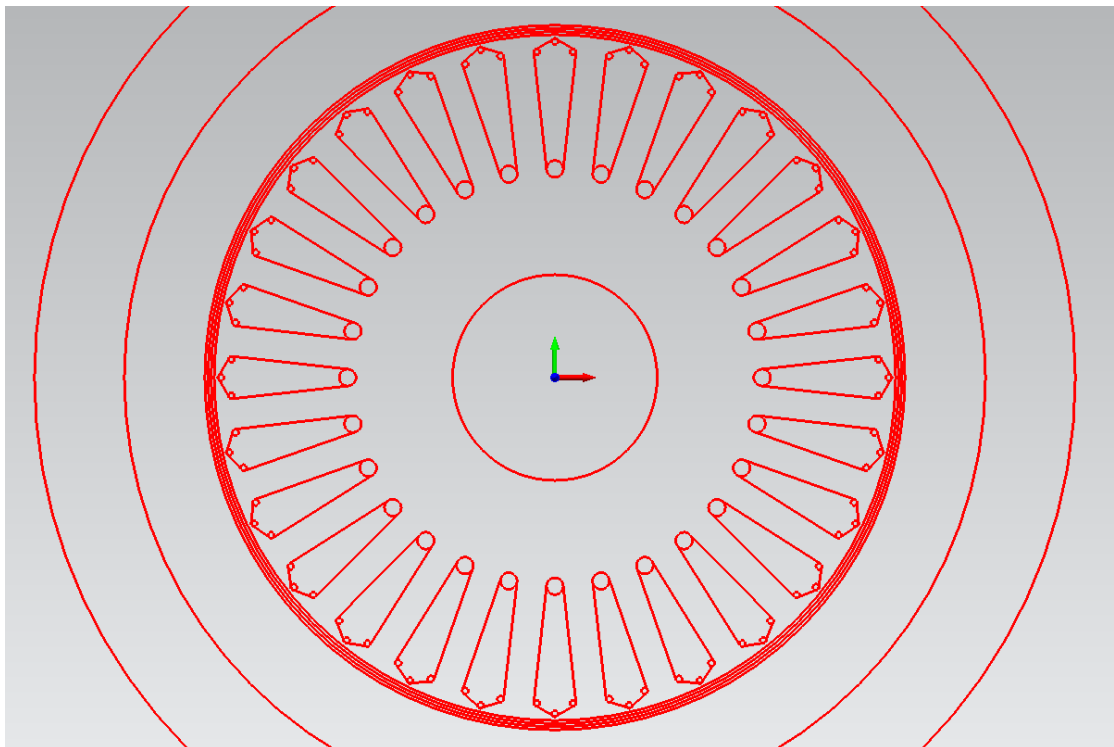
Εικόνα 4.5: Σχεδιασμός Αυλάκωσης Δρομέα

Με το εργαλείο "**Select Construction Slice Edges**" επιλέγουμε το σχέδιο της μιας αυλάκωσης και έπειτα πάμε στο dropdown menu "**draw**" όπου επιλέγουμε "**rotate edges**".



Εικόνα 4.7: Σχεδιασμός Υπόλοιπων Αυλακώσεων Δρομέα

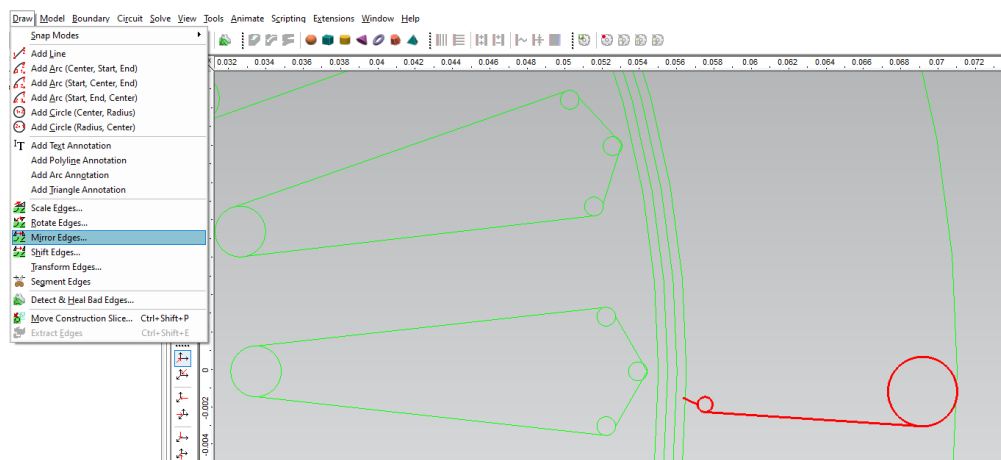
Στην συνέχεια συμπληρώνουμε τη φόρμα για να γίνει σωστά η περιστροφική αντιγραφή, με κέντρο το (0,0) και γωνία περιστροφής $\frac{360}{28} = 12.857$ μοίρες. Δημιουργούμε 27 αντίγραφα και εφόσον έχουμε συμπληρώσει σωστά το μενού, το αποτέλεσμα πλέον γεμίζει το σχήμα των υπόλοιπων 27 αυλακώσεων.



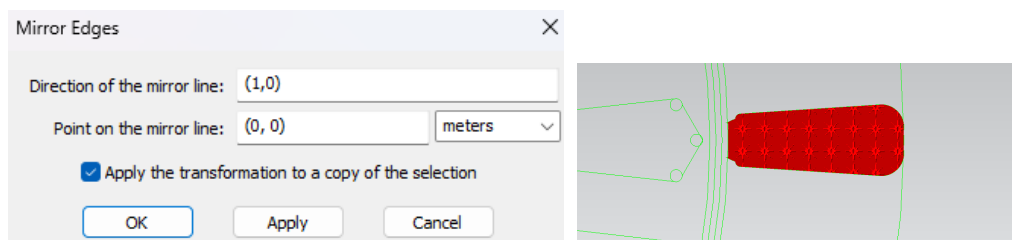
Εικόνα 4.8: Τελικό Σχέδιο Αυλακώσεων Δρομέα

- Σχεδιασμός Στάτη

Με αντίστοιχο τρόπο σχεδιάζουμε τον στάτη. Με βάση τα σχέδια που μας δόθηκαν ο πρώτος κύκλος που σχεδιάζουμε έχει συντεταγμένες (57.5,-1.76635) (57.1,-1.76635). Με γραμμή ενώνουμε το άκρο του κύκλου 57.1,-1.76635 με τον εξωτερικό κύκλο στο διάκενο με βάση το σχήμα (56.5 , -1.4) . Έπειτα σχεδιάζουμε τον μεγάλο κύκλο που αν σχεδιαστεί σωστά εφάπτεται με τον εσωτερικό κύκλο του στάτη που είχαμε δημιουργήσει προηγουμένως. Τέλος ενώνουμε με ευθεία γραμμή που εφάπτεται τον μικρό και τον μεγάλο κύκλο και έχει συντεταγμένες (57.5 , -2.16635) (69.15,-2.92685) . Έπειτα κάνουμε **mirror** ως προς τον $x'x$ και το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω :

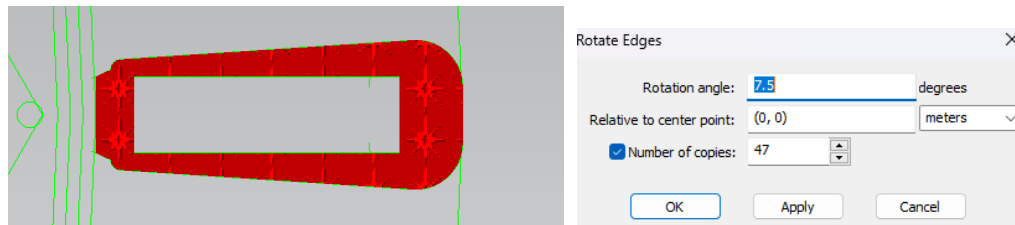


Εικόνα 4.9: Πρώιμος Σχεδιασμός Τυλίγματος Στάτη



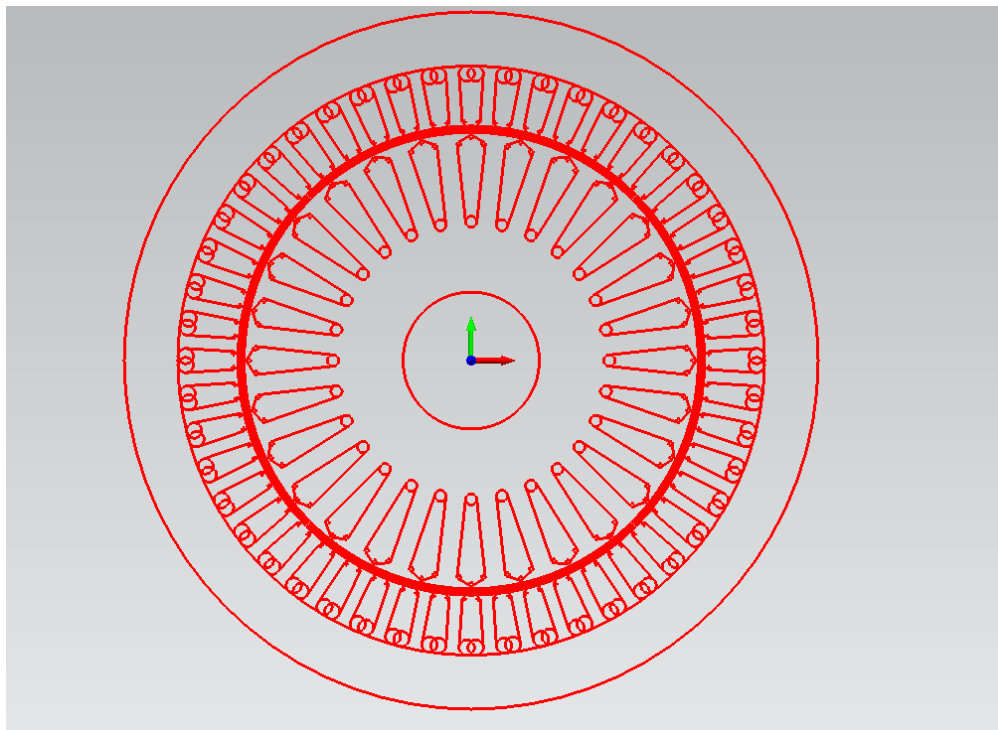
Εικόνα 4.11: Σχεδιασμός Τυλίγματος Στάτη

Για τον σχεδιασμό των τυλιγμάτων τοποθετούμε ένα παραλληλόγραμμο μέσα σε κάθε αυλάκωση του στάτη. Οι λεπτομέρειες στον σχεδιασμό του είναι αμελητέες. Χρησιμοποιούμε γραμμές με συντεταγμένες (58,-1.5) (68.5,-1.5) (68.5,1.5) (58,1.5) και το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω :



Εικόνα 4.13: Σχεδιασμός Τυλίγματος Στάτη

Ακολουθούμε την μέθοδο περιστροφικής αντιγραφής όπως ακριβώς και στην περίπτωση του δρομέα, αυτή την φορά με 47 αντίγραφα, $\frac{360}{48} = 7.5$ μοίρες διαφορά και κέντρο ξανά το (0,0). Πλέον έχουμε έτοιμο και το βασικό σχέδιο του στάτη.



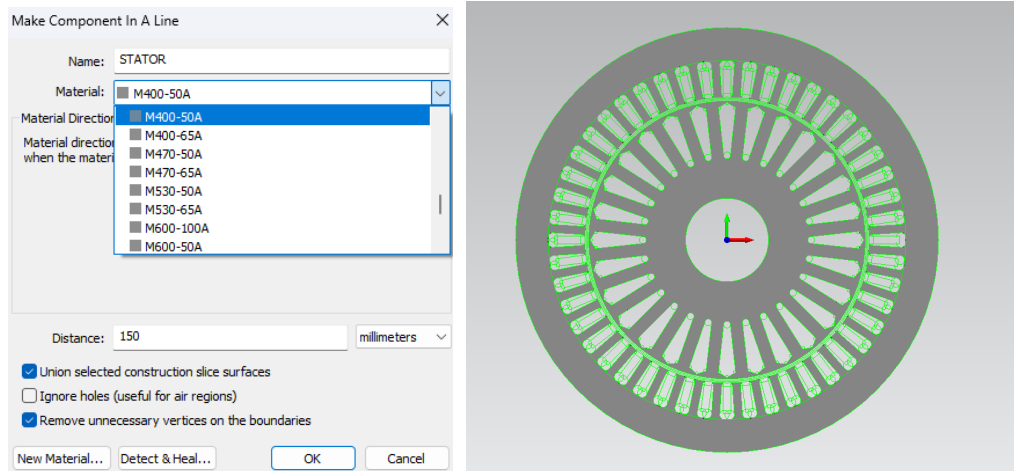
Εικόνα 4.14: Τελικός Σχεδιασμός Στάτη

- Τοποθέτηση Υλικών

Ξεκινάμε λοιπόν, αξιοποιώντας τις γραμμές και τα σχέδια που κάναμε, να περικλείσουμε μέσα σε αυτές τα κατάλληλα υλικά ώστε η μηχανή να λάβει μορφή. Αρχικά γεμίζουμε τον στάτη με το σιδηρομαγνητικό υλικό M400 με βάση την εκφώνηση. Για να γίνει αυτό επιλέγουμε το εργαλείο "Select Construction Slice Surfaces" και επιλέγουμε όλα τα σημεία ανάμεσα στα κενά του στάτη.

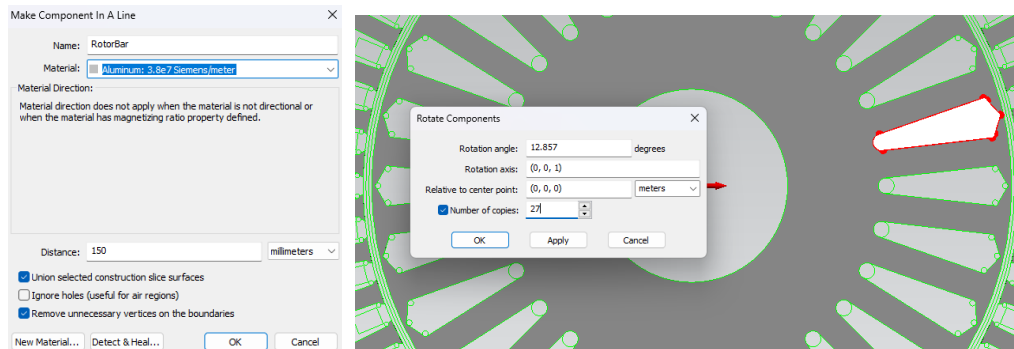
Στη συνέχεια από το dropdown menu "model" επιλέγουμε το "Make Component in a

line” το οποίο δημιουργεί το STATOR component με βάση το υλικό που επιλέγουμε. Το ίδιο σιδηρομαγνητικό υλικό χρησιμοποιείται και στον στάτη οπότε πάλι με το ίδιο εργαλείο επιλέγουμε τον δρομέα και ακολουθούμε την ίδια διαδικασία.



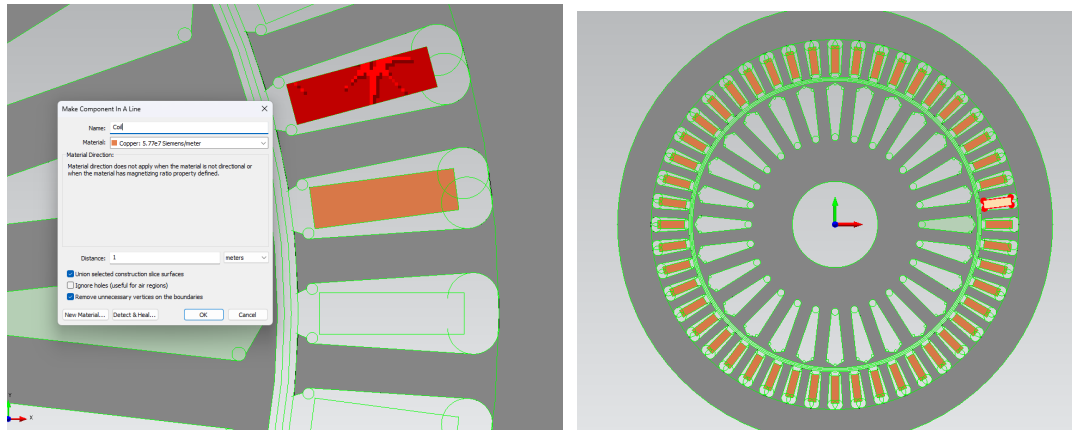
Εικόνα 4.16: Δημιουργία Stator και Rotor Component

Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία και στις αυλακώσεις του δρομέα οι οποίες σύμφωνα με το σχέδιο εμπεριέχουν αλουμίνιο, οπότε γεμίζουμε με αλουμίνιο το ένα κενό και στην συνέχεια από το dropdown menu “Model” επιλέγουμε “Rotate Components” με ίδιες παραμέτρους όπως και με τον σχεδιασμό των αυλακώσεων (27 αντίγραφα, 12,857 μοίρες γωνία).



Εικόνα 4.18: Δημιουργία Stator και Rotor Component

Τα τυλίγματα του στάτη τα δημιουργούμε με πολύ συγκεκριμένη διαδικασία. Αρχικά γεμίζουμε ένα απ' τα παραλληλόγραμμα με χαλκό και έπειτα με rotation γεμίζουμε και τα υπόλοιπα παραλληλόγραμμα.

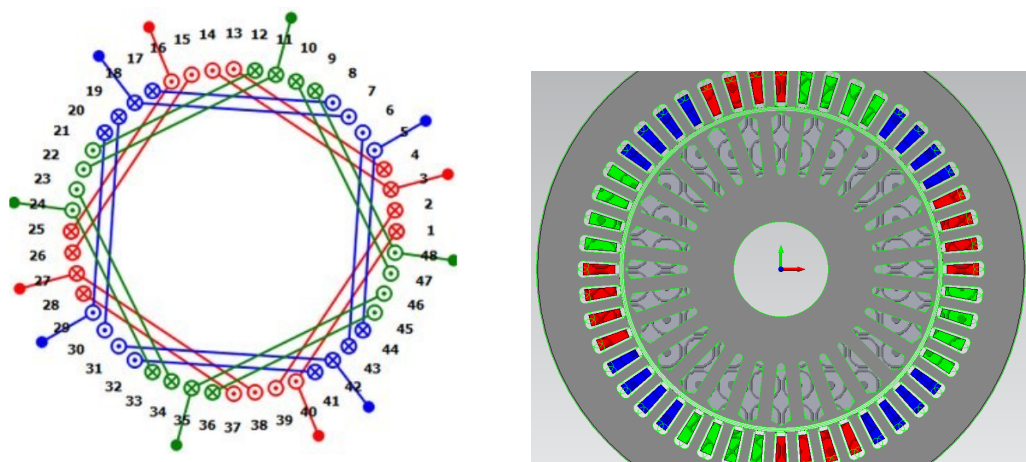


Εικόνα 4.20: Δημιουργία Coils στον Στάτη

- Συνδεσμολογία και Coils

Για να μην χρειαστεί μετέπειτα να κάνουμε τις συνδέσεις και για να αποφύγουμε μια αυξημένη πιθανότητα σφάλματος, αρκεί να επιλέξουμε με τη σειρά τα τυλίγματα του στάτη με βάση το σχέδιο που μας δόθηκε.

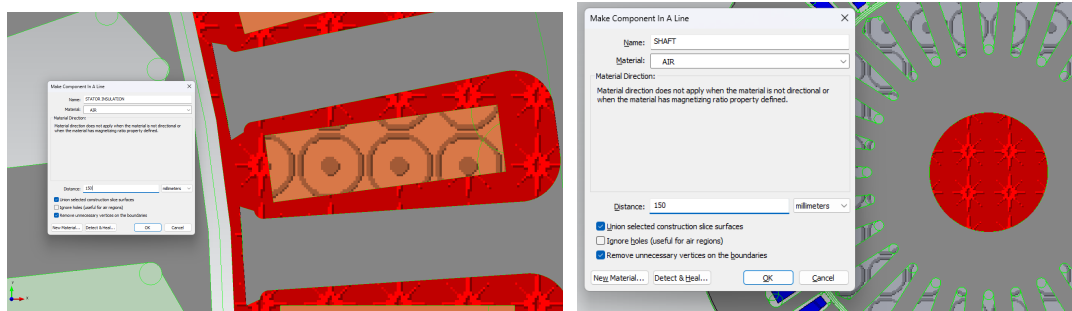
Επιλέγοντας με την σειρά τα τυλίγματα χαλκού 5,44,6,43,7,18,8,17,29,20,30,19,31,42,32,41 έχουμε ενώσει το μπλέ τύλιγμα. Στη συνέχεια πατάμε **make simple coil**, και προκειμένου να είναι πιο ευδιάκριτα χρωματίζουμε μέσα από τα **properties** τα coils αυτά μπλέ. Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία για την κόκκινη και την πράσινη φάση. Αν ακολουθήσουμε σωστά την διαδικασία ο προσανατολισμός των καλωδίων (που φαίνεται με (\cdot) ή X) είναι ακριβώς όπως στο σχέδιο και το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω :



Εικόνα 4.22: Σύνδεση Coils Στάτη

- Μονώσεις και Αέρας

Για το κλείσιμο του σχεδιασμού γεμίζουμε με αέρα τα κενά, δημιουργώντας τα αντίστοιχα components όπως shaft στο κέντρο, 3 layers διακένου και φυσικά η μόνωση του στάτη.



Εικόνα 4.24: Τοποθέτηση AIR στο διάκενο και στον άξονα περιστροφής

- Ηλεκτρικές Συνδέσεις Κυκλώματος Στάτη

Επιλέγοντας το tab “Circuit” μπορούμε να συνδέσουμε και να τροφοδοτήσουμε τα “Coil A”, “Coil B” και “Coil C” με 3 πηγές τάσης ημιτονοειδούς ρεύματος 690V σε συνδεσμολογία αστέρα.

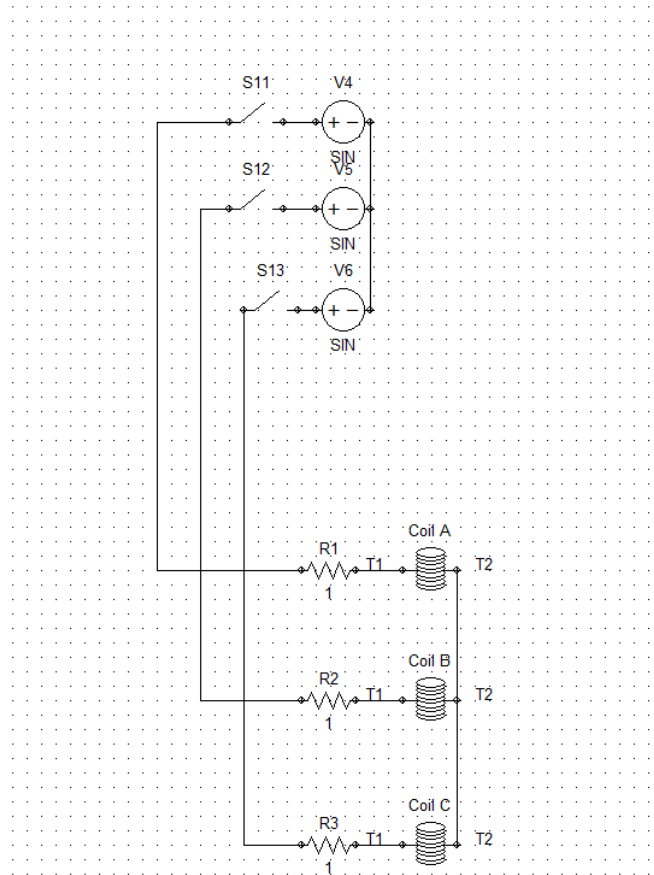
Για να υπολογίσουμε την φασική peak τιμή τάσης που πρέπει να βάλουμε στις πηγές, αρχικά υπολογίζουμε την φασική τιμή RMS και μετά πολλαπλασιάζουμε με $\sqrt{2}$.

$$V_{phase} = \frac{690 \text{ V}}{\sqrt{3}} \approx 400 \text{ V}$$

Αφού η RMS τιμή είναι 400V τότε έχουμε :

$$V_{peak} = 400 \text{ V} \cdot \sqrt{2} \approx 565 \text{ V}$$

Ενδιάμεσα βάζουμε διακόπτες για τον καλύτερο έλεγχο κατά την προσομοίωση. Όσα αναφέραμε κυκλωματικά φαίνονται στα παρακάτω σχέδια :



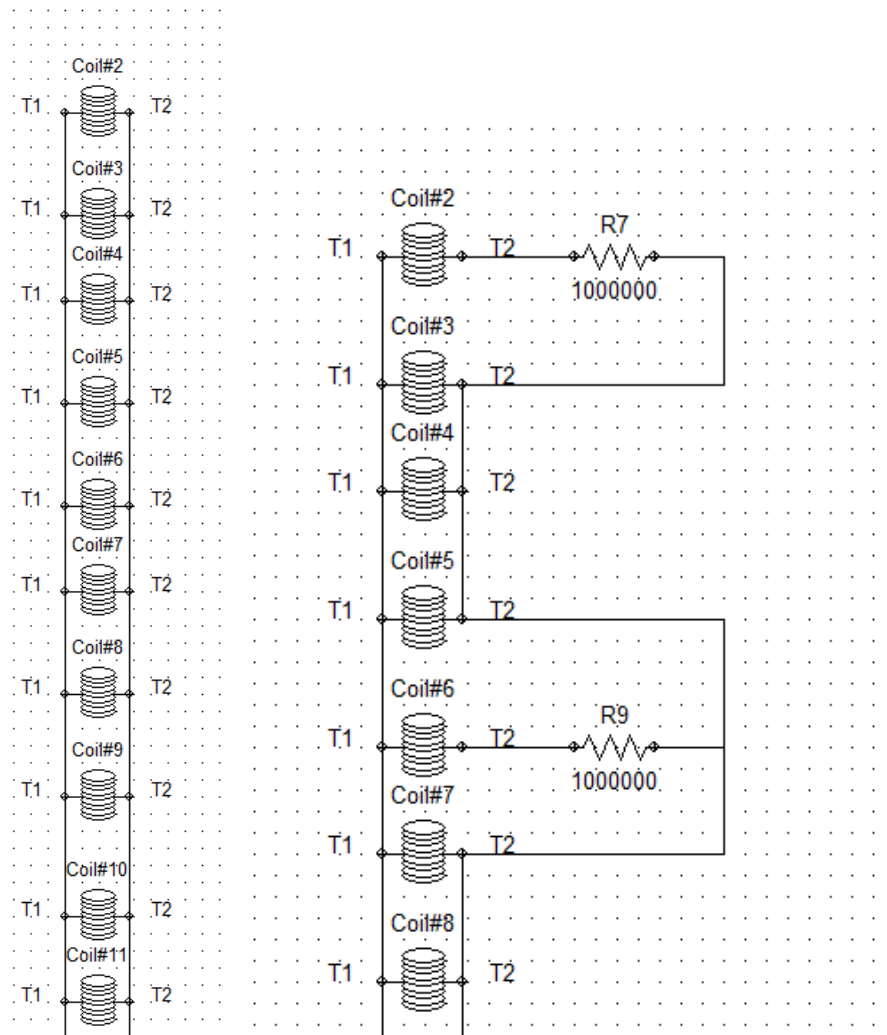
Εικόνα 4.25: Κυκλωματική απεικόνιση στάτη

		Value	Default
V_o		0	
V_a		565	
F (Transient only)	<input checked="" type="checkbox"/>	50	50 (Hz)
T_d	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0
θ	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0
ϕ	<input checked="" type="checkbox"/>	120	0

Εικόνα 4.26: Τιμές τροφοδοσίας της δεύτερης πηγής (120 μοίρες)

- Ηλεκτρικές Συνδέσεις Κυκλώματος Δρομέα

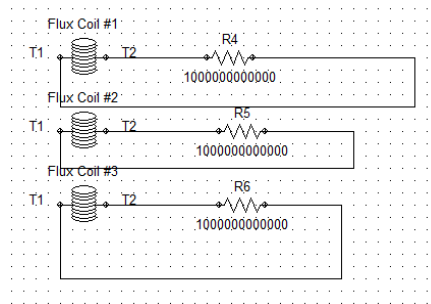
Για να ενώσουμε κυκλωματικά τον δρομέα, τοποθετούμε όλα τα coils το ένα κάτω από το άλλο και έπειτα τα βραχυκυκλώνουμε για να προσομοιώσουμε τα δαχτυλίδια ένωσης. Στην περίπτωση σπασμένων μπαρών, τοποθετούμε σε σειρά με τα σπασμένα coils μια μεγάλη αντίσταση. Παρακάτω φαίνεται ένα μέρος από τα κυκλώματά, αλλά το ίδιο μοτίβο ακολουθεί και για τα υπόλοιπα coils. Στην αριστερή εικόνα βλέπουμε την υγιή κατάσταση ενώ στη δεξιά απεικονίζεται η περίπτωση δύο σπασμένων μπαρών με διαφορά μισού μαγνητικού πόλου (2bbhpp) :



Εικόνα 4.28: Σύνδεση Coils Δρομέα

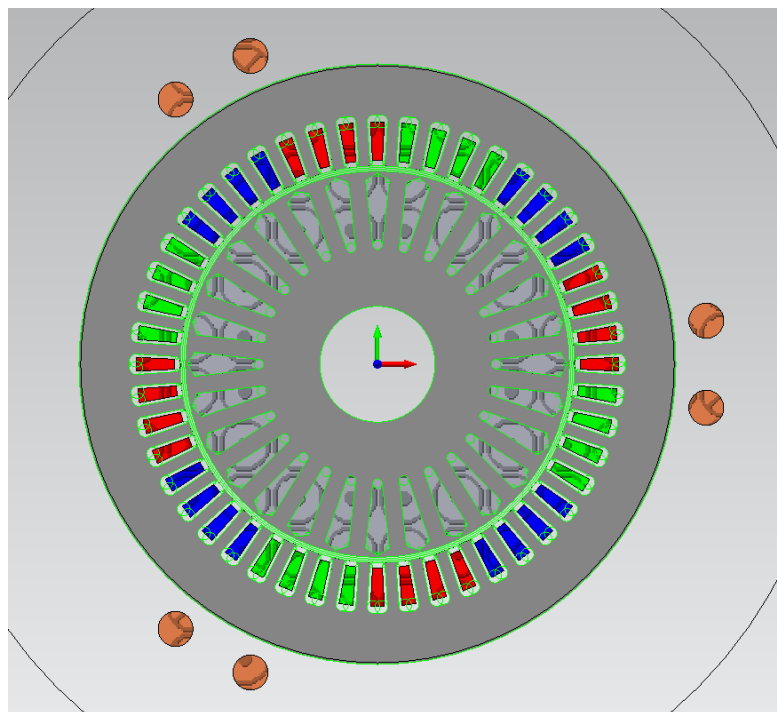
- Τοποθέτηση Αισθητήρων Μαγνητικής Ροής Διαρροής

Για να πάρουμε τους κατάλληλους πίνακες και να υπολογίσουμε την Μηδενική Ακολουθία Ροής Διαρροής, πρέπει να τοποθετήσουμε ανά 120 μοίρες τρία πηνία, συνδεδεμένο το καθένα με μια μεγάλη αντίσταση όπως φαίνεται και στο σχέδιο παρακάτω. Η υψηλή αντίσταση χρησιμοποιείται για να ελαχιστοποιήσει την ροή του ρεύματος μέσα στο πηνίο, καθιστώντας το ουσιαστικά σχεδόν ιδανικό αισθητήρα τάσης.



Εικόνα 4.29: Κυκλωματική Απεικόνιση Αισθητήρων Μαγνητικής Ροής

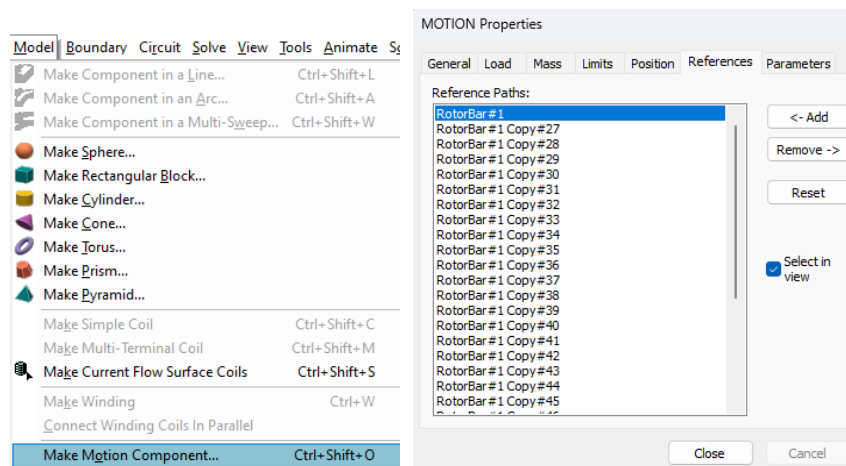
Το τελικό αποτέλεσμα της ασύγχρονης μηχανής μαζί με τους αισθητήρες φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 4.30: Τελικό Σχέδιο Ηλεκτρικής Μηχανής Με Αισθητήρες Μαγνητικής Ροής

- Στοιχεία με κίνηση

Για να ολοκληρώσουμε την σχεδίαση της μηχανής με πεπερασμένα στοιχεία, πρέπει να ορίσουμε ποιά από αυτά τα στοιχεία μπορούν να κινηθούν. Για να το πετύχουμε αυτό, αρχικά επιλέγουμε τα κινούμενα στοιχεία, δηλαδή τον άξονα (Shaft), το Rotor Component, τα 28 τυλίγματα στις αυλακώσεις καθώς και το διάκενο που βρίσκεται σε επαφή με τον δρομέα. Επιλέγουμε από το menu "Model" το "Make Motion Component". Έπειτα μπαίνουμε στα properties του component "MOTION" και βλέπουμε ότι έχουμε τοποθετήσει σωστά όλα τα κινούμενα μέρη

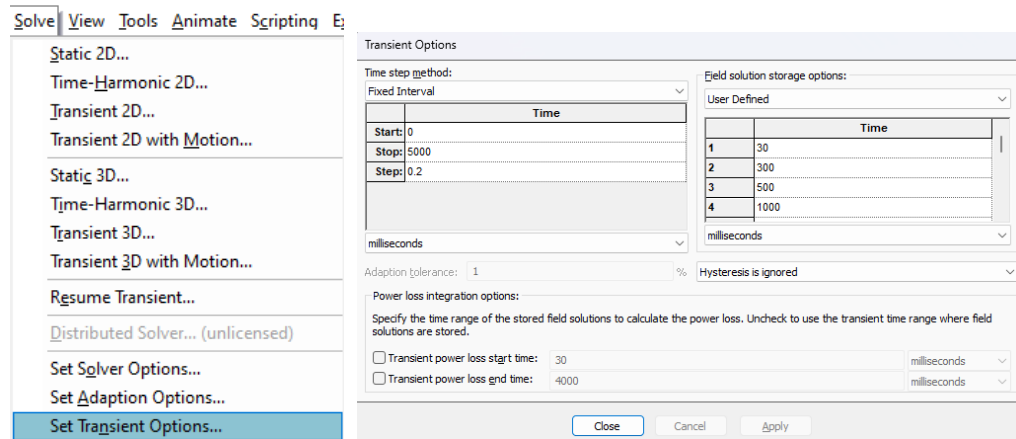


Εικόνα 4.32: Επιλογή πεπερασμένων στοιχείων κίνησης

Τέλος στο tab "Load" διαλέγουμε και το φορτίο ανάμεσα στις τιμές 26,13 και 1 Nm και είμαστε έτοιμοι να τρέξουμε την προσομοίωση.

- Ρυθμίσεις Επιλυτή και Προσομοίωση

Τελευταία ρύθμιση που πρέπει να γίνει είναι να τοποθετήσουμε τις παραμέτρους της προσομοίωσης από το menu "Solve" επιλέγοντας "Transient Options". Θέτουμε το βήμα και τον χρόνο της προσομοίωσης και είμαστε έτοιμοι να βάλουμε τις προσομοιώσεις να τρέχουν.



Εικόνα 4.34: Επιλογές Προσομοίωσης

Αφού είναι όλα έτοιμα επιλέγουμε “Solve” “Transient 2D with Motion” και η προσομοίωση ξεκινάει. Μετά από μερικές ημέρες προσομοίωσης ανάλογα με τους πόρους του συστήματος και την πολυπλοκότητα της μηχανής στο θέμα του **Meshing**, εξάγουμε πίνακες με δεδομένα, τα οποία επεξεργαζόμαστε μέσω **Matlab** και αναλύουμε στο Κεφάλαιο 5.

Κεφάλαιο 5

Επεξεργασία Σημάτων και Αποτελέσματα

5.1 Περιπτώσεις Προσομοίωσης

Όπως είδαμε και στο Κεφάλαιο 4.1, αφού σχεδιάσαμε την υγιή κατάσταση της ασύγχρονης μηχανής, μελετήσαμε δώδεκα διαφορετικά σενάρια που διέφεραν μεταξύ τους ως προς τον αριθμό και την θέση των σπασμένων μπαρών του δρομέα, αλλά και ως προς το φορτίο που συμπλέξαμε στον άξονα περιστροφής.

- Σπασμένες Μπάρες

Σχετικά με τις μπάρες του δρομέα, μελετήσαμε την υγιή περίπτωση, την περίπτωση μιας σπασμένης μπάρας, την περίπτωση δύο γειτονικών σπασμένων μπαρών αλλά και την περίπτωση που δύο σπασμένες μπάρες απέχουν μεταξύ τους μισό πολικό βήμα.

- Σύμπλεξη Φορτίου

Για κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις μελετήθηκε η περίπτωση σύμπλεξης ονομαστικού φορτίου (26 Nm), η περίπτωση σύμπλεξης μισού από το ονομαστικό φορτίο (13 Nm) αλλά και η περίπτωση χωρίς φορτίο όπου λαμβάνονται υπόψη μόνο οι τριβές (1 Nm).

5.2 Επιδόσεις Ανά Περίπτωση

Εξάγοντας τους πίνακες από το Simcenter Magnet για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις προσομοιώσεων, έχουμε πλέον όλα τα απαραίτητα σήματα προς ανάλυση στο λογισμικό MATLAB. Με κατάλληλη επιλογή στηλών στους πίνακες, όπως για παράδειγμα με την εντολή:

$$(currentA_{Healthy_s} = table2array(healthy_{current}(7501 : 25000, 2))) \quad (5.1)$$

εξάγουμε τα δεδομένα που χρειαζόμαστε για να πάρουμε πληροφορία για την μόνιμη κατάσταση, στο συγκεκριμένο παράδειγμα του ρεύματος στο τύλιγμα A και γενικότερα όλων των ρευμάτων, τάσεων, ταχύτητας κλπ. Έτσι με τους κατάλληλους υπολογισμούς προκύπτουν οι πίνακες 5.1, 5.2 και 5.3 για τις περιπτώσεις ονομαστικού φορτίου (26 Nm), μισού ονομαστικού φορτίου (13 Nm) και μηδαμινού φορτίου (1 Nm) αντίστοιχα.

Πίνακας 5.1: Επιδόσεις σε σταθερή λειτουργία με ονομαστικό φορτίο (26 Nm)

Simulated Cases	I_{ph} (A)	n (rpm)	Slip	P_{in} (W)	P_{out} (W)	Efficiency (%)
Healthy	4.83	1467.7	0.0216	4538	3998	88.1
1 broken bar	4.86	1466.3	0.0225	4560	3994	87.6
2 broken bars (adj)	4.91	1464.5	0.0237	4612	3989	86.5
2 broken bars (hpp)	4.88	1464.8	0.0235	4583	3990	87

Πίνακας 5.2: Επιδόσεις σε σταθερή λειτουργία με μισό ονομαστικό φορτίο (13 Nm)

Simulated Cases	I_{ph} (A)	n (rpm)	Slip	P_{in} (W)	P_{out} (W)	Efficiency (%)
Healthy	4.029	1484.4	0.0104	3799	2022.6	53.2
1 broken bar	4.035	1483.8	0.0108	3805	2021.7	53.1
2 broken bars (adj)	4.059	1482.9	0.0114	3828	2020.5	52.7
2 broken bars (hpp)	4.044	1483.1	0.0113	3814	2020.7	52.9

Πίνακας 5.3: Επιδόσεις σε σταθερή λειτουργία χωρίς φορτίο (1 Nm)

Simulated Cases	I_{ph} (A)	n (rpm)	Slip	P_{in} (W)	P_{out} (W)	Efficiency (%)
Healthy	3.6341	1498.75	0.0008	3439.73	158.91	4.62
1 broken bar	3.6342	1498.67	0.0009	3439.71	158.83	4.62
2 broken bars (adj)	3.6342	1498.59	0.0009	3439.59	158.65	4.61
2 broken bars (hpp)	3.6346	1498.66	0.0009	3440.05	158.79	4.62

Όπως μπορούμε να δούμε στους παραπάνω πίνακες η απόδοση επηρεάζεται ελάχιστα ακόμα και στις περιπτώσεις δύο σπασμένων μπαρών. Στην περίπτωση ονομαστικού φορτίου ωστόσο η διαφορά είναι πιο εμφανής. Συγκεκριμένα από 88.1% που αποδίδει στην υγιή κατάσταση, έχουμε μια πτώση της τάξεως του 0.7% σε περίπτωση που σπάσει μία μπάρα, ενώ 1.6% σε περίπτωση που σπάσουν δύο γειτονικές μπάρες, ρίχνοντας την απόδοση στο 86.5%. Όπως ήταν αναμενόμενο σε περίπτωση δύο σπασμένων μπαρών με απόσταση μισού πόλου η απόδοση είναι 0.5% καλύτερη από την περίπτωση δύο σπασμένων γειτονικών μπαρών και 0.6% χειρότερη από την περίπτωση μιας σπασμένης μπάρας. Αντίστοιχα νούμερα βλέπουμε και στην ολίσθηση η οποία από 2.16% ανεβαίνει στο 2.37% δηλαδή μόλις 0.21% στην χειρότερη περίπτωση (από την υγιή περίπτωση, στις δύο σπασμένες γειτονικές μπάρες). Είναι λοιπόν προφανές ότι η διαφορά της απόδοσης της μηχανής είναι αμελητέα και δεν μπορεί να εντοπιστεί εύκολα από αυτά τα στοιχεία όσο καλές μετρήσεις και να πάρουμε. Μην ξεχνάμε εξάλλου ότι η προσομοίωση τρέχει σε ιδανικές συνθήκες και οι παρεμβολές σε πραγματικά δεδομένα κάνουν αυτή την ελάχιστη διαφορά να φαίνεται ακόμα μικρότερη.

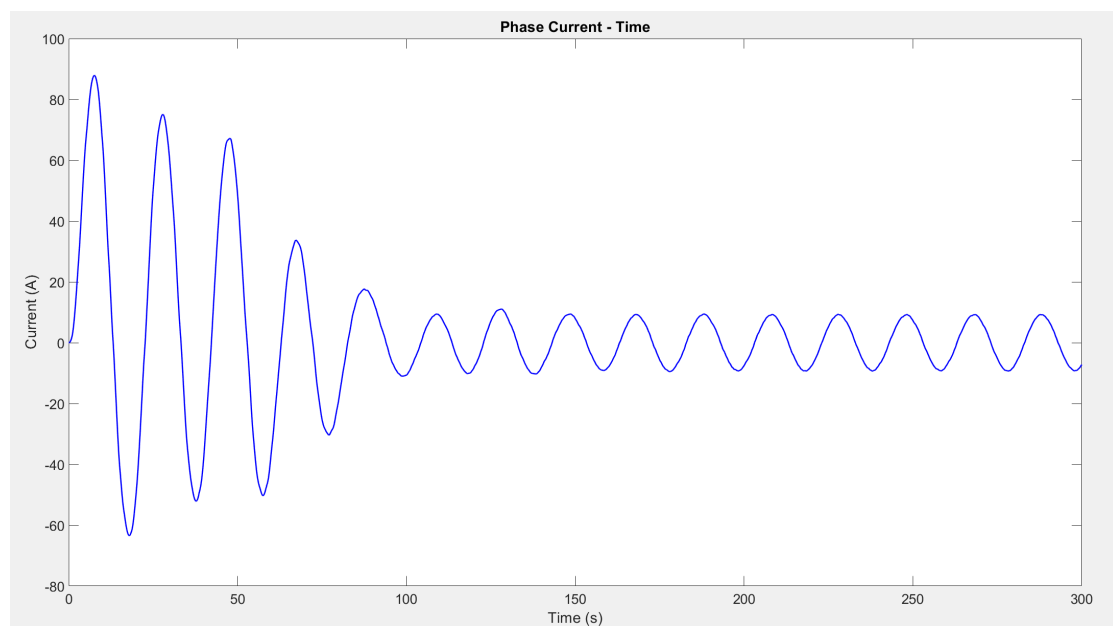
Στις περιπτώσεις δε με λιγότερο από το ονομαστικό φορτίο η διαφορά στην απόδοση λόγω σπασμένων μπαρών ελαχιστοποιείται ακόμα περισσότερο, με μέγιστη διαφορά 0.5% στην περίπτωση μισού ονομαστικού φορτίου (13 Nm) ενώ μόλις 0.01% στην περίπτωση μηδενικού φορτίου (1 Nm). Αντίστοιχα και η διαφορά της ολίσθησης δεν παρατηρείται. Η απόδοση είναι σημαντικά μικρότερη σε κάθε περίπτωση καθώς η μηχανή έχει σχεδιαστεί για να αποδίδει υπό συγκεκριμένο φορτίο, ρίχνοντας την από το 88.1% στο 53.2% και στο 4.62% στην υγιή περίπτωση του μισού ονομαστικού και του μηδενικού φορτίου αντίστοιχα. Η ολίσθηση στην περίπτωση χωρίς φορτίο πλησιάζει το 0 και η μηχανή δουλεύει σχεδόν με σύγχρονη ταχύτητα όπως φαίνεται στην στήλη n .

5.3 Ανάλυση Ρεύματος Στάτη

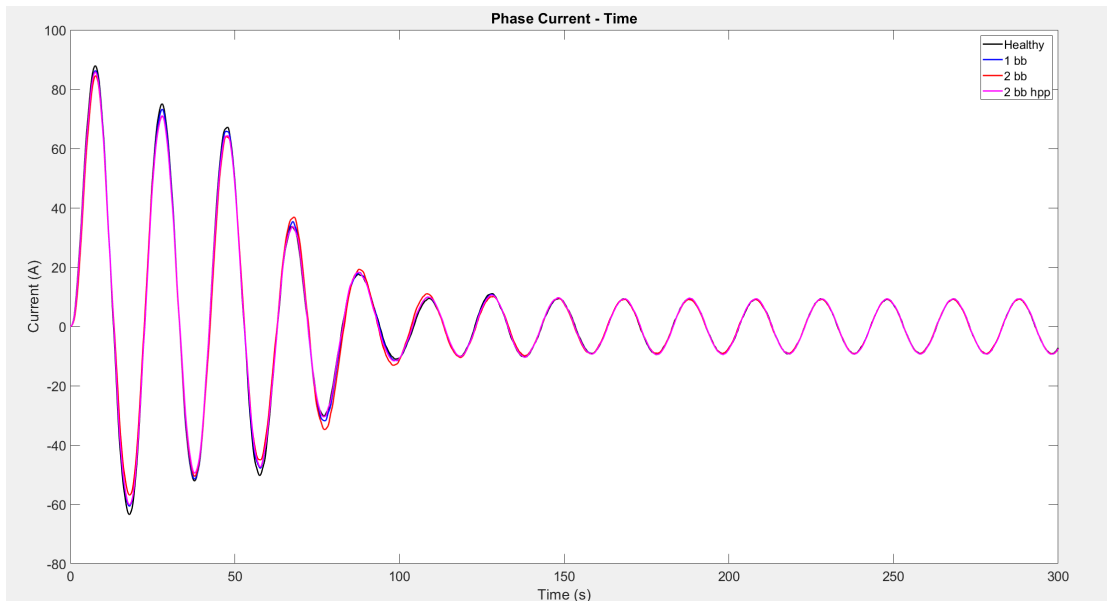
Προκειμένου να λάβουμε τις τιμές του ρεύματος στον στάτη, εισάγουμε στο MATLAB τους αντίστοιχους πίνακες και επεξεργαζόμαστε τα δεδομένα για να εξάγουμε δεδομένα για την εξέλιξη του σε συνάρτηση με τον χρόνο, για το αρμονικό περιεχόμενο όταν η μηχανή φτάσει σε μόνιμη κατάσταση μέσω MCSA και για το αρμονικό περιεχόμενο κατά την εκκίνηση μέσω STFT.

5.3.1 Χαρακτηριστική Έντασης-Χρόνου

Το πρώτο γράφημα αφορά την υγιή περίπτωση με ονομαστική φορτία σχετικά με την εξέλιξη του ρεύματος από την εκκίνηση μέχρι να φτάσει στην μόνιμη κατάσταση σε συνάρτηση με τον χρόνο.

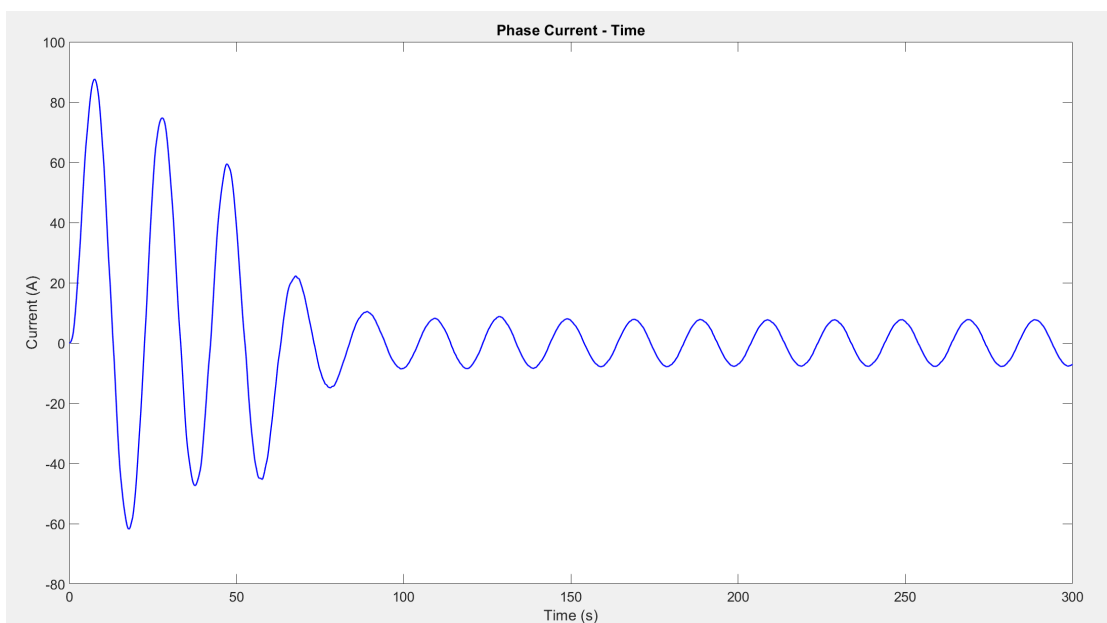


Εικόνα 5.1: Ένταση Ρεύματος στον χρόνο με φορτίο 26 Nm (Healthy)

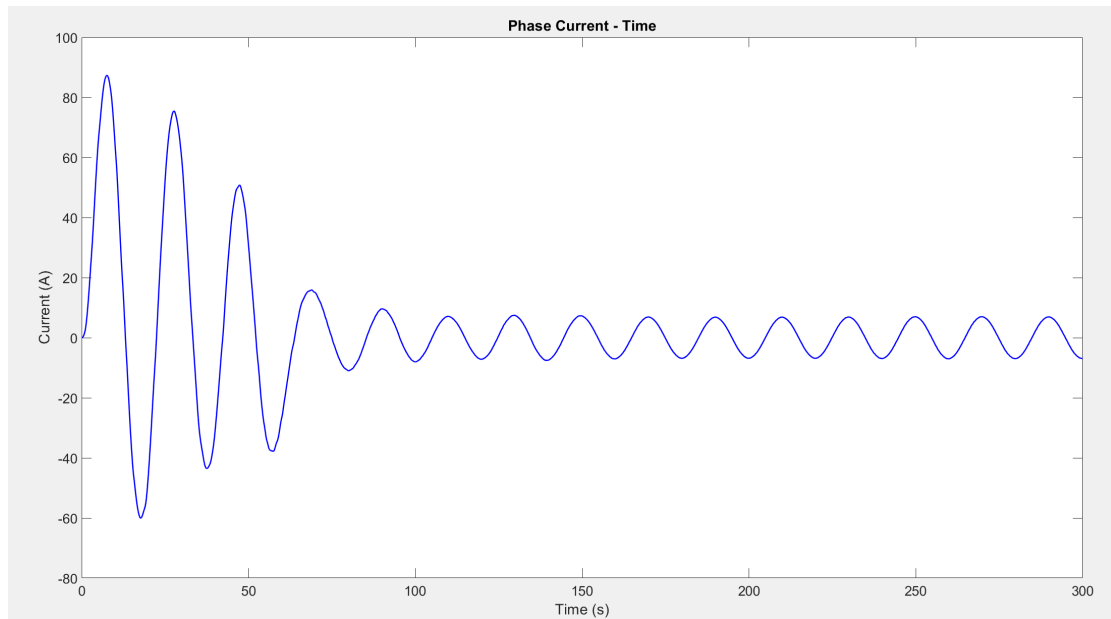


Εικόνα 5.2: Ένταση Ρεύματος στον χρόνο με φορτίο 26Nm (Healthy, 1bb, 2bb, 2bbhpp)

Στην δεύτερη εικόνα φαίνονται το ίδιο γράφημα πάνω από τα γραφήματα των περιπτώσεων μιας και δύο σπασμένων μπαρών. Όπως φαίνεται ξεκάθαρα η διαφορά ανάμεσα στις περιπτώσεις είναι ελάχιστη και διακρίνεται μόνο κατά την εκκίνηση, οπότε θα εστιάσουμε στην υγιή περίπτωση λειτουργίας. Φαίνεται ότι το ρεύμα εκκίνησης είναι σχεδόν 10 φορές μεγαλύτερο από το ρεύμα στην μόνιμη κατάσταση. Πάμε να δούμε όμως τι συμβαίνει κατά την εκκίνηση με μισό ονομαστικό φορτίο και χωρίς φορτίο :



Εικόνα 5.3: Ένταση Ρεύματος στον χρόνο με φορτίο 13Nm (Healthy)



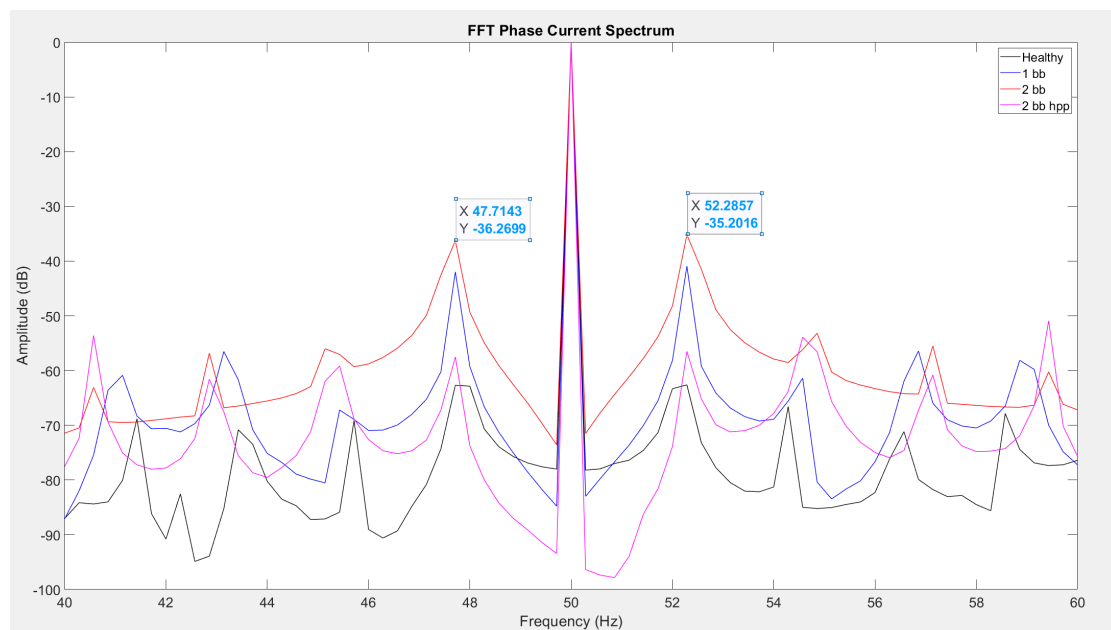
Εικόνα 5.4: Ένταση Ρεύματος στον χρόνο χωρίς φορτίο (Healthy)

Παρατηρούμε ότι το ρεύμα εκκίνησης παραμένει αμετάβλητο ανεξαρτήτως του φορτίου που έχουμε συμπλέξει στον άξονα περιστροφής. Αυτό που αλλάζει είναι η ένταση του ρεύματος περίπου στα 50ms καθώς στην περίπτωση χωρίς φορτίο το ρεύμα είναι μειωμένο, όπως και στη μόνιμη λειτουργία όπως αναλύσαμε στους πίνακες [5.1](#) [5.2](#) και [5.3](#).

5.3.2 Motor Current Signature Analysis (MCSA)

Προφανώς πέρα από το πλάτος και τον χρόνο εκκίνησης, η κυματομορφή του ρεύματος σε σχέση με τον χρόνο δεν μας αφήνει να αντλήσουμε αρκετή πληροφορία, πόσο μάλλον να διαγνώσουμε με ακρίβεια κάποια βλάβη.

Για αυτόν τον λόγο συνεχίζουμε την επεξεργασία των πινάκων που φτιάξαμε στην MATLAB για να μεταφερθούμε στο φάσμα των συχνοτήτων μέσω της ανάλυσης Fourier. Η διαγνωστική μέθοδος αυτή όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 2 ονομάζεται MCSA και μέσα από αυτή μπορούμε να αντλήσουμε πολλές χρήσιμες πληροφορίες για την μηχανή. Πάμε όμως να δούμε αν θα καταφέρουμε να διακρίνουμε τις αρμονικές των σπασμένων μπαρών εστιάζοντας λίγο παραπάνω στην περίπτωση που αυτές απέχουν μεταξύ τους μισό πολικό βήμα και αλληλοαναιρούν τις ασυμμετρίες των σημάτων.



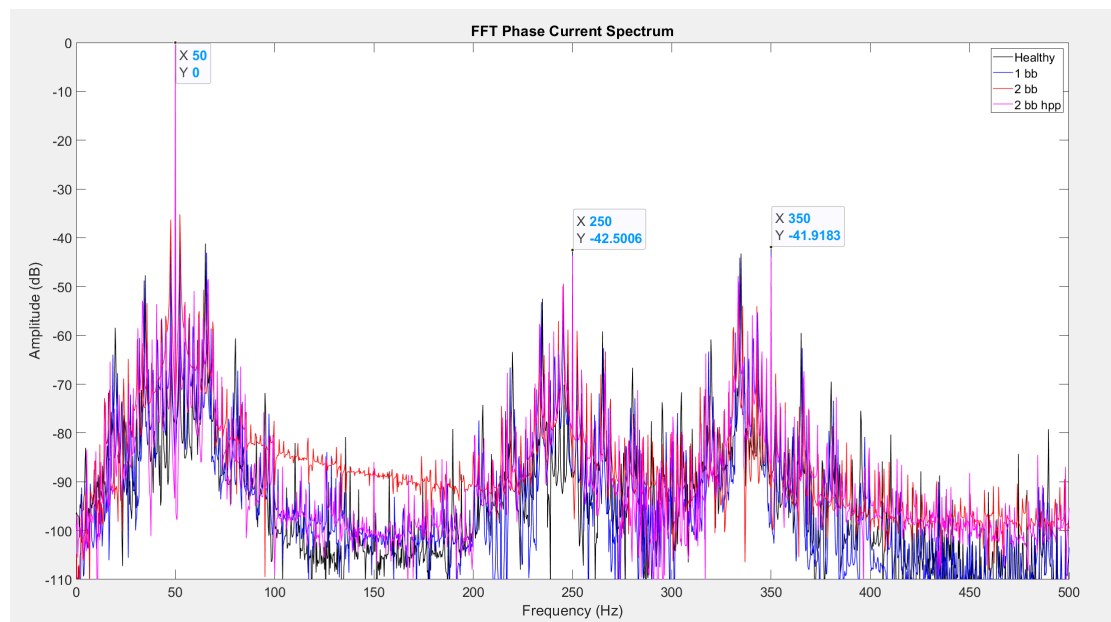
Εικόνα 5.5: Φάσμα Συχνοτήτων Ρεύματος με φορτίο 26 Nm (40Hz - 60Hz)

Πολύ έντονη είναι η ύπαρξη της $f_s + / - 2sf_s$ όπως είδαμε στην σχέση 3.4, η οποία ξεχωρίζει τόσο δεξιά όσο και αριστερά της βασικής αρμονικής των 50 Hz, κυρίως στις περιπτώσεις 1bb και 2bb. Παρακάτω βλέπουμε τα πλάτη των αρμονικών που προέκυψαν από την προσομοίωση:

Πίνακας 5.4: Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου ρεύματος

Περιπτώσεις Προσομοίωσης	$f_s - 2sf_s$	$f_s + 2sf_s$
Healthy	-62.0 dB	-62.6 dB
1 broken bar	-41.9 dB	-40.9 dB
2 broken bars (adj)	-36.2 dB	-35.2 dB
2 broken bars (hpp)	-57.5 dB	-56.5 dB

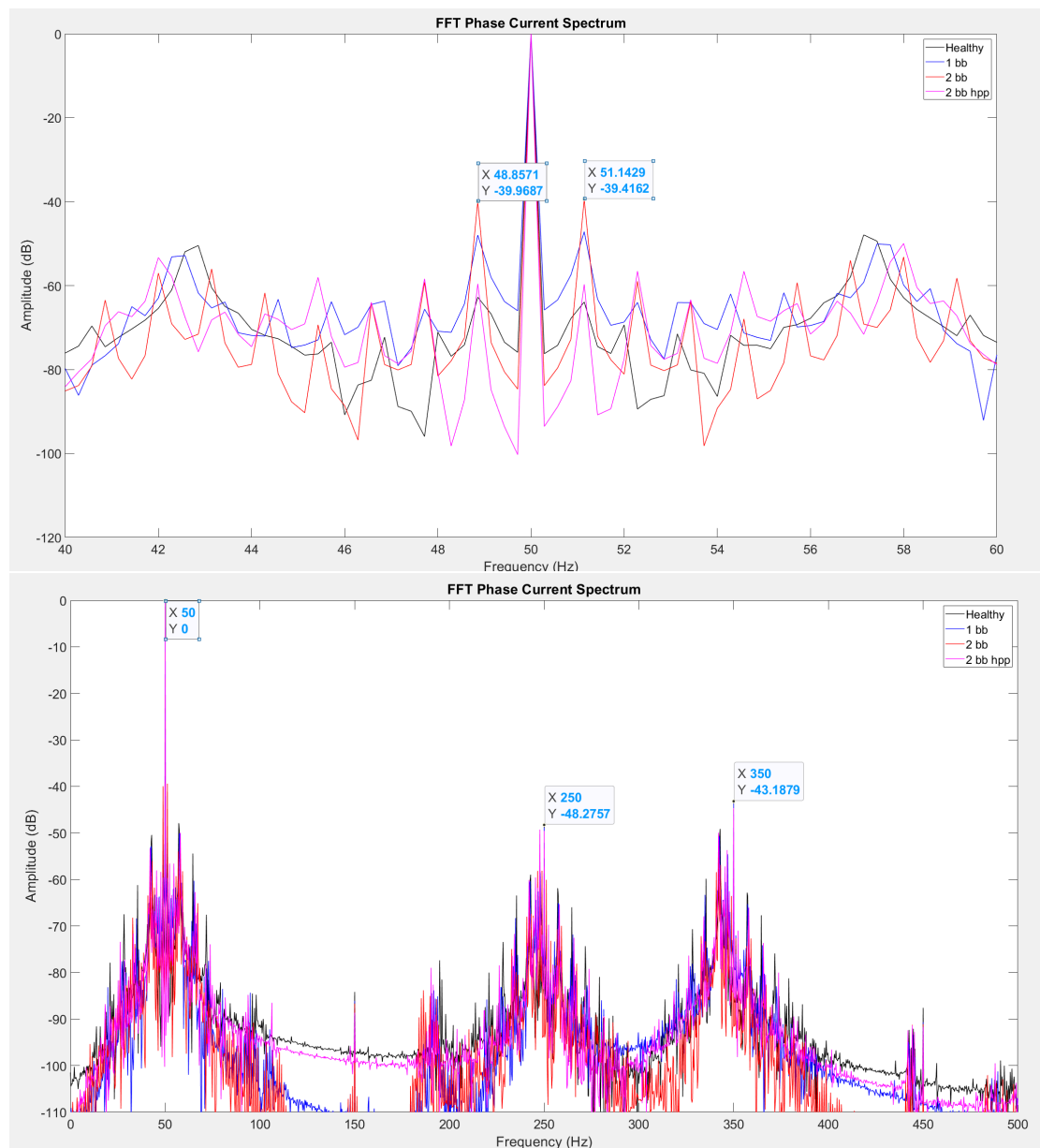
Παρατηρούμε ξεκάθαρα ότι η μία σπασμένη μπάρα και οι δύο σπασμένες γειτονικές μπάρες δημιουργούν αρμονικές άνω των -42dB άρα ευδιάκριτες. Όμως οι δύο σπασμένες μπάρες που απέχουν μεταξύ τους μισό πολικό βήμα δίνουν αρμονικές κοντά στα -57dB. Ενώ δηλαδή έχουν ίδια βλάβη με την περίπτωση των δύο γειτονικών σπασμένων μπαρών, το αρμονικό περιεχόμενο κρύβει αυτή την σημαντική πληροφορία με αποτέλεσμα η MCSA να μην είναι αρκετά αξιόπιστη διαγνωστική μέθοδος για αυτή την περίπτωση. Το ίδιο μοτίβο ακολουθεί και στο υπόλοιπο φάσμα σύμφωνα με τη σχέση 3.5 κάτι που διακρίνεται εύκολα στο αποτέλεσμα της φασματικής απεικόνισης του ρεύματος που μας δίνει η MATLAB. Αρμονικές γύρω από τα 250Hz, 350Hz, κ.ο.κ. Οι τρίτες αρμονικές όπως η 150Hz προφανώς αλληλοαναιρούνται λόγω συνδεσμολογίας αστέρα. Το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω:



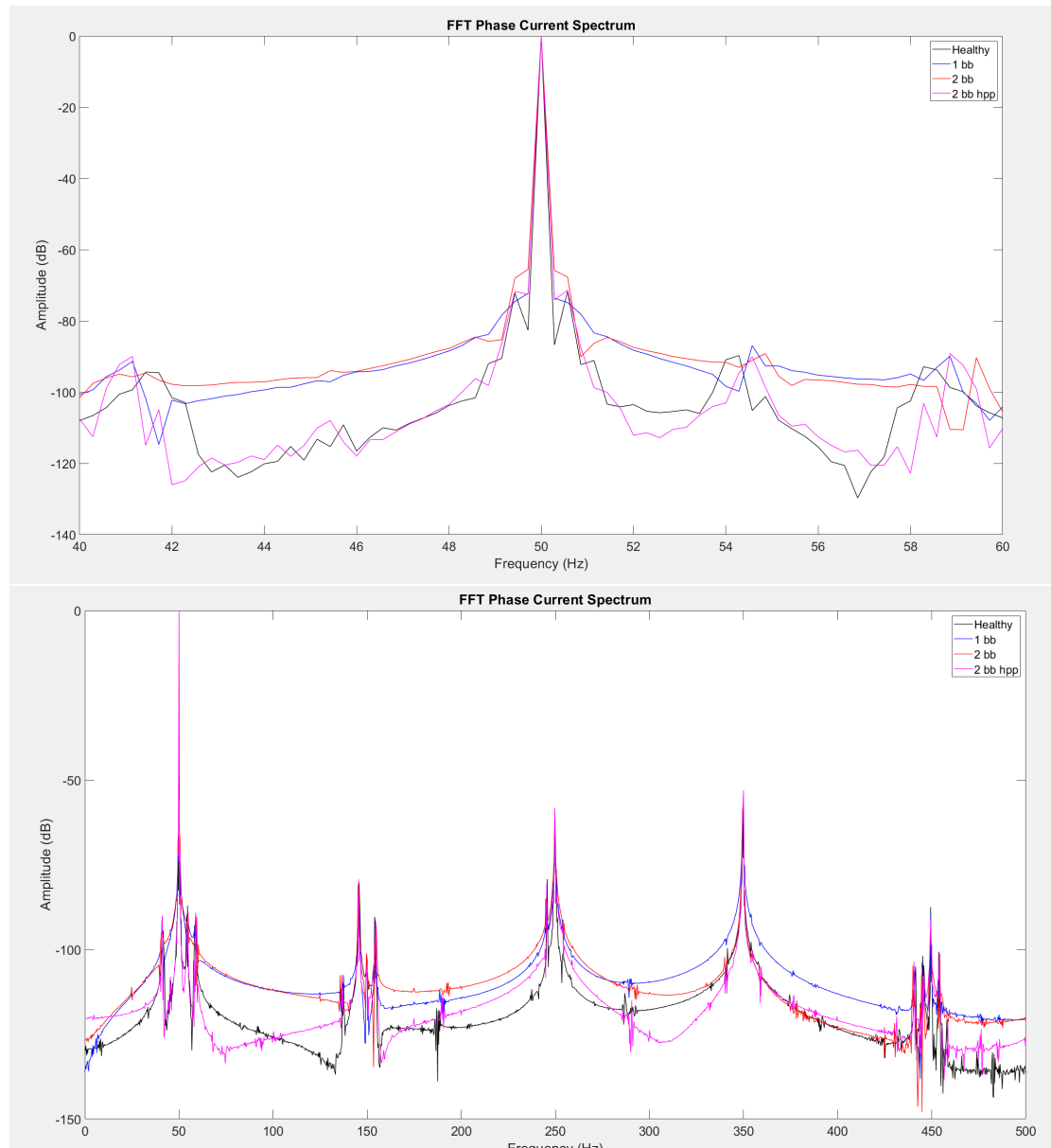
Εικόνα 5.6: Φάσμα Συχνοτήτων Ρεύματος με φορτίο 26 Nm (0Hz - 500Hz)

Όλα αυτά τα σήματα προκύπτουν υπό ονομαστικό φορτίο. Τι συμβαίνει όμως στις άλλες δύο περιπτώσεις ;

Το φορτίο όπως είδαμε και στους πίνακες 5.1, 5.2 και 5.3 επηρεάζει πολύ έντονα την ολίσθηση της μηχανής. Έτσι οι αρμονικές $f_s - 2s f_s$ και $f_s + 2s f_s$ αφού έχουν μικρότερο s πλησιάζουν την βασική αρμονική. Μάλιστα στην περίπτωση χωρίς φορτίο το s τείνει στο 0, άρα όπως θα δούμε και στα αντίστοιχα γραφήματα του φάσματος δεν διακρίνονται πλέον από την βασική αρμονική :



Εικόνα 5.8: Φάσμα Συχνοτήτων Ρεύματος με φορτίο 13 Nm

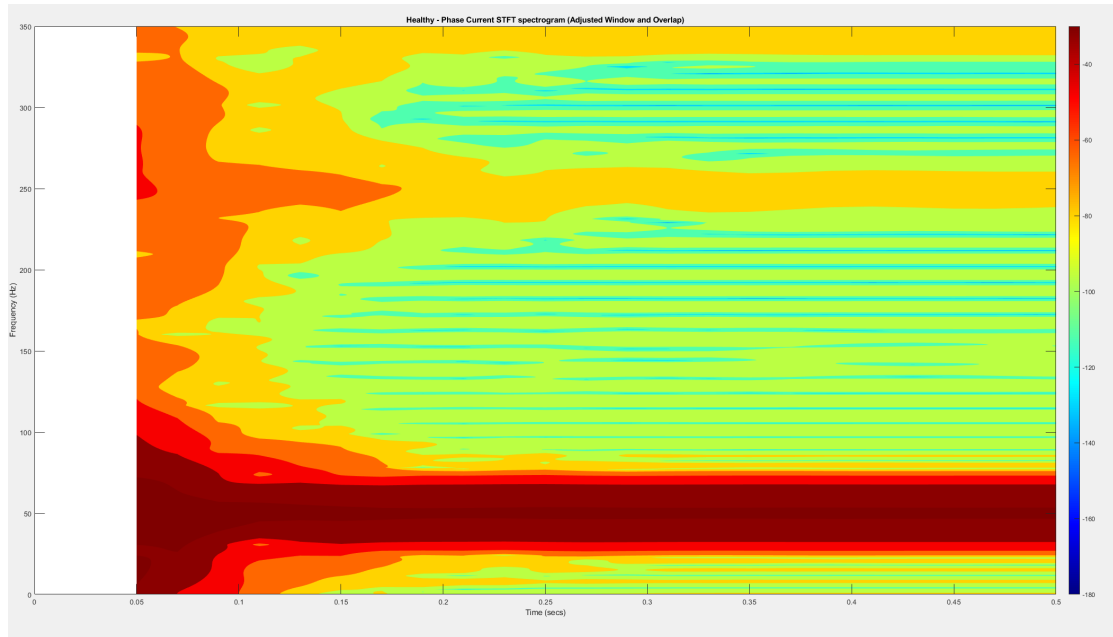


Εικόνα 5.10: Φάσμα Συχνοτήτων Ρεύματος χωρίς φορτίο (1Nm)

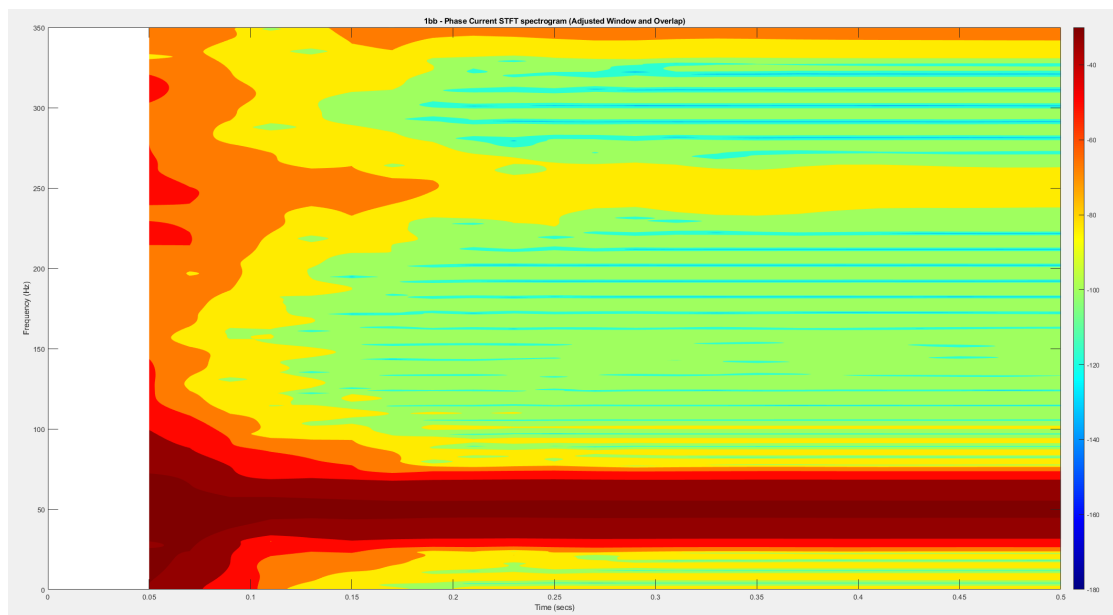
5.3.3 Short Time Fourier Transform (STFT)

Όπως είδαμε με την MCSA δεν καταφέραμε εύκολα να διακρίνουμε τις δύο σπασμένες μη γειτονικές μπάρες. Όμως όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 2 κατά την εκκίνηση το αρμονικό περιεχόμενο των σπασμένων μπαρών δεν μπορεί να κρυφτεί συνήθως σχηματίζοντας ένα V μοτίβο. Από τους ίδιους πίνακες λοιπόν του ρεύματος που έχουμε δημιουργήσει στην MATLAB, αυτή τη φορά παίρνοντας ολόκληρο το περιεχόμενο τους και όχι μόνο στη μόνιμη κατάσταση, φτιάχνουμε τον STFT επιλέγοντας μετά από μερικές δοκιμές το καλύτερο δυνατό παράθυρο και βάζοντας τα βέλτιστα ποσά στις παραμέτρους. Επειδή η μηχανή είναι αρκετά

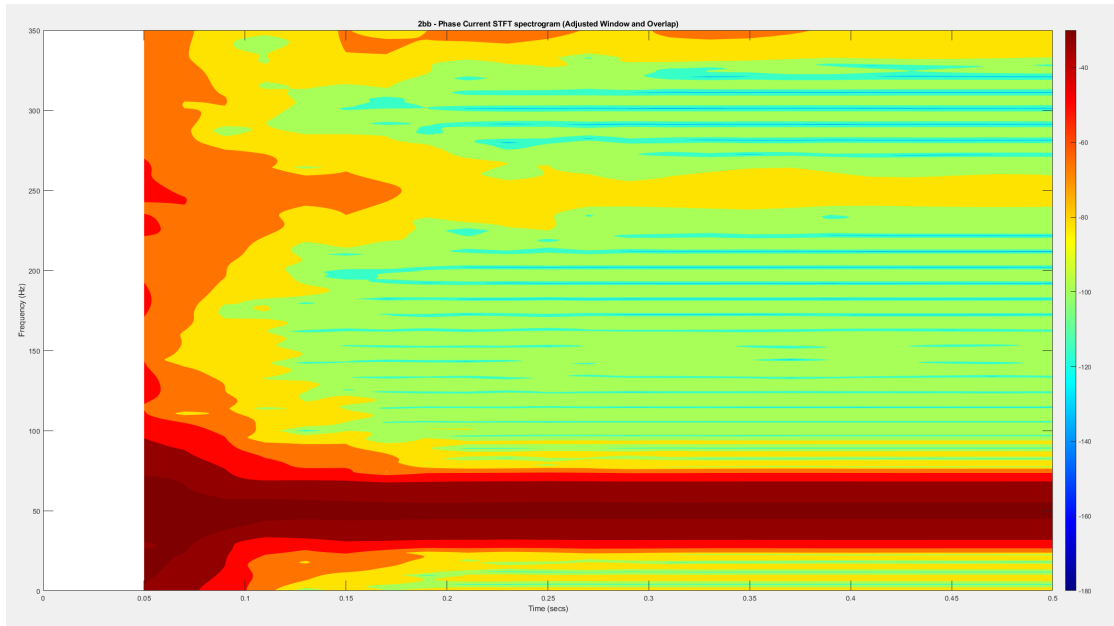
μικρή και ο χρόνος της εκκίνησης είναι λιγότερος από δευτερόλεπτο, τα αποτελέσματα που βγάζουμε δεν είναι τόσο καθαρά, ωστόσο είναι ξεκάθαρο ότι πρόκειται για βλάβη δρομέα :



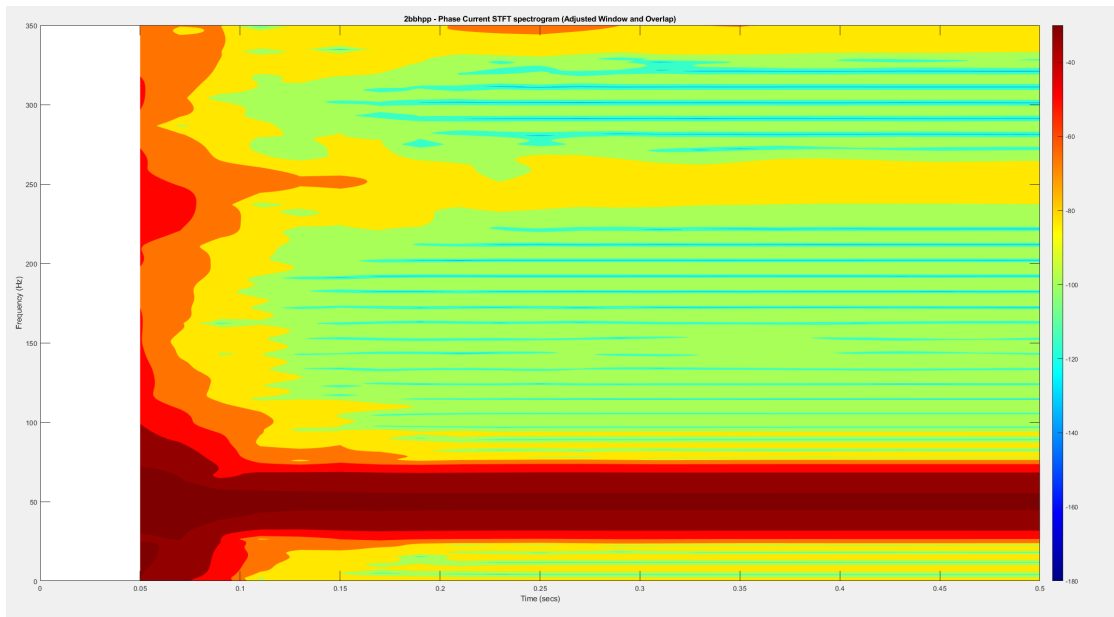
Εικόνα 5.11: Short Time Fourier Transform Healthy



Εικόνα 5.12: Short Time Fourier Transform 1 broken bar



Εικόνα 5.13: Short Time Fourier Transform 2 broken bars

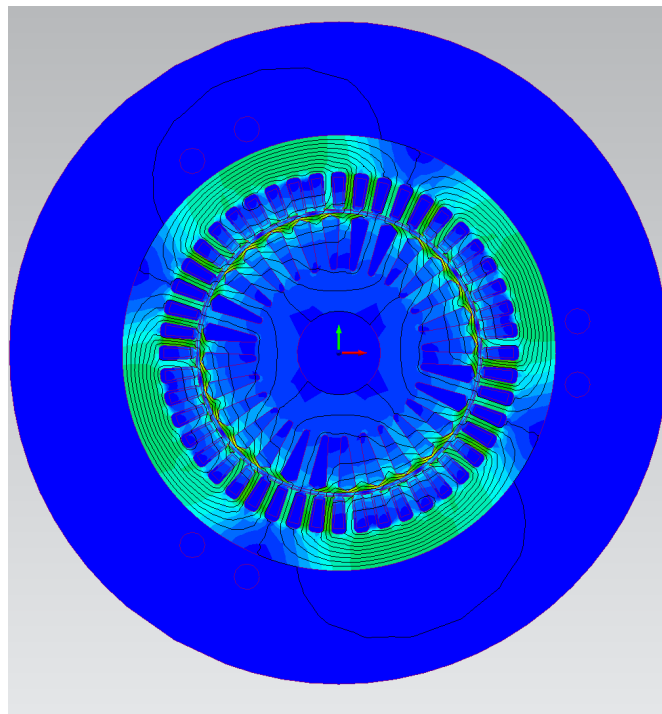


Εικόνα 5.14: Short Time Fourier Transform 2 broken bars half pole pitch

5.4 Ανάλυση Μαγνητικής Ροής

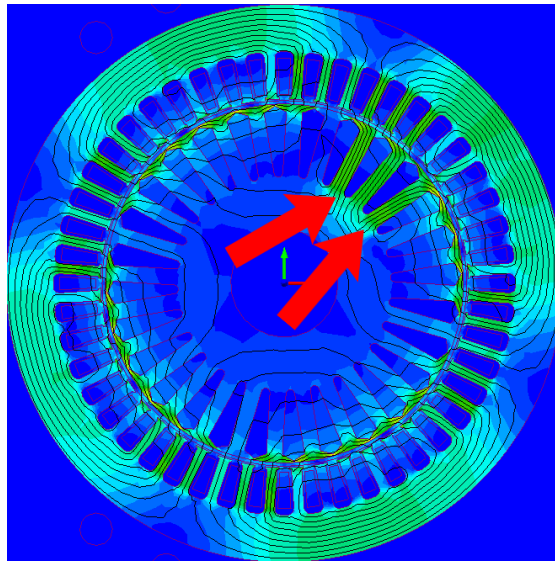
Από τις προσομοιώσεις που κάναμε στο **Simcenter Magnet** αντλήσαμε πίνακες με δεδομένα και για την μαγνητική ροή μέσα από τους αισθητήρες που τοποθετήσαμε ανά 120 μοίρες όπως αναφέραμε στο 4. Πέρα από τα δεδομένα των αισθητήρων, τα οποία μετέπειτα χρειάζονται επεξεργασία μέσω **MATLAB** για να κάνουμε φασματική ανάλυση (SFSA), ανάλυση κατά την εκκίνηση (STFT) και να υπολογίσουμε την μηδενική ακολουθία ροής διαρροής (Zero-Sequence Flux), μέσω του **Magnet** μπορούμε να δούμε και ένα γράφημα με την κατανομή του μαγνητικού πεδίου στην 2D διατομή της μηχανής.

5.4.1 Κατανομή Μαγνητικού Πεδίου



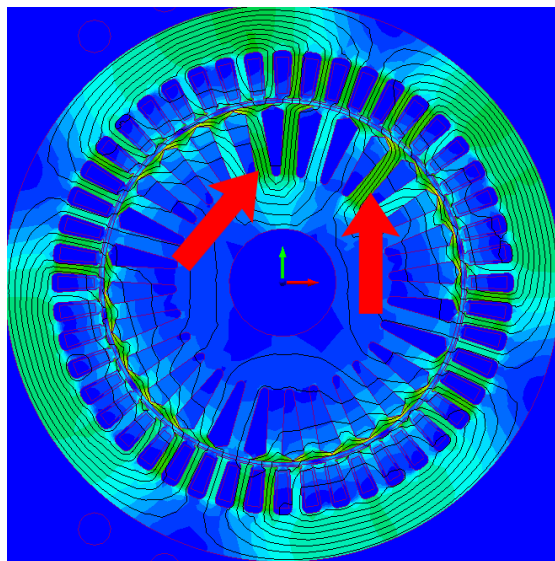
Εικόνα 5.15: Κατανομή Μαγνητικού Πεδίου στην Υγιή Μηχανή

Είναι προφανές κατευθείαν βλέποντας το σχήμα 5.37 ότι υπάρχουν δύο ζεύγη πόλων ή αλλιώς τέσσερις μαγνητικοί πόλοι του κινητήρα. Το μαγνητικό πεδίο της εικόνας φαίνεται πολύ συμμετρικό, επειδή πρόκειται για την υγιή περίπτωση. Στον δρομέα μπορούμε να δούμε μια αρκετά συμμετρική κατανομή των μαγνητικών γραμμών και ομοιόμορφα μοιρασμένη πυκνότητα μαγνητικής ροής ανάμεσα στις αυλακώσεις του δρομέα αλλά και στο διάκενο. Το στιγμιότυπο της κατανομής του μαγνητικού πεδίου αφορά τα πρώτα 30ms κατά την εκκίνηση δηλαδή της μηχανής, όπου λόγω των υψηλότερων ρευμάτων τα φαινόμενα ασυμμετρίας γίνονται πιο έντονα όταν υπάρχουν. Τέτοιες ασυμμετρίες υπάρχουν στα παρακάτω σχήματα, όπου είναι προφανές τότε πρόκειται για δύο γειτονικές σπασμένες μπάρες και τότε για δύο μη γειτονικές.



Εικόνα 5.16: Κατανομή Μαγνητικού Πεδίου με γειτονικές σπασμένες μπάρες

Παρατηρούμε πόσο έντονα χάνεται η ασυμμετρία του πεδίου στην δεύτερη περίπτωση παρόλο που τοπικά η πυκνότητα ροής δίπλα σε κάθε σπασμένη μπάρα είναι σημαντικά ανεβασμένη.

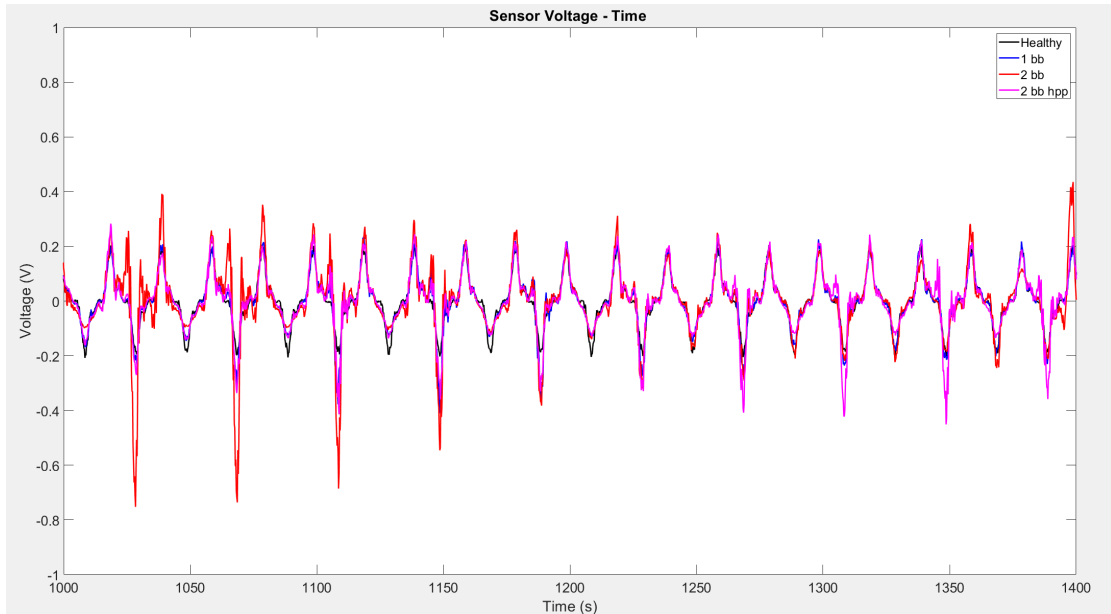


Εικόνα 5.17: Κατανομή Μαγνητικού Πεδίου με μη γειτονικές σπασμένες μπάρες

5.4.2 Stray Flux Signature Analysis (SFSA)

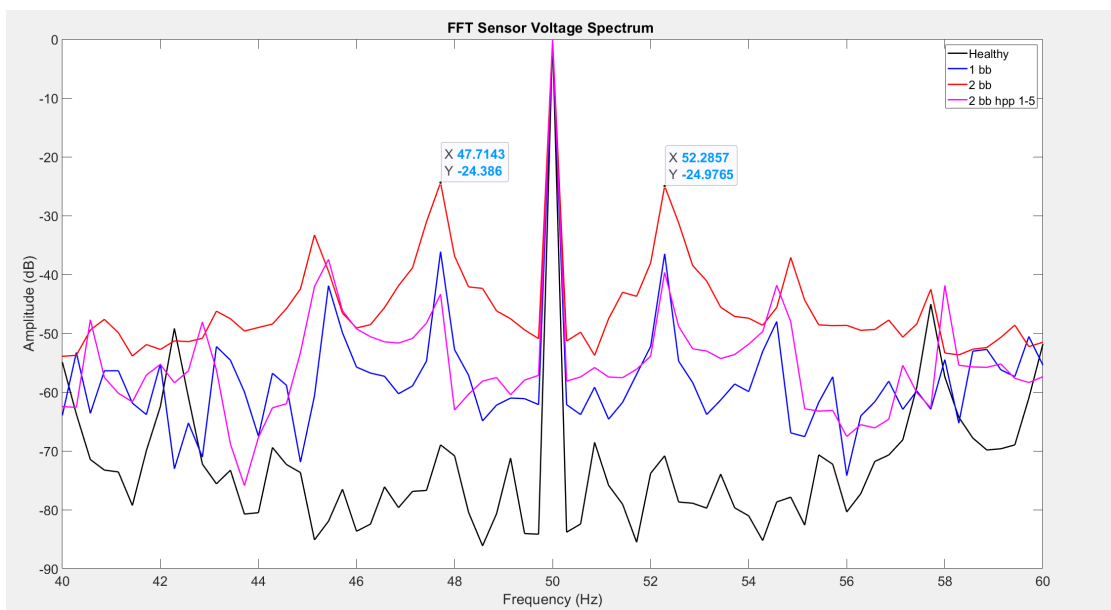
Ενώ η κάτοψη κατανομής μαγνητικού πεδίου της μηχανής αποτυπώνει πολύ έντονα το πρόβλημα, οι πραγματικές μετρήσεις που μπορούμε να πάρουμε σε μια πραγματική εφαρμογή είναι μέσω των αισθητήρων που τοποθετούμε σε συμμετρικές θέσεις περιμετρικά της μηχανής. Αρχικά

εξάγουμε τα δεδομένα και δημιουργούμε γράφημα με την τάση στα άκρα των μαγνητικών αισθητήρων σε σχέση με τον χρόνο σε λειτουργία μόνιμης κατάστασης :

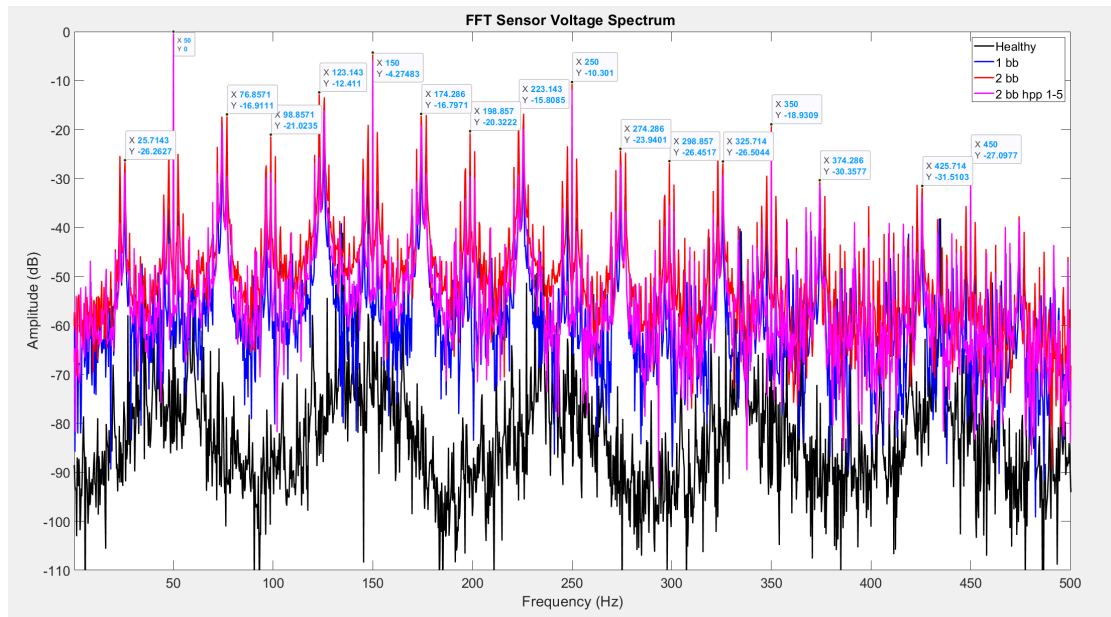


Εικόνα 5.18: Μαγνητική Εξωτερική Ροή στον χρόνο με φορτίο 26Nm

Όπως βλέπουμε το γράφημα δεν πλησιάζει καν σε ημιτονοειδές σήμα, άρα περιμένουμε πολλές αρμονικές στο φάσμα. Αφού επεξεργαστούμε λοιπόν τα δεδομένα από τους **SensorA**, **SensorB** και **SensorC** μέσω ανάλυσης **Fourier** παίρνουμε την φασματική απεικόνιση της εξωτερικής μαγνητικής ροής της μηχανής.



Εικόνα 5.19: Φάσμα Μαγνητικής Εξωτερικής Ροής με φορτίο 26Nm (40Hz - 60Hz)



Εικόνα 5.20: Φάσμα Μαγνητικής Εξωτερικής Ροής με φορτίο 26Nm (0Hz - 500Hz)

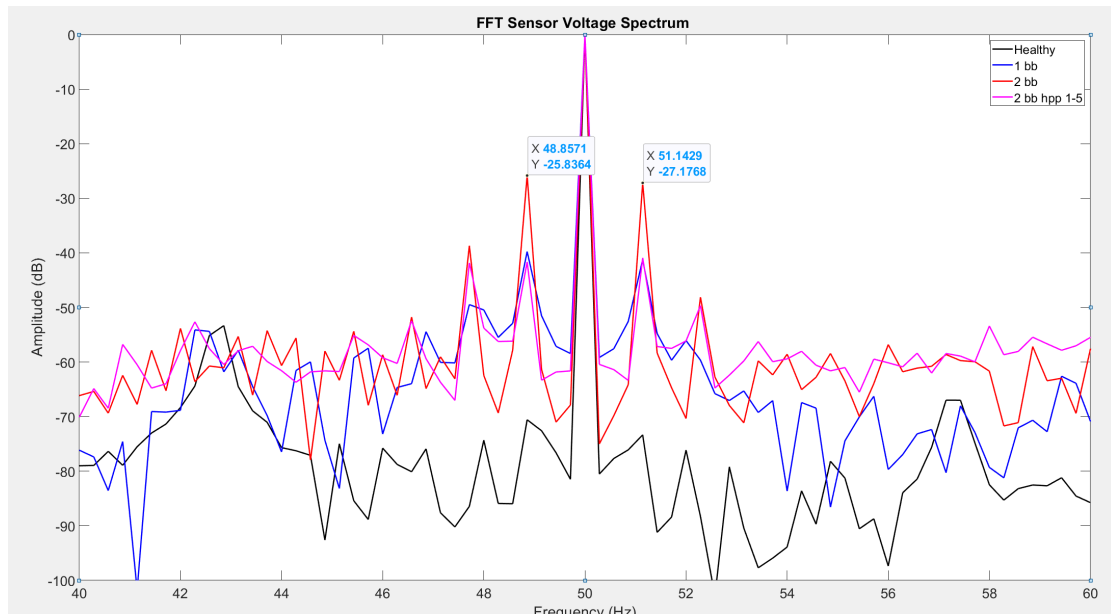
Όπως προβλέπει και η θεωρία παίρνουμε παρόμοιο αρμονικό αποτύπωμα με αυτό στην περίπτωση της MCSA με βασική διαφορά την αρμονική στα 150Hz και στις τριπλέτες που αναιρούνται στο ρεύμα λόγω συνδεσμολογίας.

Πολύ έντονη για άλλη μια φορά είναι η ύπαρξη της $f_s - 2sf_s$ όπως και η $f_s - 4sf_s$ αυτή τη φορά, όπως είδαμε στην σχέση 3.4, οι οποίες ξεχωρίζουν κυρίως δεξιά της βασικής αρμονικής των 50 Hz. Παρακάτω βλέπουμε τα πλάτη των αρμονικών που προέκυψαν από την προσομοίωση:

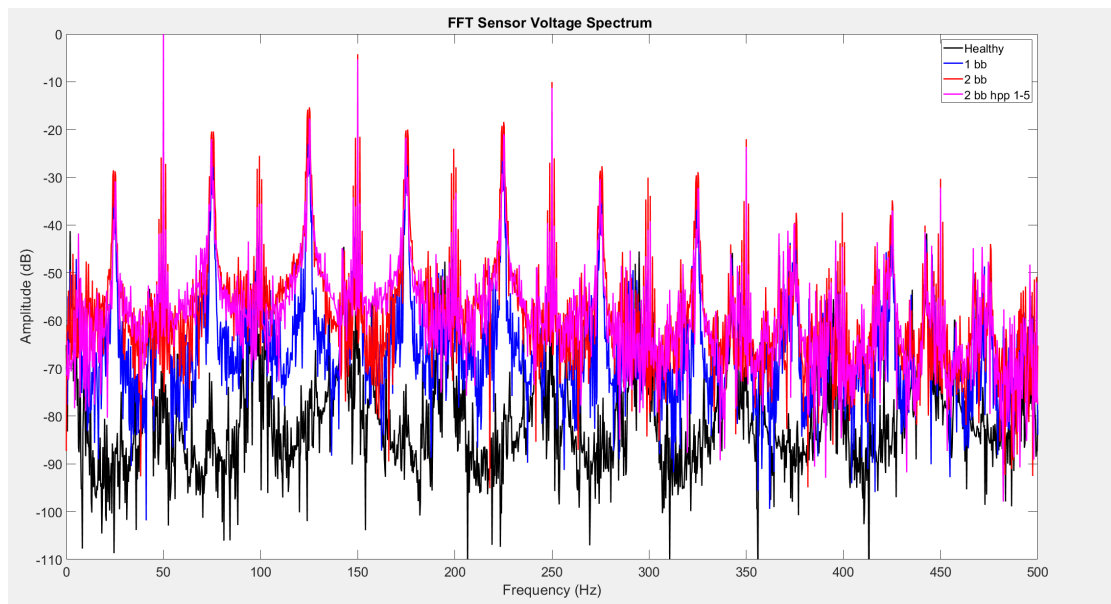
Πίνακας 5.5: Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου μαγνητικής ροής

Περιπτώσεις Προσομοίωσης	$f_s - 2sf_s$	$f_s - 4sf_s$
Healthy	-68.9 dB	-70.8 dB
1 broken bar	-36.1 dB	-36.4 dB
2 broken bars (adj)	-24.4 dB	-24.9 dB
2 broken bars (hpp)	-43.3 dB	-39.6 dB

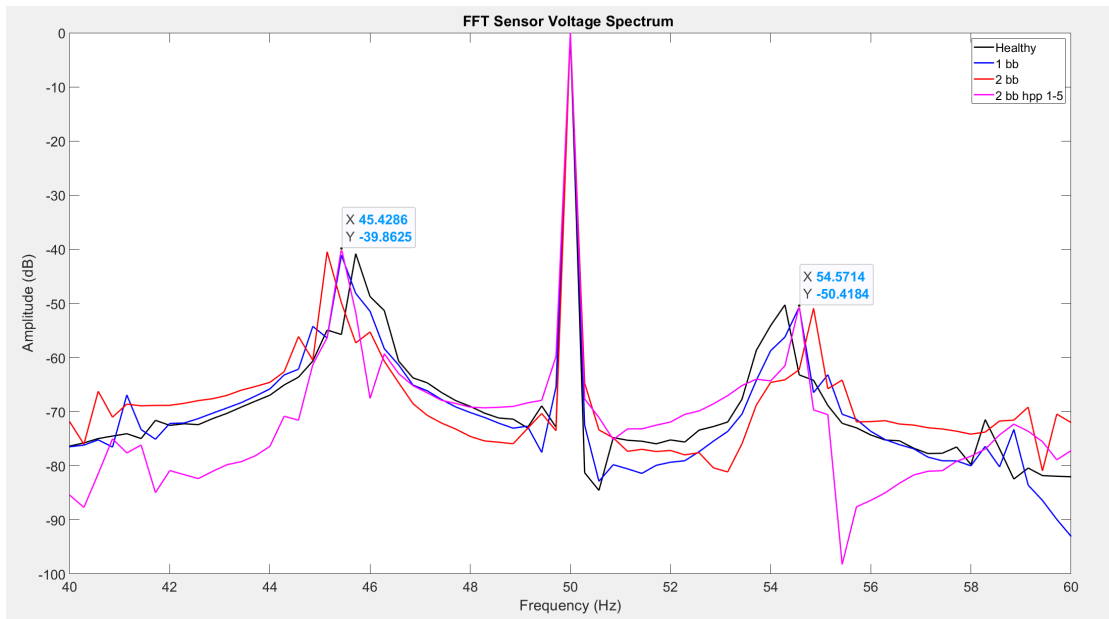
Με βάση τον πίνακα 5.9 βλέπουμε μεγάλη διαφορά αυτή τη φορά στις πλευρικές $f_s + 4sf_s$ οι οποίες είναι εξίσου έντονες στις δύο σπασμένες μπάρες είτε πρόκειται για γειτονικές είτε μη γειτονικές. Αναλύοντας τα ίδια φάσματα στις περιπτώσεις με λιγότερο φορτίο παρατηρούμε ακριβώς ότι παρατηρήσαμε και στην MCSA: η ολίσθηση μικραίνει και γενικότερα οι αρμονικές που υποδηλώνουν σφάλμα γίνονται όλο και δυσκολότερα διακριτές όσο μειώνεται το φορτίο.



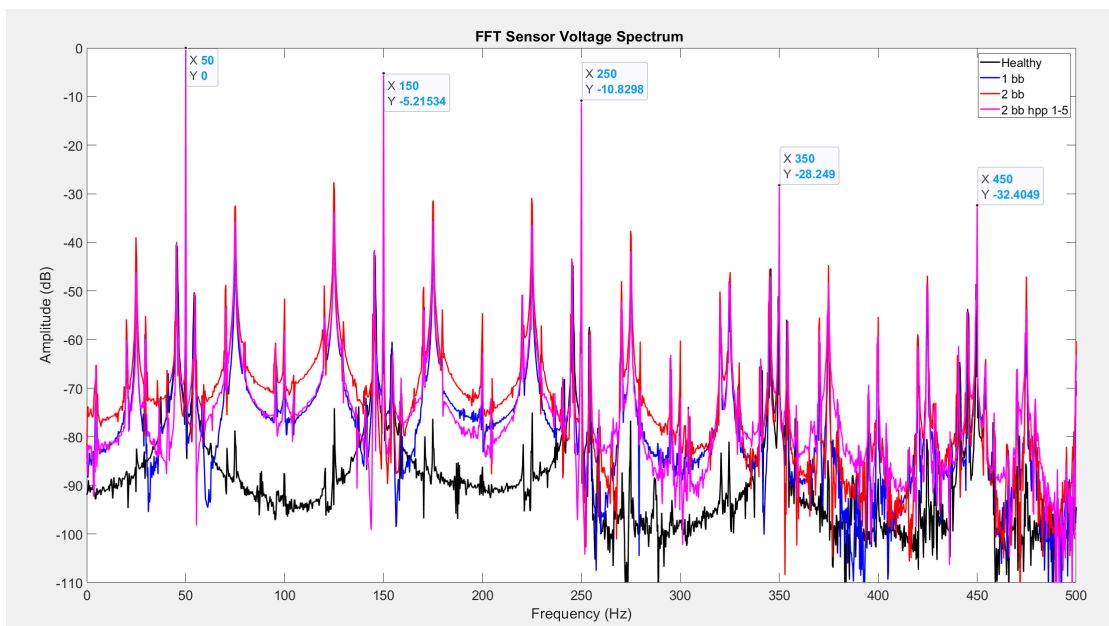
Εικόνα 5.21: Φάσμα Μαγνητικής Εξωτερικής Ροής με φορτίο 13Nm (40Hz - 60Hz)



Εικόνα 5.22: Φάσμα Μαγνητικής Εξωτερικής Ροής με φορτίο 13Nm (0Hz - 500Hz)



Εικόνα 5.23: Φάσμα Μαγνητικής Εξωτερικής Ροής χωρίς φορτίο (40Hz - 60Hz)



Εικόνα 5.24: Φάσμα Μαγνητικής Εξωτερικής Ροής χωρίς φορτίο (0Hz - 500Hz)

Άλλη μια παρατήρηση που πρέπει να κάνουμε είναι ότι η μηχανή αυτή είναι πλούσια σε αρμονικό περιεχόμενο ακόμα και στην περίπτωση χωρίς φορτίο. Σίγουρα σημαντικό ρόλο στην δημιουργία αυτών των αρμονικών παίζει η γεωμετρία της μηχανής. Οι 28 αυλακώσεις του δρομέα είναι ακέραιο πολλαπλάσιο των αριθμών των πόλων της μηχανής (4) με αποτέλεσμα να παρουσιάζει αρμονικές PSH όπως αναφέραμε και στην θεωρία. Αυτές εντοπίζονται ανά

100Hz, με μεγαλύτερη αυτή στα 634Hz, αλλά στο συγκεκριμένο γράφημα φαίνονται ξεκάθαρα αυτές στα 334Hz και 434Hz. Επίσης το μέγεθος της μηχανής παίζει ρόλο καθώς το σιδηρομαγνητικό υλικό έρχεται πιο εύκολα σε κορεσμό.

Τέλος μπορούμε να εντοπίσουμε αρμονικές 24,3Hz δεξιά και αριστερά των αρμονικών λόγω μηχανικής ταχύτητας. Αυτές είναι πολύ αισθητές εφόσον σχεδιάσαμε τον κινητήρα μας σε 2D περιβάλλον, αλλά αν κάναμε 3D προσομοίωση με την κλίση των μπαρών (skewing) θα εξουδετερώναμε αυτές τις αρμονικές. Οι συγκεκριμένες είναι εμφανείς μόνο στα δεδομένα του μαγνητικού πεδίου, γιατί ενώ περνάνε στο ρεύμα του στάτη, καλύπτουν η μια την άλλη καθώς επιδράνε σε πολλά τυλίγματα ταυτόχρονα. Τα παραπάνω εξηγούν το έντονο speed ripple της μηχανής.

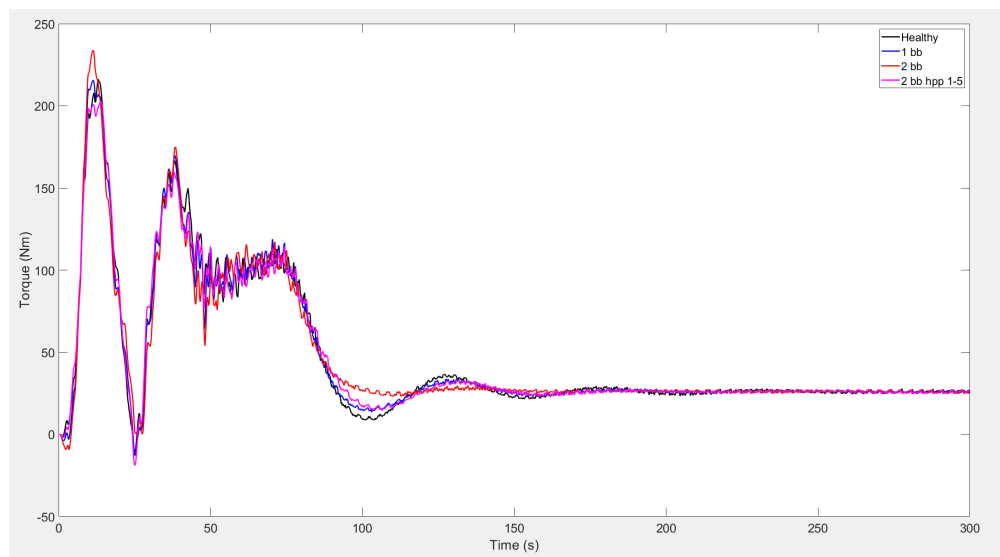
Θεωρητικά θα είχαμε εντοπίσει την εσφαλμένη λειτουργία της μηχανής και μόνο από τα αποτελέσματα, ακόμα και στην περίπτωση με τις δύο μη γειτονικές σπασμένες μπάρες. Όμως στην πράξη τίποτα δεν είναι ιδανικό, τα ρουλεμάν φθείρονται και η βαρύτητα προκαλεί έστω και μικρή εκκεντρότητα, η οποία δημιουργεί ακριβώς τις ίδιες αρμονικές στην υγιή λειτουργία.

Συνεπώς δεν θα μπορούσαμε σε πρακτικό επίπεδο να διαγνώσουμε με σιγουριά τις σπασμένες μπάρες μέχρι το ποσοστό της ζημιάς να επηρεάσει αρκετά την λειτουργία της μηχανής, που τότε ίσως είναι αργά. Πρέπει λοιπόν να συνεχίσουμε την μελέτη για να βρούμε μια πιο αξιόπιστη λύση.

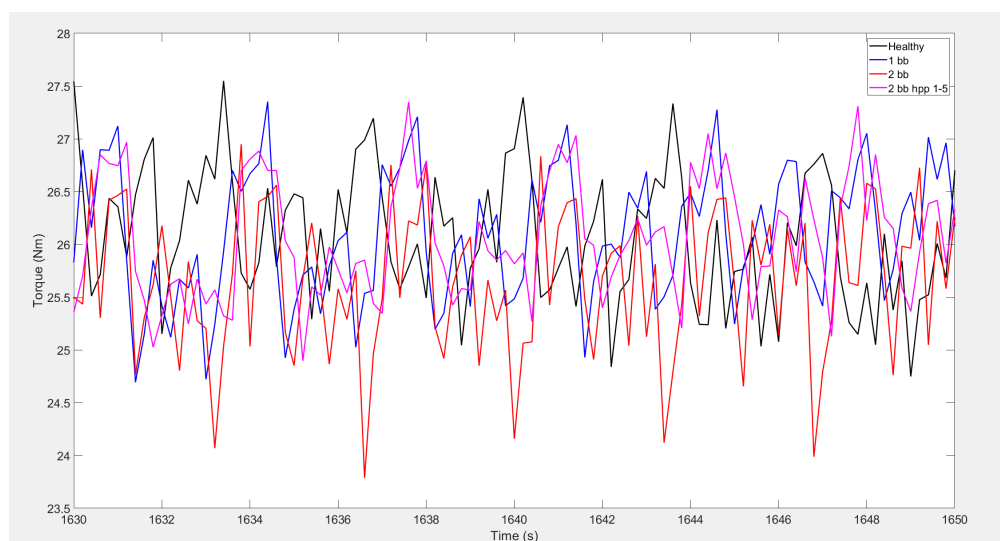
5.5 Ανάλυση Μηχανικής Ροπής

Πάμε πρώτα λοιπόν να επεξεργαστούμε μέσα από τους πίνακες "MotionQuantities.csv" που αποθηκεύσαμε για την κάθε περίπτωση βλάβης και φορτίου, δεδομένα σχετικά με την ροπή της μηχανής και να δούμε πόσο εμφανές θα είναι το πρόβλημα του δρομέα αλλά και κατά πόσο όσα μελετήσαμε στην θεωρία εφαρμόζονται στην διαγνωστική μελέτη της ροπής.

Αρχικά πάμε να δούμε την ροπή σε συνάρτηση με τον χρόνο, τόσο κατά την εκκίνηση, όσο και στη σταθερή λειτουργία :



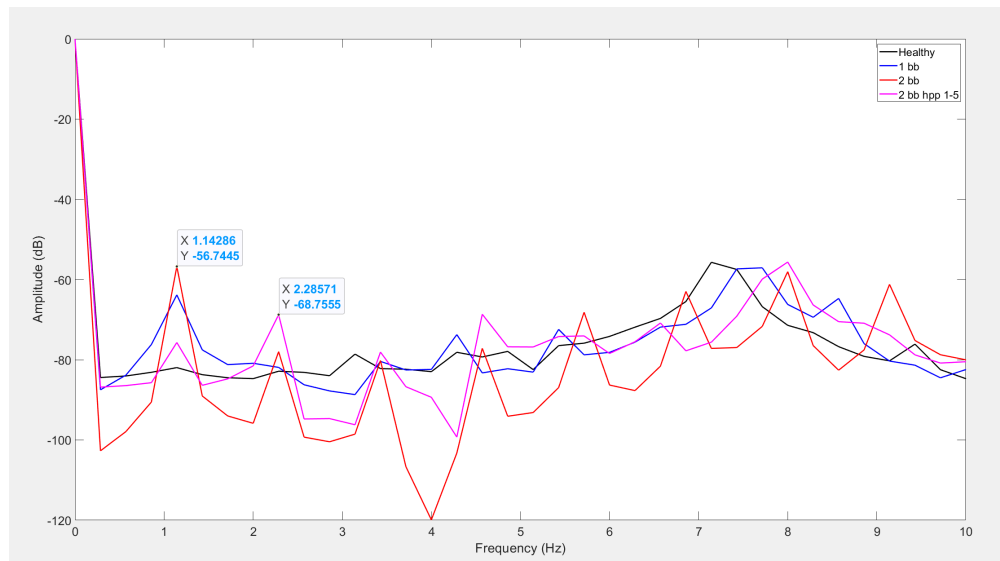
Εικόνα 5.25: Μηχανική Ροπή στον χρόνο με φορτίο 26 Nm (0 - 300 sec)



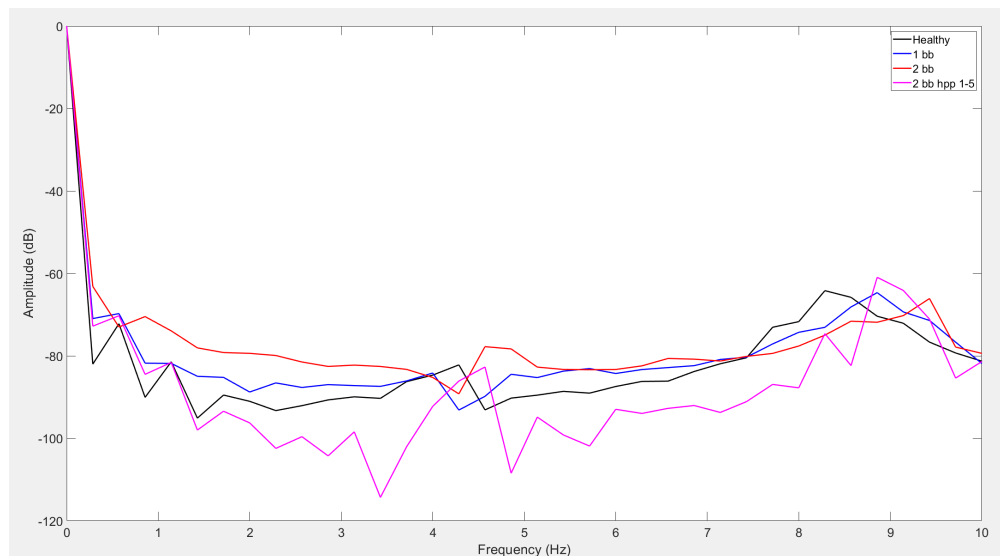
Εικόνα 5.26: Μηχανική Ροπή στον χρόνο με φορτίο 26 Nm (1630 - 1650 sec)

Η κυματομορφή στην σταθερή λειτουργία όπως φαίνεται από το σχήμα 5.26 δεν μοιάζει καθόλου με ημίτονο οπότε περιμένουμε να δούμε φάσμα πλούσιο σε αρμονικές. Πάμε λοιπόν να χρησιμοποιήσουμε το σήμα της μηχανικής ροπής στην μόνιμη κατάσταση (torque_s) για να εξάγουμε πληροφορίες.

Εικόνα 5.27: Ανάλυση Fourier Μηχανικής Ροπής με φορτίο 26 Nm (0Hz - 10Hz)



Εικόνα 5.28: Ανάλυση Fourier Μηχανικής Ροπής με φορτίο 13 Nm (0Hz - 10Hz)



Εικόνα 5.29: Ανάλυση Fourier Μηχανικής Ροπής χωρίς φορτίο (0Hz - 10Hz)

Στην περίπτωση του μισού ονομαστικού φορτίου (13 Nm) και στην περίπτωση χωρίς φορτίο (1 Nm) βλέπουμε ότι οι αρμονικές μπερδεύονται εύκολα με τον θόρυβο σε μια πραγματική μηχανή καθώς όλες βρίσκονται κάτω από τα -56dB άρα δεν μπορούμε να βγάλουμε χρήσιμη

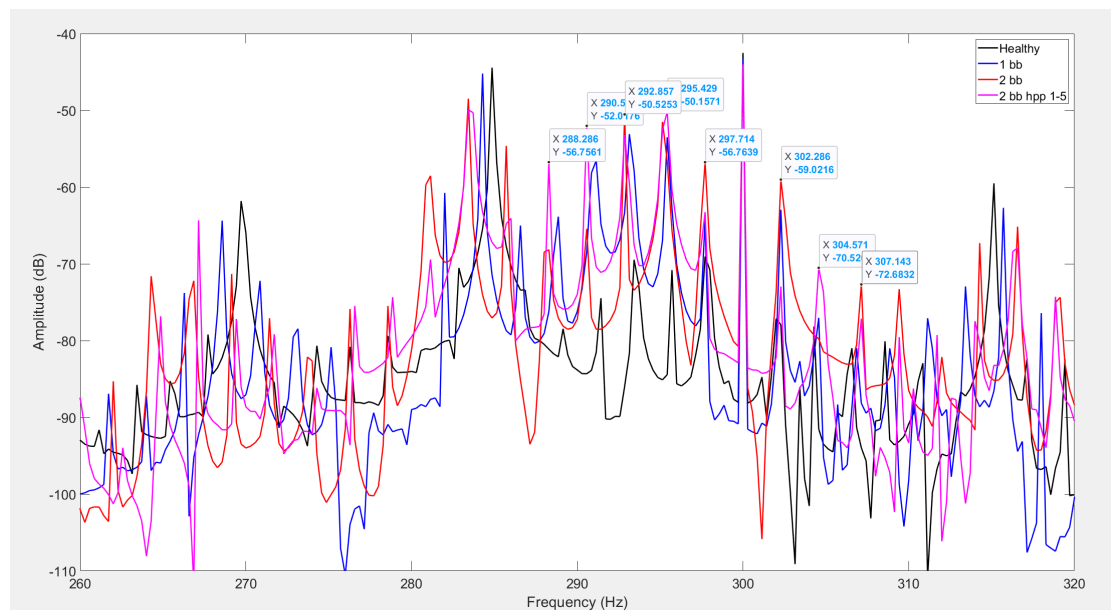
πληροφορία. Όμως στην περίπτωση του ονομαστικού φορτίου μπορούμε εύκολα να διακρίνουμε τις αρμονικές γύρω από την DC συνιστώσα σύμφωνα με τον τύπο 3.13.

Για $s = 0.022$ και $f_s = 50$ έχουμε $f_{bb} = 2.2 * k$ άρα περιμένουμε να δούμε αρμονικές στο 2.2 , 4.4 , 6.6 Πράγματι οι πρώτες δύο αρμονικές, δηλαδή η $2sf_s$ και η $4sf_s$, είναι αρκετά έντονες.

Πίνακας 5.6: $2ksf_s$ Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου ροπής

Περιπτώσεις Προσομοίωσης	$2sf_s$	$4sf_s$
Healthy	-82.87 dB	-77.92 dB
1 broken bar	-55.86 dB	-71.90 dB
2 broken bars (adj)	-49.84 dB	-65.56 dB
2 broken bars (hpp)	-69.14 dB	-61.81 dB

Βλέπουμε λοιπόν ότι μπορούμε να εντοπίσουμε αρκετά έντονα τις αρμονικές γύρω από την DC. Το ίδιο μπορεί να συμβεί και γύρω από την συχνότητα των 300 Hz. Ανά $2ksf_s$ βλέπουμε αρμονικές τόσο στα αριστερά όσο και στα δεξιά των 300 Hz.

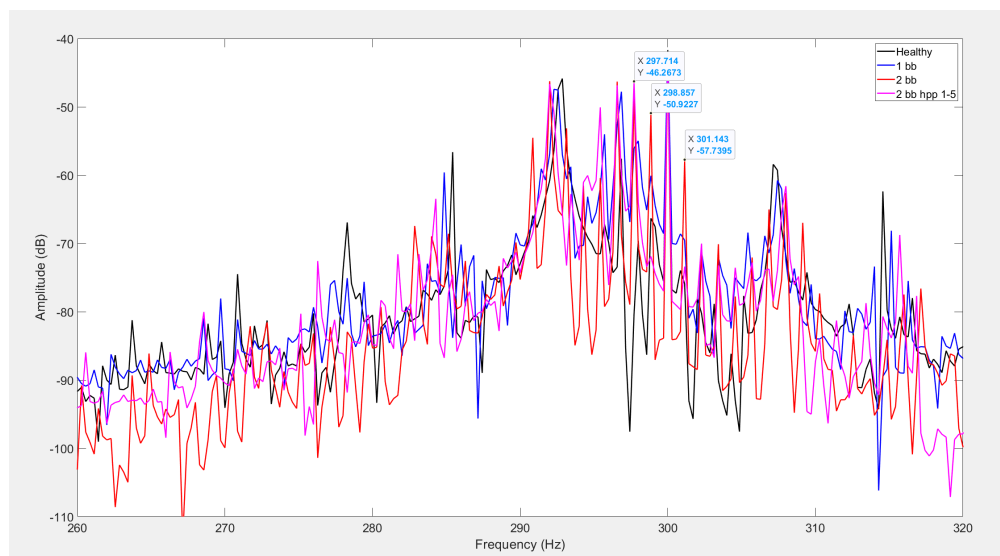


Εικόνα 5.30: Ανάλυση Fourier Μηχανικής Ροπής με φορτίο 26 Nm (260Hz - 320Hz)

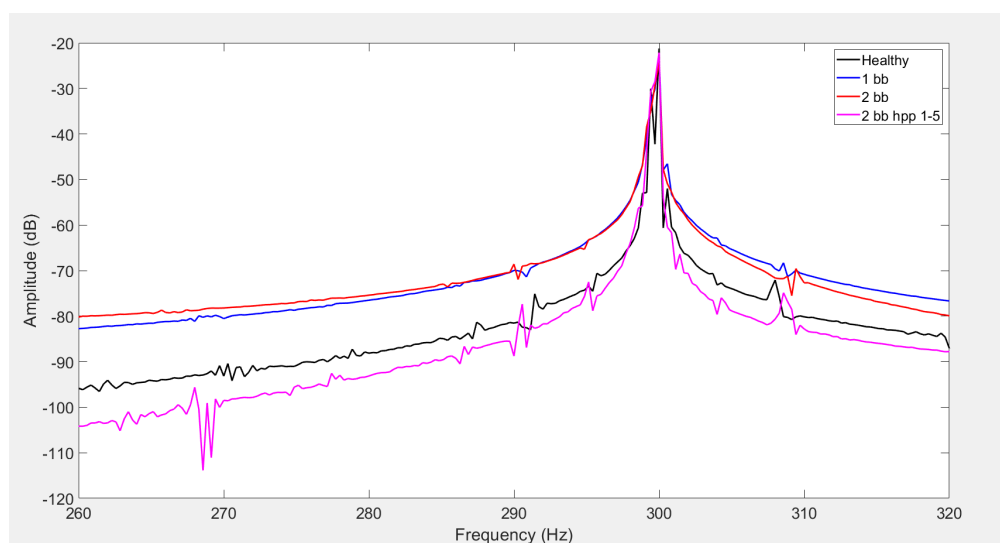
Δεδομένου ότι το slip στην περίπτωση του full load στην υγιή κατάσταση είναι 2.16% βλέπουμε ότι η σχέση $2ksfs$ ισούται με 2.16k οπότε βλέπουμε για κάθε ακέραιο k ένα spike δεξιά και αριστερά από την αρμονική των 300Hz.

Παρόμοια αποτελέσματα μπορούμε να αντλήσουμε και από το γράφημα με μισό φορτίο όμως τα spikes έχουν μικρότερη απόσταση μεταξύ τους, όπως είναι λογικό αφού στην περίπτωση αυτή το slip είναι μόλις 1.04% .

Ωστόσο στην περίπτωση που δεν υπάρχει φορτίο είναι αρκετά δύσκολο να διακρίνουμε αρμονικές και να εντοπίσουμε σφάλματα ειδικά αν δεν έχουμε επίγνωση των τιμών που θα έδινε μια μέτρηση σε υγιή κατάσταση. Ακόμα και σε αυτή την περίπτωση όμως λόγω του θορύβου στην περίπτωση χωρίς φορτίο είναι σχεδόν αδύνατο να διακρίνουμε αρμονικές γύρω από τα 300 Hz που να υποδηλώνουν την ζημιά στον δρομέα.



Εικόνα 5.31: Ανάλυση Fourier Μηχανικής Ροπής με φορτίο 13 Nm (260Hz - 320Hz)



Εικόνα 5.32: Ανάλυση Fourier Μηχανικής Ροπής χωρίς φορτίο (260Hz - 320Hz)

5.6 Μαγνητική Ροή Μηδενικής Ακολουθίας

[62] Η Εξωτερική Μαγνητική Ροή Μηδενικής Ακολουθίας προκύπτει από το άθροισμα των στιγμιαίων τιμών των τριών κυματομορφών τάσης των αισθητήρων. Είναι προφανές λοιπόν ότι η βασική της αρμονική θα βρίσκεται στα $3f_s$ δηλαδή στα 150Hz. Η ακτινική εξωτερική ροή ενός υγιούς επαγωγικού κινητήρα αποτελείται από τα ακόλουθα αρμονικά συστατικά, παρόμοια με το ρεύμα του στάτη :

$$\Phi_{stray} = \Phi_{MMF} + \Phi_{sat} + \Phi_{RSH} \quad (5.2)$$

Όπου :

$$\Phi_{MMF} = \sum_{i=1}^n \Phi_n \cos(n\omega t), n = 6k \pm 1, k \in \mathbb{Z} \quad (5.3)$$

$$\Phi_{sat} = \sum_{i=1}^m \Phi_{sat} \cos(n\omega t + \phi_{sat}), m = 3l, l \in \mathbb{Z} \quad (5.4)$$

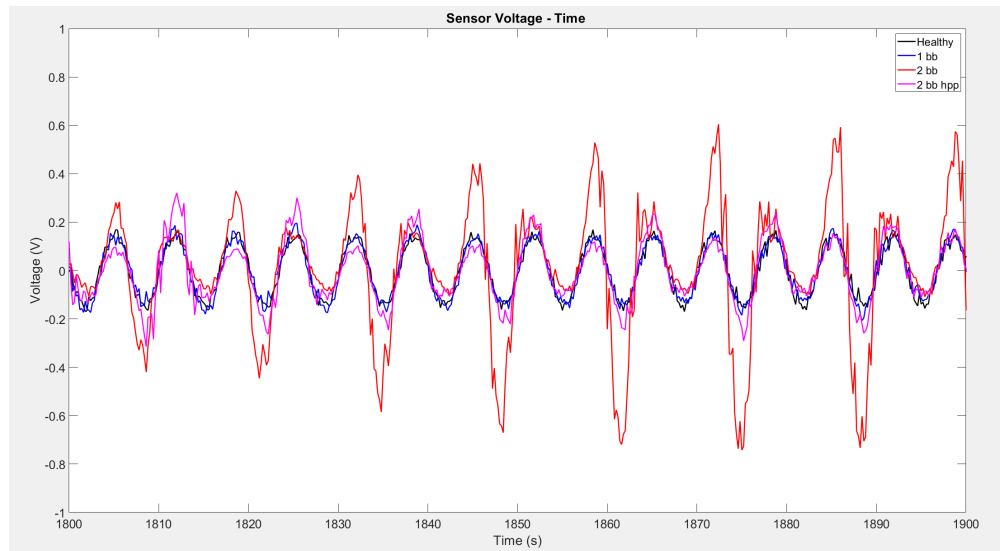
$$\Phi_{RSH} = \sum_{i=1}^z \Phi_z \cos\left[\left(\frac{R}{p}(1-s) + n\right)\omega t + \phi_{RSH}\right] \quad (5.5)$$

Η πρώτη ομάδα αρμονικών είναι τα πολλαπλάσια της συχνότητας τροφοδοσίας, εκτός από τα τριπλάσια. Η δεύτερη ομάδα είναι τα τριπλάσια που σχετίζονται με τον κορεσμό και η τελευταία περιλαμβάνει τις αρμονικές των αυλακώσεων του δρομέα (RSH). Όταν σπάσει μια μπάρα περιμένουμε να δούμε πλευρικά spikes σε όλες τις προαναφερθείσες αρμονικές. Πάμε όμως να τα δούμε και στην πράξη.

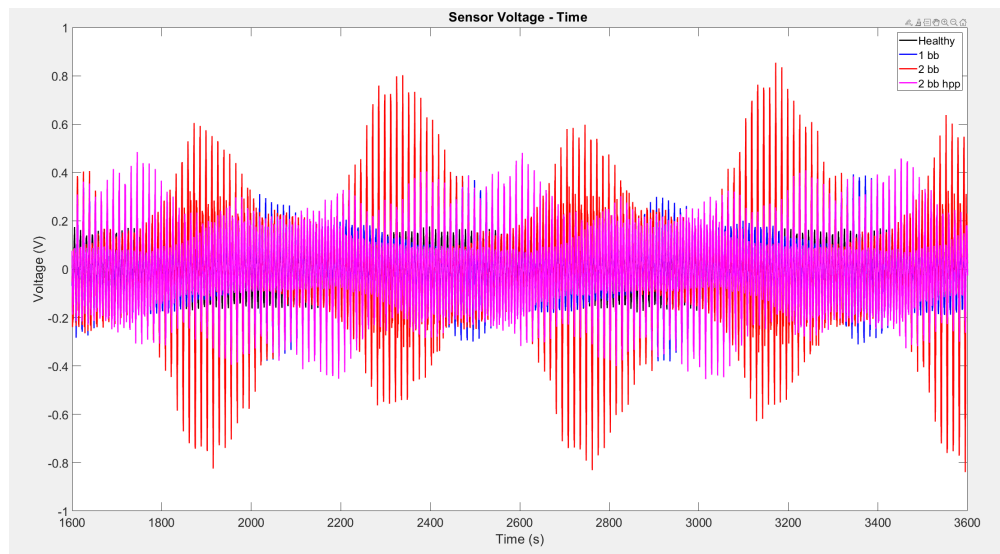
Βάζοντας τα σήματα, που πήραμε στις προσομοιώσεις από τους τρεις αισθητήρες γύρω από την μηχανή, σε πίνακες της MATLAB, ξεκινάμε την επεξεργασία τους αρχικά αθροίζοντας όλα τα σήματα ανά περίπτωση όπως φαίνεται παρακάτω:

$$sensorSumHealthyss = sensorAHealthyss + sensorBHealthyss + sensorCHealthyss; \quad (5.6)$$

Το ίδιο κάνουμε και για τα σήματα 1bb, 2bb και 2bbhpp και εξάγουμε την κυματομορφή τους σε σχέση με τον χρόνο, υπό σταθερή λειτουργία. Το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω :

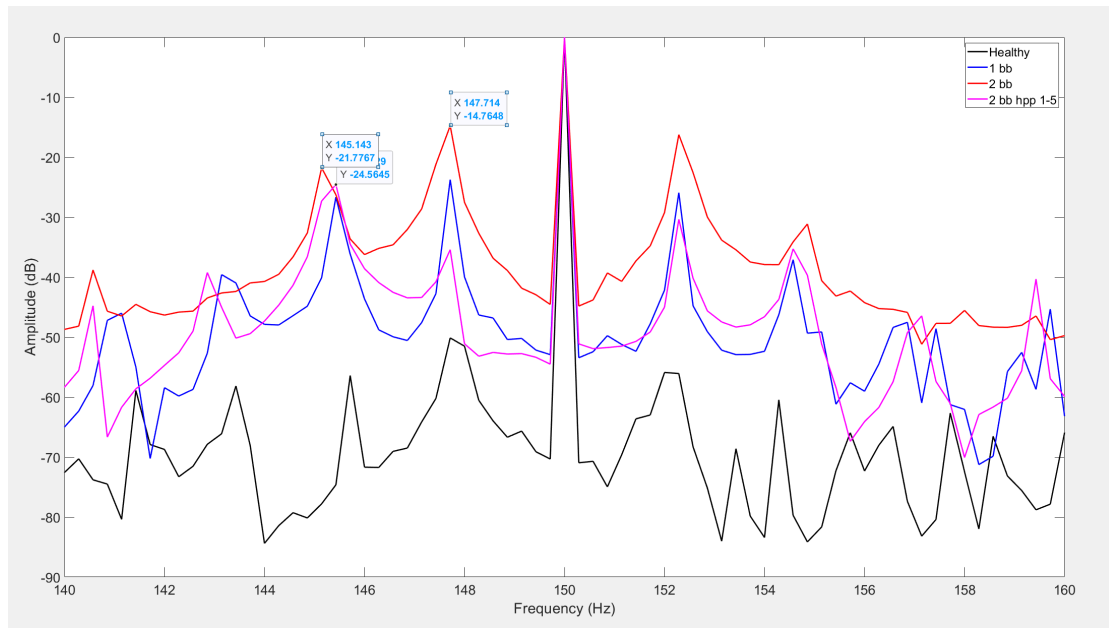


Εικόνα 5.33: Μαγνητική Ροή Μηδενικής Ακολουθίας στον χρόνο με φορτίο 26 Nm



Εικόνα 5.34: Μαγνητική Ροή Μηδενικής Ακολουθίας στον χρόνο με φορτίο 26 Nm

Παρατηρούμε ότι ενώ στην υγιή περίπτωση η κυματομορφή είναι σχεδόν ημιτονοειδής, στις υπόλοιπες περιπτώσεις περιμένουμε με βάση το αποτέλεσμα να δούμε πλούσιο αρμονικό περιεχόμενο. Αφού ακολουθήσει μετασχηματισμός Fourier και κανονικοποίηση βάζουμε τα σήματα σε κοινό plot. Το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω :



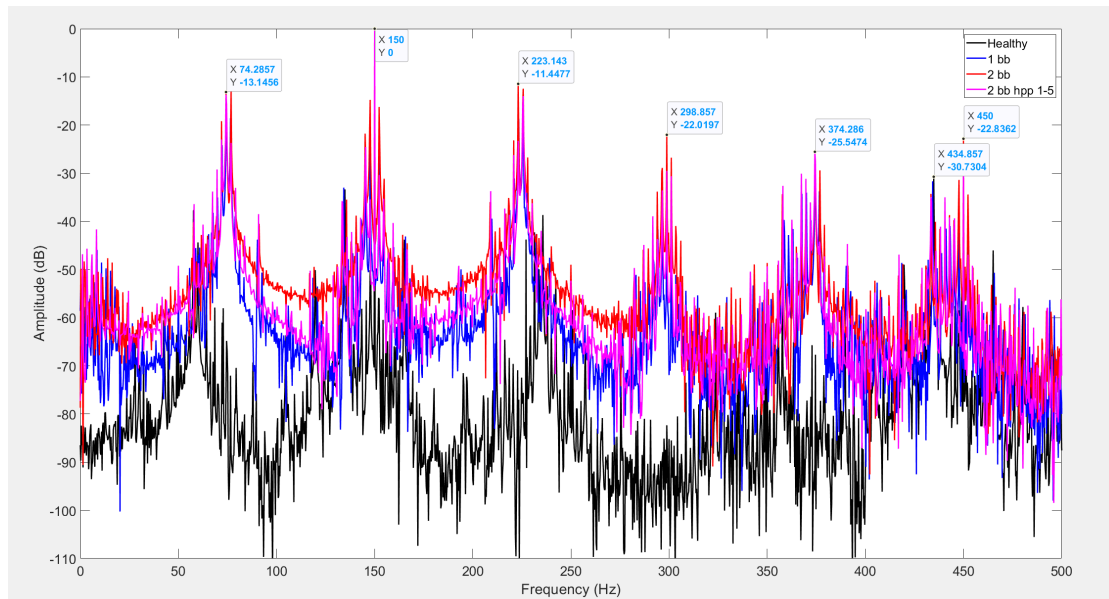
Εικόνα 5.35: Φάσμα Μαγνητικής Ροής Μηδενικής Ακολουθίας με φορτίο 26 Nm (140Hz - 160Hz)

Οι αρμονικές διακρίνονται πολύ πιο έντονα σε αυτή την περίπτωση. Ξεχωρίζουν φυσικά η $3f_s - 2sf_s$, η $3f_s + 2sf_s$, η $3f_s - 4sf_s$ και η $3f_s + 2sf_s$. Πάμε όμως να δούμε τα πλάτη τους σε πίνακα για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε με τις υπόλοιπες μεθόδους.

Πίνακας 5.7: Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου μηδενικής ακολουθίας ροής

Περιπτώσεις Προσομοίωσης	$3f_s - 2sf_s$	$3f_s - 4sf_s$
Healthy	-50.1 dB	-56.3 dB
1 broken bar	-23.7 dB	-26.2 dB
2 broken bars (adj)	-14.7 dB	-21.7 dB
2 broken bars (hpp)	-35.4 dB	-24.5 dB

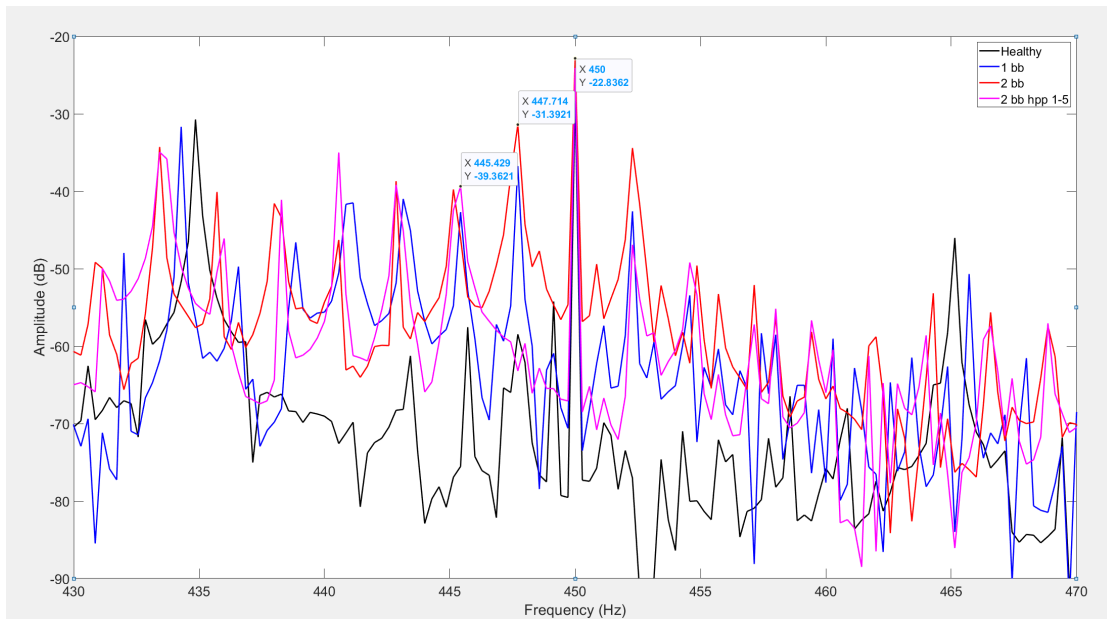
Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι η περίπτωση των δύο σπασμένων μπαρών που απέχουν μισό πολικό βήμα μεταξύ τους γίνεται ξεκάθαρα αισθητή ειδικά στην $f_s - 4sf_s$. Ξεκάθαρα λοιπόν βλέπουμε στο αρμονικό περιεχόμενο του Zero-Sequence Flux αξιόπιστη διάγνωση σε όλες τις περιπτώσεις σπασμένων μπαρών. Παρόμοιο μοτίβο ακολουθεί και το υπόλοιπο αρμονικό περιεχόμενο :



Εικόνα 5.36: Φάσμα Μαγνητικής Ροής Μηδενικής Ακολουθίας με φορτίο 26 Nm (0Hz - 500Hz)

Μια παρατήρηση που πρέπει να κάνουμε είναι ότι η μηχανή αυτή και στο σήμα μηδενικής ακολουθίας είναι πλούσια σε αρμονικό περιεχόμενο. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, σημαντικό ρόλο στην δημιουργία αυτών των αρμονικών παίζει η γεωμετρία της μηχανής. Οι 28 αυλακώσεις του δρομέα είναι ακέραιο πολλαπλάσιο των αριθμών των πόλων της μηχανής (4) με αποτέλεσμα να παρουσιάζει αρμονικές PSH. Στο συγκεκριμένο γράφημα βλέπουμε ένα καθαρό spike στα 434Hz λόγω αυτού του φαινομένου. Επίσης το μέγεθος της μηχανής παίζει ρόλο καθώς το σιδηρομαγνητικό υλικό έρχεται πιο εύκολα σε κορεσμό. Τέλος βλέπουμε ξανά και τις αρμονικές λόγω μηχανικής ταχύτητας ανά 24,3Hz, αφού όπως αναφέραμε και προηγουμένως δεν υπολογίζεται η κλίση των μπαρών (skewing).

Παρόλο όμως που αυτή η διαπίστωση δεν θα προβλημάτιζε τους μηχανικούς γιατί σε πραγματικές συνθήκες έστω και μικρή εκκεντρότητα προκαλεί τις ίδιες αρμονικές, κάτι αναπόφευκτο ακόμα και στην υγιή κατάσταση λειτουργίας, στην περίπτωση μηδενικής ακολουθίας η αρμονική στο σημείο $f_s - 4sf_s$ μαρτυρά και τις δύο σπασμένες μπάρες ακόμα και στην περίπτωση που είναι μη γειτονικές και αλληλοαναιρούν τις ασυμμετρίες που προκαλούν στο μαγνητικό πεδίο. Αντίστοιχα αποτελέσματα εντοπίζουμε και στην 9η αρμονική γύρω από τα 450Hz. Πάμε να δούμε λίγο πιο καθαρό το γράφημα :



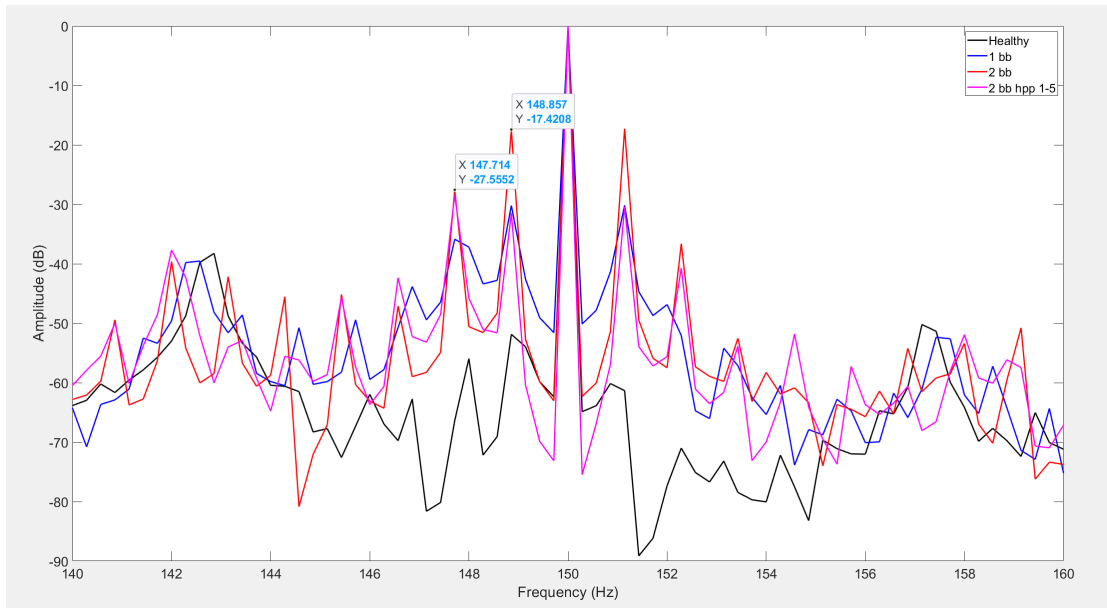
Εικόνα 5.37: Φάσμα Μαγνητικής Ροής Μηδενικής Ακολουθίας με φορτίο 26 Nm (430Hz - 470Hz)

Πίνακας 5.8: Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου μηδενικής ακολουθίας ροής

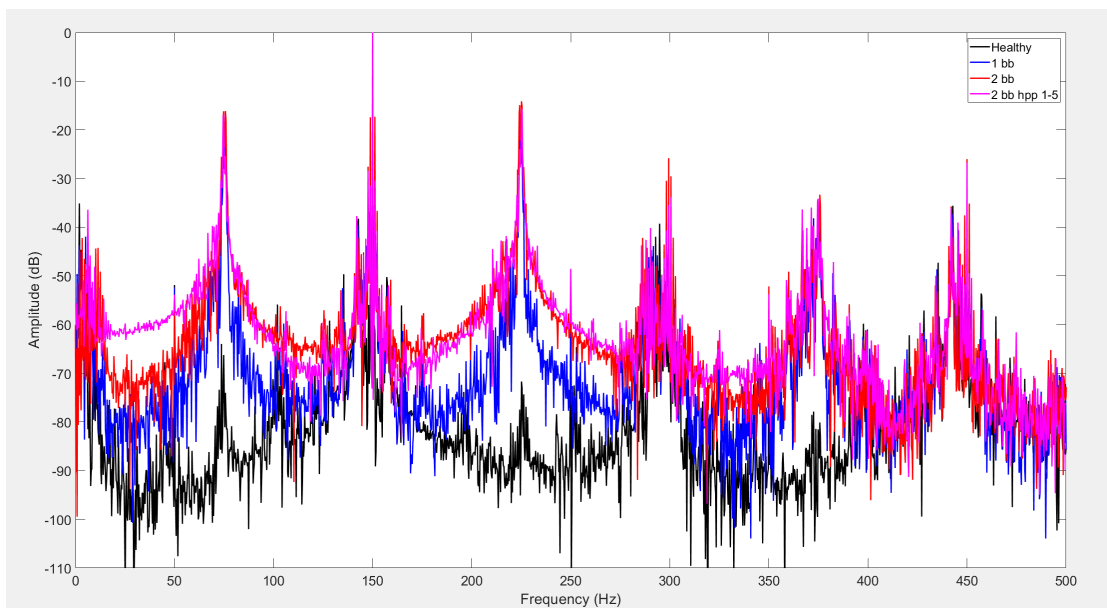
Περιπτώσεις Προσομοίωσης	$450 - 2sf_s$	$450 - 4sf_s$
Healthy	-58.4 dB	-57.5 dB
1 broken bar	-36.7 dB	-42.6 dB
2 broken bars (adj)	-31.4 dB	-39.7 dB
2 broken bars (hpp)	-59.6 dB	-39.3 dB

Και εδώ μπορούμε να εντοπίσουμε ξεκάθαρα τις σπασμένες μπάρες. Αν μάλιστα κανονικοποιούσαμε με βάση τα 400Hz που αυτή την στιγμή βρίσκονται στα -22dB θα φαινόταν πιο ξεκάθαρα και απ' ότι στα 150Hz λόγω επιδερμικού φαινομένου σε μεγαλύτερες συχνότητες. Ωστόσο αυτά τα δύο γραφήματα είναι αρκετά συγκρίσιμα, αλλά σε πραγματικές συνθήκες περιμέναμε στα 400Hz πιο ξεκάθαρα αποτελέσματα.

Στην περίπτωση με μισό φορτίο πάλι είναι πολύ ξεκάθαρο το σφάλμα στην περίπτωση της Εξωτερικής Μαγνητικής Ροής Μηδενικής Ακολουθίας. Έχοντας φυσικά μικρότερη ολίσθηση οι αρμονικές $3f_s - 2sf_s$, $3f_s + 2sf_s$, $3f_s - 4sf_s$ και $3f_s + 2sf_s$ πλησιάζουν αρκετά τα 150Hz αλλά παραμένουν αρκετά ευδιάκριτες :



Εικόνα 5.38: Φάσμα Μαγνητικής Ροής Μηδενικής Ακολουθίας με φορτίο 13 Nm (140Hz - 160Hz)

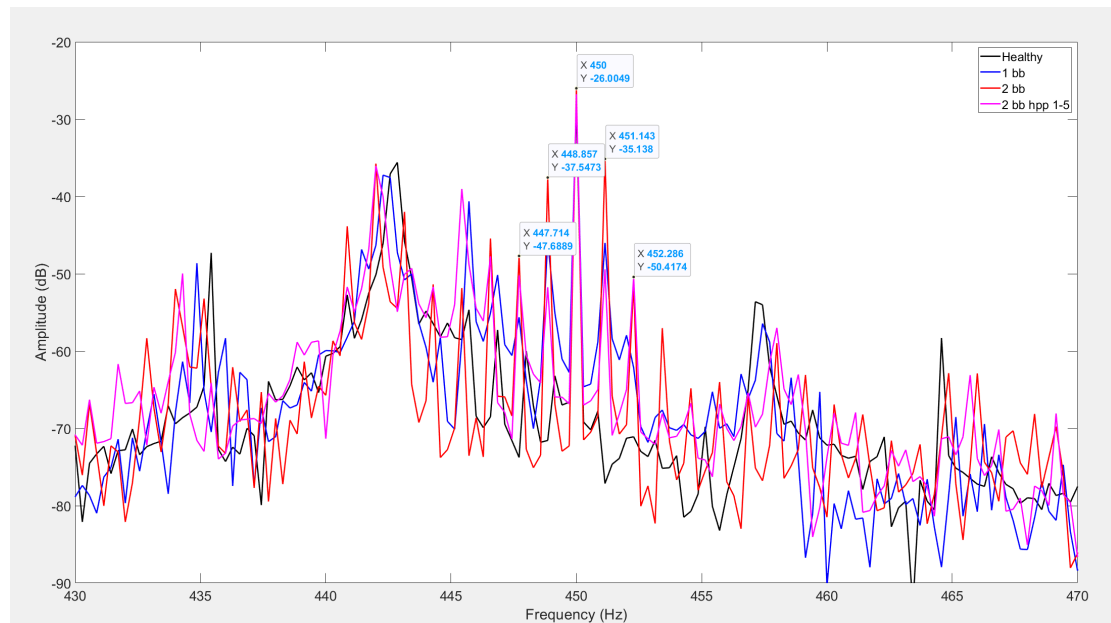


Εικόνα 5.39: Φάσμα Μαγνητικής Ροής Μηδενικής Ακολουθίας με φορτίο 13 Nm (0Hz - 500Hz)

Πίνακας 5.9: Ανάλυση αρμονικού περιεχομένου μηδενικής ακολουθίας ροής στα 13 Nm

Περιπτώσεις Προσομοίωσης	$3f_s - 2sf_s$	$3f_s - 4sf_s$
Healthy	-51.8 dB	-55.9 dB
1 broken bar	-30.2 dB	-35.9 dB
2 broken bars (adj)	-27.5 dB	-17.4 dB
2 broken bars (hpp)	-31.4 dB	-28.4 dB

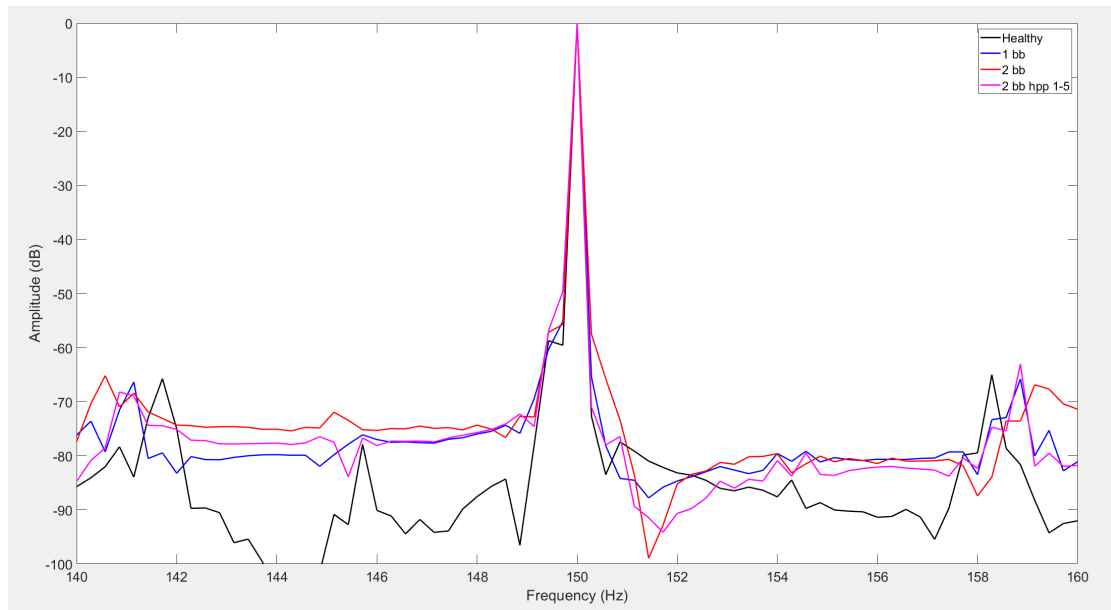
Αν και λιγότερο ευδιάκριτο ξεκάθαρα σε μια μηχανή, μπορούμε μέσω της εξωτερικής μαγνητικής ροής μηδενικής ακολουθίας να διαγνώσουμε σπασμένες μπάρες ακόμα και αν αυτές δεν είναι γειτονικές. Πάμε να δούμε τι παρατηρούμε στα 400Hz σε αυτή την περίπτωση :



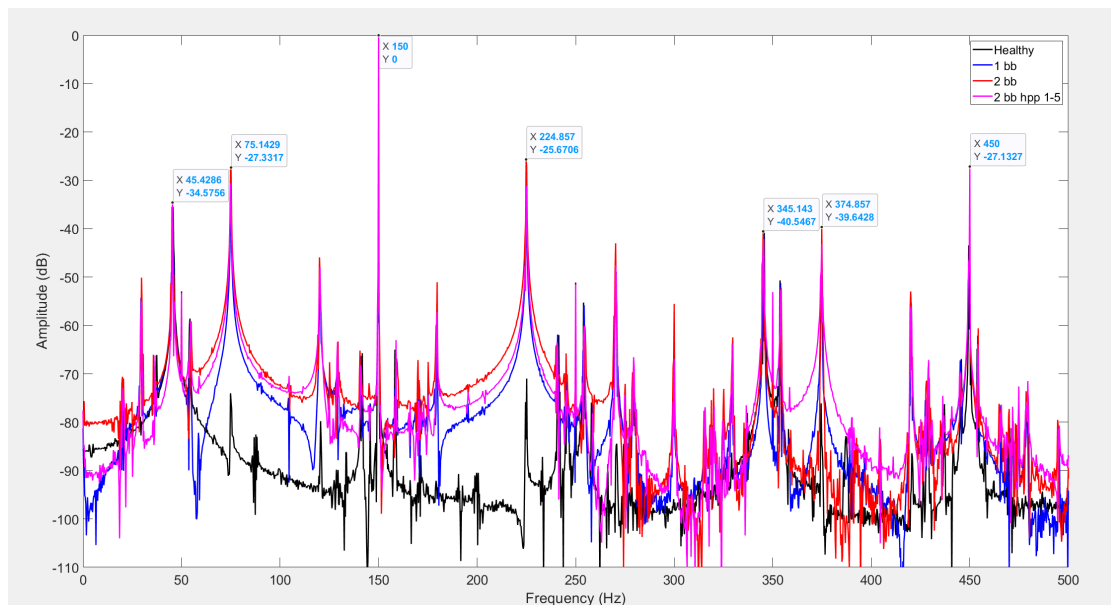
Εικόνα 5.40: Φάσμα Μαγνητικής Ροής Μηδενικής Ακολουθίας με φορτίο 13 Nm (430Hz - 470Hz)

Πάλι έχουμε σχεδόν μισή ολίσθηση άρα τα spikes είναι αρκετά κοντά στην αρμονική των 400 άρα λιγότερο ευδιάκριτα. Και το πλάτος τους παρατηρείται μειωμένο όπως είναι λογικό αφού ο κορεσμός του σιδηρομαγνητικού υλικού είναι μειωμένος λόγω μικρότερου φορτίου. Όλα όσα αναφέραμε περί γεωμετρίας μηχανής και speed ripples ισχύουν και εδώ.

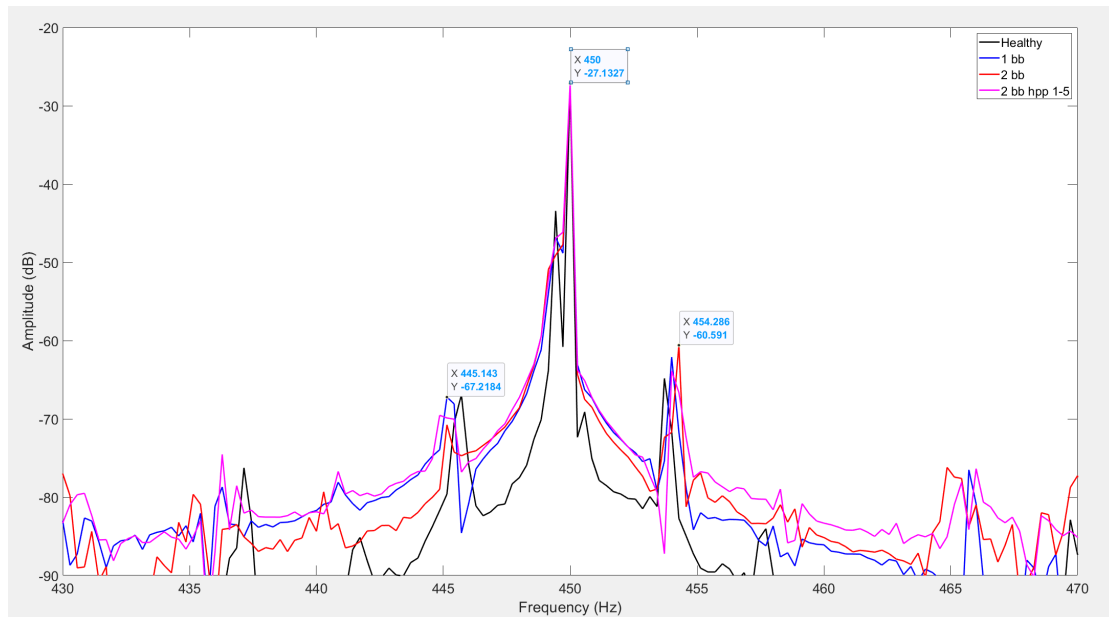
Στην περίπτωση δε μηδενικού φορτίου, ενώ όλες οι αρμονικές είναι ξεκάθαρα υψωμένες σε σχέση με την υγιή κατάσταση, δεν διακρίνεται χρήσιμο αρμονικό περιεχόμενο για τον εντοπισμό των σπασμένων μπαρών.



Εικόνα 5.41: Φάσμα Μαγνητικής Ροής Μηδενικής Ακολουθίας χωρίς φορτίο (1 Nm) (140Hz - 160Hz)



Εικόνα 5.42: Φάσμα Μαγνητικής Ροής Μηδενικής Ακολουθίας χωρίς φορτίο (1 Nm) (0Hz - 500Hz)



Εικόνα 5.43: Φάσμα Μαγνητικής Ροής Μηδενικής Ακολουθίας χωρίς φορτίο (1 Nm)
(430Hz - 470Hz)

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα και Προοπτικές Εξέλιξης

6.1 Συμπεράσματα

Εν κατακλείδι η μέθοδος της Εξωτερικής Μαγνητικής Ροής Μηδενικής Ακολουθίας (Zero-Sequence Flux) προτείνεται από τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης, ως ένα ισχυρό διαγνωστικό εργαλείο για την ανίχνευση βλαβών δρομέα με εστίαση στην περίπτωση σπασμένων μπαρών, χωρίς να οδηγεί σε ψευδώς αρνητικούς διαγνωστικούς ελέγχους. Η συγκεκριμένη μέθοδος υπερέχει στην περίπτωση των σπασμένων μη γειτονικών μπαρών σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους όπως την MCSA και την SFSA, ακόμα και κατά την διάρκεια λειτουργίας μιας μηχανής, χωρίς την ανάγκη για περιττές διακοπές ή δαπανηρές παρεμβάσεις κατά την λειτουργία της. Το πλούσιο φάσμα που προκύπτει από το άθροισμα των σημάτων των αισθητήρων μαγνητικής ροής, που τοποθετούνται συμμετρικά γύρω από το περίβλημα της μηχανής, είναι αρκετό για να δώσει όλες τις κατάλληλες πληροφορίες για σφάλματα που συνδέονται με την μηχανική ταχύτητά της. Αυτή η έρευνα λοιπόν πιστοποιεί την αξιοπιστία και την ευαισθησία αυτής της διαγνωστικής τεχνικής, για την αποφυγή εσφαλμένα αρνητικών διαγνώσεων σφαλμάτων δρομέα σε κάθε εφαρμογή ασύγχρονης τριφασικής μηχανής, συνεπώς και σε βιομηχανικούς επαγωγικούς κινητήρες.

6.2 Μελλοντική Έρευνα

Με βάση τα θεμέλια που θέτει η παρούσα διπλωματική εργασία, η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να χωριστεί σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Πειραματική Μελέτη

Μελλοντικά θα μπορούσαν να εξακριβωθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και η αποτελεσματικότητα της διαγνωστικής μεθόδου Εξωτερικής Μαγνητικής Ροής Μηδενικής Ακολουθίας σε πρακτικό επίπεδο, με έναν πραγματικό κινητήρα. Έτσι θα μπορούσαν να μελετηθούν κατά πόσο επηρεάζουν και άλλοι παράμετροι την αξιοπιστία αυτής της μεθόδου, όπως για παράδειγμα η εκκεντρότητα που είναι αναπόφευκτη σε κάποιο βαθμό σε οποιαδήποτε πραγματική μηχανή.

- Επέκταση Προσομοιώσεων

Η έρευνα θα μπορούσε να συνεχιστεί με περισσότερες προσομοιώσεις σε περισσότερους κινητήρες αλλά και σε 3D μοντέλα που, αν και χρειάζονται πολλαπλάσια επεξεργαστική ισχύ, φέρουν αποτελέσματα ακόμα πιο κοντά στην πραγματικότητα. Μπορεί έτσι να προληφθεί ο κίνδυνος εσφαλμένων αρνητικών διαγνώσεων σε μηχανές που μια απλή βλάβη μπορεί να οδηγήσει σε πολύ καταστροφικά σενάρια.

Εξελίσσοντας αυτή την σύγχρονη διαγνωστική μέθοδο ελπίζουμε στην εξάλειψη εσφαλμένων αρνητικών διαγνώσεων λόγω σφαλμάτων δρομέα, βρίσκοντας μια μόνιμη λύση σε κάθε βιομηχανική εφαρμογή του μέλλοντος.

Βιβλιογραφία

- [1] S. Nandi, H. A. Toliyat, and X. Li. "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors—A Review." In: *IEEE Trans. Ener. Conv.*, Vol. 20, No. 4, pp. 719,729 (2005).
- [2] Konstantinos N. Gyftakis. "A Novel Approach for Broken Bar Fault Diagnosis in Induction Motors Through Torque Monitoring". In: *IEEE Transactions on Energy Conversion* (2013).
- [3] Dionysios V. Spyropoulos. "The Influence of the Broken Bar Fault on the Magnetic Field and Electromagnetic Torque in 3-Phase Induction Motors". In: *XXth International Conference on Electrical Machines* (2012).
- [4] M. Riera-Guasp. "Influence of Nonconsecutive Bar Breakages in Motor Current Signature Analysis for the Diagnosis of Rotor Faults in Induction Motors". In: : *IEEE Transactions on Energy Conversion* (2010).
- [5] D. V. Spyropoulos K. N. Gyftakis E. Palomeno and E. D. Mitronikas. "Detection of Rotor Electrical Faults in Induction Motors during the Start-up via Torque Monitoring". In: : *IEEE IECON* (2019).
- [6] H. D. Haberle G. D. Haberle. "Μετασχηματιστές και Ηλεκτρικές Μηχανές". In: ().
- [7] <https://autospecialist.gr/kinitires-gia-ilektrokinita/>.
- [8] St. J. Chapman. "Ηλεκτρικές Μηχανές DC-AC". In: Εκδόσεις Α. Τζιόλα (2001).
- [9] Α. Σαφάκας. "Ηλεκτρικές Μηχανές Β". In: Πανεπιστήμιο Πατρών (2005).
- [10] <https://gr.pinterest.com/pin/475270566931143712/>.
- [11] W. Nürnberg. "Die Asynchronmaschine". In: *Springer-Verlay* (1963).
- [12] <https://www.mangoengineer.in/2024/02/squirrel-cage-induction-motor.html?m=1>.
- [13] <https://www.indiamart.com/proddetail/wound-rotor-induction-motor-2852937961248.html?mTd=1>.
- [14] Κωνσταντίνος Γυφτάκης. "Ηλεκτρομαγνητική ανάλυση σφαλμάτων σε επαγωγικούς κινητήρες και ανάπτυξη νέων μεθόδων διάγνωσης αυτών". In: (2015).
- [15] <https://www.lesics.com/slip-ring-induction-motor-how-it-works.html>.
- [16] <https://slideplayer.gr/slide/11987150/>.
- [17] <https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/index.php?course=HMMY339openDir=/631f69bbnxPt>.
- [18] "Κωνσταντίνος Ν. Γυφτάκης, Δημιουργία Παραμετροποιημένου Μοντέλου Πεπερασμένων Στοιχείων και Εύρεση Επίδρασης Σχήματος Αυλακώσεων στη Συμπεριφορά Ασύγχρονης Μηχανής, Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας". In: ().

- [19] kamalkant. "Torque Slip Characteristics of Three Phase Induction Motor." In: *Mango Engineer* ().
- [20] http://eclass.opencourses.teicm.gr/eclass/modules/document/file.php/TMA112/mix_hm08EPAGWGIKOI
- [21] Electrical Technology. "What Is the Equivalent Circuit of Induction Motor". In: *Electrical Technology* (2022).
- [22] TEI Πειραιά. "Τριφασικοί Ασύγχρονοι Επαγωγικοί Κινητήρες". In: Τμήμα Ηλεκτρολογίας (2007).
- [23] <https://www.electricaltechnology.org/2022/07/power-stages-losses-induction-motor.html>.
- [24] Σ. Βασιλακόπουλος. "Ηλεκτρικές Μηχανές". In: Τδρυμα Ευγενίδου (2002).
- [25] Παναγιώτου Παναγιώτης. "ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΣΦΗΝΩΝ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΡΙΦΑΣΙΚΗΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ". In: Πανεπιστήμιο Πατρών (2013).
- [26] <https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/index.php?course=HMMY324openDir=/63792e4cEXzc>.
- [27] <https://freader.ekt.gr/eadd/index.php?doc=43373p=43>.
- [28] https://www.researchgate.net/figure/What-Is-Finite-Element-Analysis-Source-MathWorks_fig138099654
- [29] https://www.researchgate.net/figure/D-finite-element-model-for-the-studied-induction-motor_fig3323906
- [30] P. Giangrande C. Sciascera M. Galea and C. Gerada. ""Lifetime consumption and degradation analysis of the winding insulation of electrical machines". In: *8th IET PEMD, Glasgow, UK* (2016).
- [31] <https://www.powerblanket.com/blog/electric-motor-cooling-solutions-powerblanket-ice/>.
- [32] T. W. Dakin. ""Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon". In: *American Institute of Electrical Engineer* (1948).
- [33] <https://en.wikipedia.org/wiki/Paschen%27sLaw>.
- [34] <https://www.ecmweb.com/maintenance-repair-operations/motors/article/20904031/the-value-of-partial-discharge-detection>.
- [35] <https://powerelectronical.com/blog-post-title-26/>.
- [36] <https://nems.com.au/why-bearings-fail-in-electric-motors/>.
- [37] <https://nems.com.au/why-bearings-fail-in-electric-motors/>.
- [38] J. Yun and S. B. Lee. "Influence of Aluminium Die-Cast Rotor Porosity on the Efficiency of Induction Machines". In: *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 54, No. 11 (2018).
- [39] <https://www.eclass.tuc.gr/modules/document/file.php/HMMY324/>.
- [40] X. Li S. Nandi H. A. Toliyat. ""Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors—A Review". In: *IEEE Trans. Ener. Conv.* (2005).

- [41] <https://www.linkedin.com/pulse/what-can-cause-generator-shaft-break-bruce-miller>.
- [42] T. G. Habetler P. Zhang Y. Du and B. Lu. "A Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium-Voltage Induction Motors". In: *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 47, No. 1, pp. 34-46 (2011).
- [43] P. J. Tavner. "Review of condition monitoring of rotating electrical machines". In: *IET Elec. Pow. Appl.*, Vol. 2, No.4, pp. 215-247 (2008).
- [44] C. Yang. "Reliable Detection of Induction Motor Rotor Faults Under the Rotor Axial Air Duct Influence". In: *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 50, No.4, pp. 2493-2502 (2014).
- [45] <https://www.plantservices.com/equipment/industrial-motors/article/11289485/testing-and-diagnostic-solutions-for-industrial-motor-health>.
- [46] <https://noria.mx/wp-content/uploads/2019/10/Curso-Gestion-del-Programa-de-Lubricacion.pdf>.
- [47] W. Thomson and M. Fenger. "Current signature analysis to detect induction motor faults". In: *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 26-34 (2001).
- [48] <https://www.rokadegroup.com/motor-current-signature-analysis.php>.
- [49] S. Jagers. "Motor current signature analysis (mcsa) and condition monitoring". In: (2019).
- [50] K. N. Gyftakis G. A. Skarmoutsos and M. Mueller. "Analytical prediction of the mcsa signatures under dynamic eccentricity in pm machines with concentrated non-overlapping windings". In: *Energy Conversion*, vol. 37, no. 2, pp. 1011-1019 (2022).
- [51] Remus Pusca Andrian Ceban and Raphaël Romar. "Study of Rotor Faults in Induction Motors Using External Magnetic Field Analysis". In: *IEEE Transactions on industrial electronics* 59.5 (2011).
- [52] Park Yang Kim Lee Gyftakis Panagiotou Hedayati Kia and Capolino. "Stray Flux Monitoring for Reliable Detection of Rotor Faults under the Influence of Rotor Axial Air Ducts". In: (2019).
- [53] <https://www.mdpi.com/1099-4300/26/9/744>.
- [54] P. A. Panagiotou K. N. Gyftakis and S. B. Lee. "The Role of the Mechanical Speed Frequency on the Induction Motor Fault Detection via the Stray Flux". In: *IEEE SDEMPED* (2019).
- [55] K. Gyftakis Palomeno Spyropoulos and Mitronikas. "Detection of Rotor Electrical Faults in Induction Motors during the Startup via Torque Monitoring". In: (2019).
- [56] D. PATRANABI. "SENSORS AND TRANSDUCERS". In: *PHI Learning* (2003).

- [57] Tushar G. Vilhekar Makarand S. Ballal and Hiralal M. Suryawanshi. "Application of Multiple Parks Vector Approach for Detection of Multiple Faults in Induction Motors". In: (2017).
- [58] <https://images.app.goo.gl/FTAJSR1AsFtC9UaMA>.
- [59] Konstantinos N. Gyftakis and Joya C. Kappatou. "The Zero-Sequence Current as a Generalized Diagnostic Mean in Δ -Connected Three-Phase Induction Motors". In: *IEEE Transactions on Energy Conversion* 29.1 (2014).
- [60] https://www.researchgate.net/figure/Spectrogram-of-the-stator-current-computed-with-the-proposed-Slepian-window-optimized_fig14_322401192.
- [61] "Aderiano M. da Silva, B.S. , INDUCTION MOTOR FAULT DIAGNOSTIC AND MONITORING METHODS , 2006". In: ().
- [62] "K.Gyftakis, P.Panagiotou, E.Palomeno, SangBinLee, Introduction of the Zero-Sequence Stray Flux as a Reliable Diagnostic Method of Rotor Electrical Faults in Induction Motors, 2019". In: ().
- [63] I. Boldea and S.A. Nasar. "The Induction Machines design handbook". In: *2nd Edition by Taylor and Francis Group* (2010).
- [64] S. B. Lee Y. Park H. Choi and K. Gyftakis. "Flux-based Detection of Non-adjacent Rotor Bar Damage in Squirrel Cage Induction Motors". In: *IEEE ECCE* (2019).
- [65] Khalid Imtiaz Saad Galina Mirzaeva and Mohsen Ghaffarpour Jahromi. "Comprehensive Diagnostics of Induction Motor Faults Based on Measurement of Space and Time Dependencies of Air Gap Flux". In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 53.3 (2017).