



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών

και Μηχανικών Υπολογιστών

## Παρακολούθηση Κατάστασης και Διάγνωση Σφαλμάτων Επαγωγικών Κινητήρων Κλωβού της Τάξεως των MW

### **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΖΥΓΟΥΡΗ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΜΑΡΙΟΥ**

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΓΥΦΤΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΠΕΠΠΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΚΟΥΤΡΟΥΛΗΣ ΕΥΤΥΧΙΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

*Δευτέρα, 23 Ιουνίου 2025*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι επαγωγικοί κινητήρες αποτελούν τον πλέον διαδεδομένο τύπο κινητήρα που χρησιμοποιείται σε βιομηχανικές εφαρμογές, λόγω της απλότητας κατασκευής, της αξιοπιστίας και του χαμηλού κόστους συντήρησης. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους, ενδέχεται να εμφανιστούν σφάλματα που, εάν δεν διαγνωστούν εγκαίρως, μπορούν να οδηγήσουν σε σοβαρές βλάβες ή ακόμη και στην πλήρη καταστροφή του κινητήρα. Η ανάγκη για έγκαιρη και ακριβή ανίχνευση των σφαλμάτων ενός κινητήρα έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτενούς έρευνας, οδηγώντας στην ανάπτυξη διαγνωστικών μεθόδων που στοχεύουν στην αξιόπιστη αναγνώριση τους.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την επίδραση του σφάλματος βραχυκυκλωμένων σπειρών στο αρμονικό περιεχόμενο του ρεύματος, της μαγνητικής ροής και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής ενός επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού 1.14 MW, ενώ ερευνά την ικανότητα γνωστών διαγνωστικών μεθόδων να εντοπίσουν έγκαιρα το εν λόγω σφάλμα. Αρχικά παρατέθηκε το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά την δομή και την αρχή λειτουργίας ενός επαγωγικού κινητήρα κλωβού. Επίσης αναλύθηκαν οι αιτίες εμφάνισης σφαλμάτων και ο αντίκτυπός τους στην υγεία των επαγωγικών κινητήρων εστιάζοντας στο εν λόγω τύπο σφάλματος. Ακολούθως περιεγράφηκε αναλυτικά η διαδικασία εφαρμογής των διαγνωστικών μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν βήμα προς βήμα. Έγινε επίσης η εισαγωγή στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων(FEA) και η συνεισφορά της στην μοντελοποίηση ηλεκτρικών μηχανών καθώς το λογισμικό SimCenter Magnet, το οποίο επιλέχθηκε για τον σχεδιασμό και την προσομοίωση του κινητήρα που μελετάται, βασίζεται σε αυτήν την μέθοδο. Αφού εξηγήθηκε λεπτομερώς η διαδικασία σχεδιασμού του κινητήρα, παρουσιάστηκε ο τρόπος υλοποίησης του σφάλματος των βραχυκυκλωμένων σπειρών. Η προσομοίωση του κινητήρα διακρίνεται σε ονομαστικό και μισό του ονομαστικού φορτίου, για εσφαλμένη και υγιή περίπτωση.

Μετά το πέρας των προσομοιώσεων ακολουθεί η ηλεκτρομαγνητική ανάλυση του κινητήρα για κάθε περίπτωση. Έπειτα τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων εισήχθησαν στο εργαλείο της MATLAB, με τη βοήθεια του οποίου έγινε η

κατάλληλη επεξεργασία σήματος που απαιτεί η κάθε διαγνωστική μέθοδος. Στη συνέχεια αναδείχθηκαν τα αποτελέσματα της κάθε μεθόδου και σχολιάστηκαν με βάση την διαγνωστική τους ικανότητα. Τέλος αξιολογήθηκαν με βάση την αξιοπιστία τους και την ευαισθησία στο να ανιχνεύουν το σφάλμα που επιλέχθηκε να ερευνηθεί.

## **ABSTRACT**

Induction motors represent the most widely used type of motors in industrial applications, owing to their simple construction, high reliability, and low maintenance cost. Nevertheless, during their operation, faults may occur which, if not detected in time, can lead to severe damage or even complete failure of the motor. The need for timely and accurate fault detection has been the subject of extensive research, leading to the development of diagnostic methods aimed at reliably identifying such faults.

This thesis investigates the impact of shorted-turn faults on the harmonic content of the current, magnetic flux, and electromagnetic torque in a 1.14 MW squirrel-cage induction motor. In parallel, it explores the ability of well-known diagnostic methods to detect this specific fault in a timely manner. The study begins with a presentation of the necessary theoretical background concerning the structure and operating principle of squirrel-cage induction motors.

Furthermore, the causes of faults and their impact on motor health are analyzed, with a focus on the selected type of fault.

Subsequently, the implementation procedure of the diagnostic techniques employed is described in detail, step by step. An introduction to the Finite Element Analysis (FEA) method is also provided, highlighting its contribution to the modeling of electrical machines, since the SimCenter Magnet software used for the design and simulation of the motor under study is based on this method. Following the detailed explanation of the motor design process, the approach for implementing the short-turn fault is presented. The motor is simulated under both nominal and half-load conditions, in both faulty and healthy scenarios.

After the simulation phase, an electromagnetic analysis of the motor is performed for each case. The simulation results are then imported into MATLAB, where appropriate signal processing is carried out according to the requirements of each diagnostic method. The outcomes of each technique are presented and discussed in terms of their diagnostic performance. Finally, the methods are evaluated based on their reliability and sensitivity in detecting the selected fault.

## Ευχαριστίες

Ευχαριστώ την οικογένεια μου, την σύντροφό μου Αγγελική και τους φίλους μου που με στήριξαν για την πραγματοποίηση αυτής της διπλωματικής. Εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου στον υποψήφιο διδακτορικό κ. Μάριο Σαλίνα για τις συμβουλές που μου έδωσε και την καθοδήγησή του. Τέλος ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Γυφτάκη και τους καθηγητές της εξεταστικής επιτροπής για την συνεργασία μας.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή στους ασύγχρονους κινητήρες .....	1
1.1 Η Κατασκευαστική Δομή Ασύγχρονου Κινητήρα[46] .....	1
1.1.1 Ο Στάτης σε Επαγωγικούς Κινητήρες .....	1
Πυρήνας Στάτη .....	1
Τυλίγματα Στάτη .....	1
1.1.2 Δρομέας Επαγωγικού Κινητήρα .....	2
Δακτυλιοφόρος δρομέας .....	2
Δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού.....	3
Γεωμετρία Αυλακιών Δρομέα.....	4
Χαρακτηριστικά Κλάσεων [6].....	5
Πυρήνας του δρομέα .....	6
1.1.3 Άξονας και Έδρανα Κινητήρα (ρουλεμάν) .....	7
1.2 Αρχή Λειτουργίας Επαγωγικού Κινητήρα[47] .....	8
Ολίσθηση.....	9
1.3 Ισοδύναμο Κύκλωμα του Επαγωγικού Κινητήρα .....	10
Ροή Ισχύος .....	11
1.4 Ροπή Επαγωγικού Κινητήρα .....	11
Επίδραση Αντίστασης Δρομέα στην Ροπή του Επαγωγικού Κινητήρα .....	12
2. Κεφάλαιο 2. Εισαγωγή στα Σφάλματα Επαγωγικών Κινητήρων.....	15
2.1 Αιτίες Εμφάνισης Σφαλμάτων.....	15
2.1.1 Κατασκευαστικές ατέλειες .....	15
2.1.2 Γήρανση και φθορά μηχανισμών.....	17
Φθορά δρομέα.....	17
Φθορά μόνωσης στάτη [25].....	18
Γήρανση εδράνων .....	19
2.1.3 Ανθρώπινος Παράγοντας.....	19
2.2 Τα Είδη Σφαλμάτων σε Επαγωγικούς Κινητήρες .....	19
Τα Σφάλματα Στάτη.....	20

3.	Κεφάλαιο 3. Διάγνωση Βραχυκυκλωμένων Σπειρών Στάτη σε Επαγωγικούς Κινητήρες ..	22
3.1	MCSA.....	23
3.1.1	Συχνότητες που εμφανίζονται Υπογραφές Σφάλματος Στάτη στην Μόνιμη κατάσταση.....	24
3.2	Παρακολούθηση Μαγνητικής Ροής.....	25
3.2.1	Υπογραφές Σφάλματος Στάτη με SFA[36].....	27
3.3	Park's Vector Approach.....	27
3.4	Extended Park's Vector Approach.....	28
3.6	Παρακολούθηση Ροπής .....	29
4.	Κεφάλαιο 4. Η Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων .....	31
4.1	FEA και Μέθοδοι Αποσφαλμάτωσης Κινητήρων .....	32
4.2	Οι εξισώσεις που επιλύονται στο λογισμικό SimCenter Magnet[2] ,[3] .....	32
4.3	Επίλυση Μαγνητοστατικών και Αρμονικών Προβλημάτων [4].....	35
4.4	Υλοποίηση της FEA μέσω του λογισμικού SimCenter Magnet[3].....	37
5.	Κεφάλαιο 5. Μοντελοποίηση του Κινητήρα .....	39
5.1	Γεωμετρία του Κινητήρα .....	39
5.1.1	Εξωτερικό στρώμα αέρα (air-box) .....	39
5.1.2	Εσωτερικοί Διάμετροι και Διάκενο .....	39
5.1.3	Αύλακες Στάτη.....	40
5.1.4	Μπάρες Δρομέα .....	40
5.1.5	Σπείρες Στάτη.....	41
5.1.6	Διάκενο .....	42
5.2	Δημιουργία Components .....	45
5.2.1	Component Στάτη.....	45
5.2.2	Component Μπάρες Δρομέα και Σπείρες Στάτη .....	45
5.2.3	Component Άξονα και Εξωτερικού Πεδίου Αέρα (Airbox).....	46
5.2.4	Component Διάκενο Αέρα και Μόνωση στάτη .....	46
5.2.5	Component Κίνησης .....	46
5.3	Δημιουργία ηλεκτρικών σπειρών(coils).....	47
5.3.1	Περιέλιξη του Στάτη .....	47
5.3.2	Σπείρες Μπαρών Δρομέα.....	49
5.4	Ηλεκτρικό Κύκλωμα.....	50

5.5 Τοποθέτηση αισθητήρων μαγνητικής ροής .....	52
6. Κεφάλαιο 6. Μοντελοποίηση Σφάλματος Στάτη σε Επαγωγικό Κινητήρα και Ηλεκτρομαγνητική του Ανάλυση .....	54
6.1 Μοντελοποίηση Σφάλματος Στάτη.....	54
6.2 Ηλεκτρομαγνητική Ανάλυση και Αποτελέσματα Προσομοίωσης.....	57
6.2.1 Κατανομή Μαγνητικής Ροής και Πυκνότητας Ρεύματος στα 11kNm.....	58
7. Κεφάλαιο 7. Εξαγωγή Αποτελεσμάτων για την κάθε Διαγνωστική Μέθοδο. ....	67
7.1 Παρακολούθηση Ρεύματος Στάτη και MCSA.....	67
7.1.1 Σήματα Ρευμάτων Στάτη στον Χρόνο.....	67
Επίδραση Φορτίου στην MCSA.....	81
7.2 Παρακολούθηση Stray Flux στην Μόνιμη Κατάσταση.....	82
7.2.1 Εξαγωγή Σήματος Μαγνητικής Ροής από Μόνιμη Κατάσταση .....	82
7.2.2 Φάσμα Μαγνητικής Ροής στην Μόνιμη Κατάσταση .....	84
7.2.3 Συμπέρασμα για την μέθοδο της Παρακολούθησης της Μαγνητικής Ροής .....	89
7.3 Εφαρμογή Park's Vector Approach .....	90
7.4 Εφαρμογή Extended Park's Vector Approach .....	94
7.5 Παρακολούθηση Ροπής ως Διαγνωστική Μέθοδος.....	98
7.5.1 Εξαγωγή Σημάτων Ηλεκτρομαγνητικής Ροπής στον Χρόνο .....	98
7.5.3 Εξαγωγή Φάσματος Ηλεκτρομαγνητικής Ροπής στο Πεδίο της Συχνότητας .....	100
8. Κεφάλαιο 8. Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα .....	103
8.1 Συμπεράσματα .....	103
8.2 Μελλοντική Έρευνα .....	104
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	105



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Figure 1.1 Βραχυκυκλωμένες Μπάρες του δρομέα και ο πυρήνας του δρομέα.[11] .....	3
Figure 1.2 Στάτης και Δρομέας Βραχυκυκλωμένου κλωβού.[40] .....	4
Figure 1.3 Κλάσεις γεωμετρία κινητήρα σύμφωνα με την NEMA.[10] .....	4
Figure 1.4 Πίνακας ροπών για κάθε κλάση σύμφωνα με τη NEMA.[7] .....	6
Figure 1.5 Ελασματοποιημένος πυρήνας δρομέα.[13] .....	7
Figure 1.6 Επαγωγικός Κινητήρας και τα εξαρτήματά του.[41] .....	8
Figure 1.7 Τα στρεφόμενα μαγνητικά πεδία εντός της μηχανής.[14] .....	10
Figure 1.8 Το ισοδύναμο κύκλωμα σε μια φάση ενός επαγωγικού κινητήρα.[15] .....	10
Figure 1.9 Ροή ισχύος του κινητήρα.[16] .....	11
Figure 1.10 Χαρακτηριστική Ροπής Στροφών.[17] .....	12
Figure 1.11 Ισοδύναμο κατά Thevenin.[18] .....	13
Figure 1.12 Η επίδραση αντίστασης δρομέα στην ροπή στροφών.[17] .....	14
Figure 2.1 Επιπτώσεις πορότητας στο ένα μέρος του κλωβού [22] και Επιπτώσεις πορότητας στις μπάρες του δρομέα.[22] .....	16
Figure 2.2 Γεωμετρία κινητήρα με στατική εκκεντρότητα.[24] .....	17
Figure 2.3 Κατηγορίες Σφαλμάτων σε Επαγωγικούς Κινητήρες.[26] .....	20
Figure 2.4 Βραχυκυκλωμένες Σπείρες σε μια φάση του Στάτη.[30] .....	21
Figure 2.5 Προσέγγιση Βραχυκυκλωμένων Σπειρών [29]. .....	21
Figure 3.1 Διαδικασία διάγνωσης σφαλμάτων ηλεκτρικών μηχανών.[45] .....	22
Figure 3.2 Εφαρμογή MCSA στην μόνιμη κατάσταση ενός κινητήρα.[43] .....	24
Figure 3.3 Τοποθέτηση αισθητήρων για SFA. [34] .....	26
Figure 3.4 Αισθητήρες για AGFA.[35] .....	26
Figure 3.5 Park 's Vector approach. Αριστερά υγιή κατάσταση δεξιά με σφάλμα βραχυκυκλωμένης σπείρας.[37]. .....	28
Figure 3.6 Προσέγγιση Extended Park Vector.[38]. .....	29
Figure 3.7 Testbench για παρακολούθηση ροπής. ....	30
Figure 5.1 Γεωμετρία Αύλακα Στάτη. ....	40
Figure 5.2 Γεωμετρία Μπάρα Δρομέα. ....	41
Figure 5.3 Γεωμετρία Σπειρών Στάτη. ....	41
Figure 5.4 Το πρώτο και κινούμενο μέρος του διακένου. ....	42
Figure 5.5 Το ενδιάμεσο μέρος του διακένου. ....	43
Figure 5.6 Το τρίτο και τελευταίο μέρος του διακένου μαζί με την μόνωση στάτη. ....	44
Figure 5.7 Τελική Γεωμετρία Μοντέλου. ....	45
Figure 5.8 Τα properties για την μάζα του δρομέα. ....	46
Figure 5.9 Το φορτίο που συμπλέχθηκε με βάση τον χρόνο. ....	47
Figure 5.10 Ο διαχωρισμός των coils σε χρώματα. ....	48
Figure 5.11 Τα properties μιας σπείρας του στάτη. ....	49
Figure 5.12 Properties για ένα Coil μιας μπάρας δρομέα. ....	49
Figure 5.13 Τελική διανομή σπειρών στάτη και μπαρών δρομέα. ....	50

Figure 5.14 Ηλεκτρικό κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα στο simulation.....	50
Figure 5.15 Properties μιας πηγής τάσης στο ηλεκτρικό κύκλωμα.....	51
Figure 5.16 Κύκλωμα αισθητήρων μαγνητικής ροής.....	52
Figure 5.17 Τελικό μοντέλο επαγωγικού κινητήρα.....	53
Figure 5.18 Πλέγμα(mesh) του μοντέλου που σχεδιάστηκε.....	53
Figure 6.1 Σπείρα που επιλέχθηκε για μοντελοποίηση σφάλματος.....	55
Figure 6.2 Properties μιας βραχυκυκλωμένης σπείρας.....	56
Figure 6.3 Properties της υπόλοιπης βραχυκυκλωμένης σπείρας.....	56
Figure 6.4 Η προσέγγιση του ηλεκτρικού κυκλώματος για μια βραχυκυκλωμένη σπείρα με σφάλμα βραχυκύκλωσης τα 0.2 Ohm.....	57
Figure 6.5 Κατανομή Μαγνητικής Ροής στην Μόνιμη Κατάσταση του Κινητήρα με 11 kNm Φορτίο σε υγιή Κατάσταση.....	59
Figure 6.6 Κατανομή Μαγνητικής Ροής στην Εκκίνηση του Κινητήρα με 11 kNm Φορτίο σε υγιή Κατάσταση.....	60
Figure 6.7 Πυκνότητα Ρεύματος στην Εκκίνηση Επαγωγικού Κινητήρα με Φορτίο 11 kNm σε υγιή Κατάσταση.....	61
Figure 6.8 Κατανομή Μαγνητικής Ροής στην Μόνιμη Κατάσταση του Κινητήρα με 11kNm Φορτίο σε εσφαλμένη Κατάσταση.....	62
Figure 6.9 Κατανομή Μαγνητικής Ροής στην Εκκίνηση του Κινητήρα με 11 kNm Φορτίο σε Εσφαλμένη Κατάσταση.....	63
Figure 6.10 Πυκνότητα Ρεύματος στην Εκκίνηση Επαγωγικού Κινητήρα με Φορτίο 11 kNm σε εσφαλμένη Κατάσταση.....	64
Figure 6.11 Κατανομή Μαγνητικής Ροής στην σπείρα που θα βραχυκυκλωθεί σε υγιή Κατάσταση με 11 kNm Φορτίο.....	65
Figure 6.12 Κατανομή Μαγνητικής Ροής στην Βραχυκυκλωμένη Σπείρα με 11 kNm Φορτίο.....	66
Figure 7.1 Ρεύμα Στάτη Φάσης Α πάνω με φορτίο 11kNm, κάτω με φορτίο 5.5 kNm.....	68
Figure 7.2 MCSA υπό Ονομαστικό Φορτίο 11 kNm.....	70
Figure 7.3 MCSA υπό Φορτίο 5.5 kNm.....	71
Figure 7.4 MCSA Εστιασμένο στις PSH -11 kNm.....	73
Figure 7.5 MCSA Εστιασμένο στις PSH -5.5 kNm.....	73
Figure 7.6 Φάσμα Ρεύματος σε υψηλές συχνότητες -11kNm.....	77
Figure 7.7 Φάσμα Ρεύματος σε υψηλές συχνότητες -5.5kNm.....	78
Figure 7.8 Θέση αισθητήρων σε σχέση με την βραχυκυκλωμένη σπείρα.....	82
Figure 7.11 Φάσμα Μαγνητικής Ροής-11kNm.....	85
Figure 7.12 Φάσμα Μαγνητικής Ροής-5.5kNm.....	85
Figure 7.13 Συχνότητες εμφάνισης PSH από την Stay Flux -11kNm.....	86
Figure 7.14 Συχνότητες εμφάνισης PSH από την Stay Flux -5.5 kNm.....	87
Figure 7.15 Park's Vector Approach- 11kNm.....	91
Figure 7.16 Park's Vector Approach- 5.5kNm.....	91

Figure 7.17 Μετατόπιση Κέντρων Ανά Περίπτωση-11kNm.....	93
Figure 7.18 Μετατόπιση Κέντρων Ανά Περίπτωση-5.5kNm.....	93
Figure 7.19 Φάσμα EPVA-11kNm.....	94
Figure 7.20 Φάσμα EPVA-5.5kNm.....	95
Figure 7.21 Συχνότητες εμφάνισης PSH στο EPVA-11kNm.....	95
Figure 7.22 Συχνότητες εμφάνισης PSH στο EPVA-5.5kNm.....	96
Figure 7.23 Σήμα Ροπής στον χρόνο - 11kNm.....	99
Figure 7.24 Σήμα Ροπής στον χρόνο - 5.5kNm.....	99
Figure 7.25 Φάσμα Ηλεκτρομαγνητικής Ροπής υπό Ονομαστικό Φορτίο .....	100
Figure 7.26 Φάσμα Ηλεκτρομαγνητικής Ροπής υπό Ονομαστικό Φορτίο 0-100 Hz-11kNm .....	101
Figure 7.27 Φάσμα Ηλεκτρομαγνητικής Ροπής υπό 5.5 kNm Φορτίο .....	101
Figure 7.28 Φάσμα Ηλεκτρομαγνητικής Ροπής 0-100 Hz-5.5kNm.....	102

## ΠΙΝΑΚΕΣ

Table 5.1 Χαρακτηριστικά του Υπό Μελέτη Επαγωγικού Κινητήρα.....	39
Table 6.1 Πίνακας με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για 11kNm.....	58
Table 6.2 Πίνακας με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για 5.5kNm.....	58
Table 7.1 Πλάτη Τρίτης Αρμονικής ανά Περιπτώσεις .....	72
Table 7.2 Πλάτος PSH υπό ονομαστικό φορτίο .....	74
Table 7.3 Πλάτος PSH υπό φορτίο 5.5 kNm.....	76
Table 7.4 Πλάτη Αρμονικών στις συχνότητες 2000-2500 Hz υπό Ονομαστικό Φορτίο .....	79
Table 7.5 Πλάτη Αρμονικών στις συχνότητες 2000-2500 Hz υπό Φορτίο 5.5 kNm.....	80
Table 7.6 Συμπεριφορά 9ης Αρμονικής από την Stay Flux.....	86
Table 7.7 Μεταβολή Πλάτους PSH από την Stay Flux -11kNm.....	87
Table 7.8 Μεταβολή Πλάτους PSH από την Stay Flux-5.5kNm.....	88
Table 7.9 Άγνωστες Αρμονικές που παρουσιάζουν αύξηση-5.5kNm.....	89
Table 7.10 Πλάτη Αρμονικών PSH από το φάσμα της EPVA-11kNm.....	96
Table 7.11 Πλάτη Αρμονικών PSH από το φάσμα της EPVA-5.5kNm.....	97

## Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή στους ασύγχρονους κινητήρες

Οι ασύγχρονοι ή επαγωγικοί κινητήρες αποτελούν το πιο διαδεδομένο είδος κινητήρα στην βιομηχανία. Κάποιοι από τους λόγους της επικράτησης των επαγωγικών κινητήρων στην βιομηχανία είναι ο απλός σχεδιασμός και λειτουργία τους, οι χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης καθώς και το ευρύ φάσμα ισχύος που αποδίδουν (από W έως MW).

Μερικές από τις εφαρμογές επαγωγικών κινητήρων στην βιομηχανία :

- Μηχανήματα Μεταφοράς Υλικών (Μετακομιστές)
- Μηχανήματα Ρευστομηχανικής (Αναρροφητήρες/Φυσητήρες, Ανεμιστήρες, Συμπιεστές)
- Μηχανήματα Κατεργασίας Υλικών (Σπαστήρες, Πρέσες, Ψαλίδια)
- Μηχανήματα Εκσκαφής και Τρυπήματος (Εκσκαφείς, Τρυπάνια)

### 1.1 Η Κατασκευαστική Δομή Ασύγχρονου Κινητήρα[46]

Οι επαγωγικοί κινητήρες αποτελούνται από δύο μέρη : τον στάτη και τον δρομέα. Το κενό ανάμεσα τους αποτελεί το διάκενο του κινητήρα.

#### 1.1.1 Ο Στάτης σε Επαγωγικούς Κινητήρες

Ο στάτης είναι το ακίνητο μέρος της μηχανής και υπεύθυνο για την παραγωγή στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Αποτελείται από τον πυρήνα του, με αυλακώσεις, τριφασικό τύλιγμα και εξωτερικά περικλείεται από ατσάλινο περίβλημα. Όταν το τύλιγμα τροφοδοτείται από ένα τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα παράγεται περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο.

#### Πυρήνας Στάτη

Ο πυρήνας του στάτη είναι κατασκευασμένος από φερρομαγνητικό υλικό, με την τιμή της μαγνητικής του διαπερατότητας να είναι ανάμεσα στα 100 έως τα 10000, και περιέχει αυλακώσεις μέσα στις οποίες τοποθετείται και στερεώνεται το τριφασικό τύλιγμα.

#### Τυλίγματα Στάτη

Τα τυλίγματα του στάτη σε έναν τριφασικό κινητήρα είναι τρία και τοποθετούνται στον χώρο με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν 120 μοίρες ηλεκτρική διαφορά φάσης στον χώρο και να δημιουργούν έναν αριθμό ζευγών πόλων ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της μηχανής. Τα τρία τυλίγματα του στάτη λαμβάνουν τάση από μια συμμετρική τριφασική πηγή. Συνεπώς, οι φασικές τάσεις διαφέρουν μεταξύ τους κατά  $120^\circ$  σε φάση κατά τη διάρκεια του χρόνου. Η παρακάτω σχέση εκφράζει την σχέση της ηλεκτρικής γωνίας με τον αριθμό των πόλων της μηχανής :

$$\theta_{el} = p \cdot \theta_{mech} \quad (1.1)$$

Ένα τύλιγμα αποτελείται από αγωγούς που έχουν τοποθετηθεί στα αυλάκια του πυρήνα του στάτη και συνδέονται είτε σε σειρά είτε παράλληλα. Αγωγοί συνδεδεμένοι σε σειρά αποτελούν ένα έλιγμα. Πολλαπλά ελίγματα συνδεδεμένα σε σειρά αποτελούν μια σπείρα με δύο άκρα.

Για μηχανές χαμηλής τάσης (χαμηλότερης του 1 kV) υιοθετείται η μέθοδος της συρματοπεριέλιξης. Η συρματοπεριέλιξη αποτελείται από επισμαλτωμένα στρογγυλά σύρματα μικρής διατομής. Η διάμετρος του σύρματος είναι συνήθως μικρότερη από 2,5 mm. Όταν απαιτούνται μεγαλύτερες διατομές, ο αγωγός σχηματίζεται από περισσότερα παράλληλα σύρματα. Η κατασκευή των ομάδων των σπειρών μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε χειροκίνητα είτε με τη χρήση ηλεκτροκίνητων σπειρομηχανών, οι οποίες λειτουργούν πάνω σε κατάλληλες φόρμες. Σε τυποποιημένες μηχανές με μεγάλη παραγωγή, η τοποθέτηση της μόνωσης και των σπειρών γίνεται με τη βοήθεια αυτόματων περιελικτικών μηχανών. Τέλος αφού μονωθούν οι σπείρες που δημιουργήθηκαν μεταξύ τους ολόκληρος ο περιελιγμένος πυρήνας εμποτίζεται με βερνίκι μόνωσης και έπειτα θερμοσκληραίνεται σε φούρνο.

Σε περιπτώσεις μηχανών υψηλής τάσης (μεγαλύτερης του 1 kV) χρησιμοποιούνται επισμαλτωμένα σύρματα ορθογώνιας διατομής. Κάθε σπείρα κατασκευάζεται ξεχωριστά, είτε χειροποίητα πάνω σε ειδικά καλούπια, είτε με τη βοήθεια πολύ ακριβών σπειρομηχανών. Η μέθοδος αυτή εγγυάται καλύτερη χρήση χώρου και βελτιωμένα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά σε σχέση με αυτά της συρματοπεριέλιξης. Σε αυτή την περίπτωση τα ελίγματα τοποθετούνται στα αυλάκια του στάτη και τοποθετείται ολόκληρος ο στάτης σε φούρνο κενού. Εδώ οι σπείρες είναι μονωμένες με υαλοβάμβακα και ο εμποτισμός γίνεται με θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη.

### 1.1.2 Δρομέας Επαγωγικού Κινητήρα

Ο δρομέας αποτελεί το κινούμενο μέρος της διάταξης του κινητήρα και είναι υπεύθυνος για την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική. Υπάρχουν δύο τύποι δρομέων που χρησιμοποιούνται σε επαγωγικούς κινητήρες: ο δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel-cage rotor) και ο δακτυλιοφόρος δρομέας (wound rotor).

#### Δακτυλιοφόρος δρομέας

Ο δακτυλιοφόρος δρομέας διαθέτει ολοκληρωμένο τριφασικό τύλιγμα, το οποίο είναι τοποθετημένο, ώστε να αποτελεί το κατοπτρικό είδωλο του τυλίγματος στάτη. Οι τρεις φάσεις ενός τέτοιου τυλίγματος συνδέονται συνήθως σε αστέρα, ενώ τα άκρα των αγωγών συνδέονται σε δακτυλίους. Οι αγωγοί του δρομέα βραχυκυκλώνονται μέσω ψηκτρών που εφάπτονται στους δακτυλίους.

### Δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού

Ο δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού αποτελείται από μια σειρά αγωγίμων ράβδων που είναι τοποθετημένες σε αυλάκια της επιφάνειας του δρομέα και βραχυκυκλωμένες στα δυο άκρα τους μέσω μεγάλων δακτυλίων βραχυκύκλωσης δημιουργώντας έτσι ένα κλουβί από αγωγίμες μπάρες το οποίο τοποθετείται μέσα στον πυρήνα του δρομέα. Σε αρκετές περιπτώσεις οι μπάρες είναι τοποθετημένες με κλίση και όχι σε απόλυτη ευθεία. Με αυτήν την κλίση περιορίζονται η ταλάντωση της ροπής που μπορεί να εμφανιστεί, οι απώλειες Joule του δρομέα και το αρμονικό περιεχόμενο που οφείλεται στον δρομέα του επαγωγικού κινητήρα.[39]



Figure 1.1 Βραχυκυκλωμένες Μπάρες του δρομέα και ο πυρήνας του δρομέα.[11]

Ανάλογα με την χρήση και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά ενός κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού επιλέγουμε τα κατάλληλα υλικά για την κατασκευή των μπαρών του δρομέα.

Στην περίπτωση που θέλουμε να επιτύχουμε ισχύ της τάξεως των W έως kW οι μπάρες κατασκευάζονται από χυτευμένο αλουμίνιο. Το χυτευμένο αλουμίνιο με την ηλεκτρική του αγωγιμότητα που το χαρακτηρίζει είναι ικανό να μας προσφέρει την παραπάνω τάξη ισχύος και σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος κατασκευής μπαρών αυτού του υλικού το καθιστά μια αξιόλογη επιλογή.

Στην περίπτωση που η οφειλόμενη ισχύς του κινητήρα είναι της τάξης μεταξύ kW και MW το υλικό κατασκευής που επιλέγεται για τις μπάρες του δρομέα είναι ο χαλκός. Έχοντας μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα σε σχέση με το χυτευμένο αλουμίνιο καθώς και μεγαλύτερη αντοχή σε θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις ο χαλκός είναι μια εξαιρετική επιλογή για αυτή την τάξη ισχύος. Το κόστος κατασκευής μπαρών χαλκού είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τις μπάρες χυτευμένου αλουμινίου καθώς επίσης με την επιλογή του χαλκού το βάρος του δρομέα αυξάνεται σε σημαντικό βαθμό.

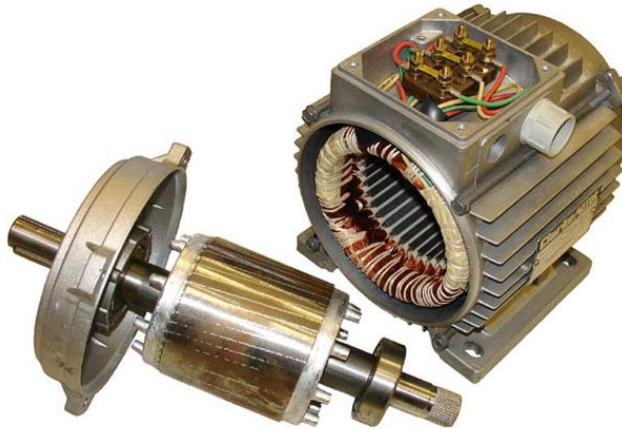


Figure 1.2 Στάτης και Δρομέας Βραχυκυκλωμένου κλωβοῦ.[40]

### Γεωμετρία Αυλακιών Δρομέα

Η γεωμετρία των αυλακιών του δρομέα όπου τοποθετούνται οι μπάρες του παίζουν σημαντικό ρόλο στην απόδοση του κινητήρα αλλά και στην εκκίνηση του. Ανάλογα με την εφαρμογή του εκάστοτε κινητήρα πρέπει να επιλεγεί και η κατάλληλη γεωμετρία, η οποία καθορίζει την συνολική αντίσταση του δρομέα. [5]

Η σημαντικότητα της γεωμετρίας που αναφέρθηκε οδήγησε την NEMA (National Electrical Manufacturers Association) στην θέσπιση συγκεκριμένων κλάσεων γεωμετρίας των αυλακιών του δρομέα, κάθε μια με την δικιά της γεωμετρία η οποία εγγυάται συγκεκριμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά και χρησιμοποιούνται σε διάφορες βιομηχανικές και εμπορικές εφαρμογές. Αυτή η θέσπιση εξασφαλίζει την διάκριση μεταξύ των κινητήρων ανάλογα με την σχέση της ταχύτητας, της ροπής και της ολίσθησης τους σε 4 κλάσεις.

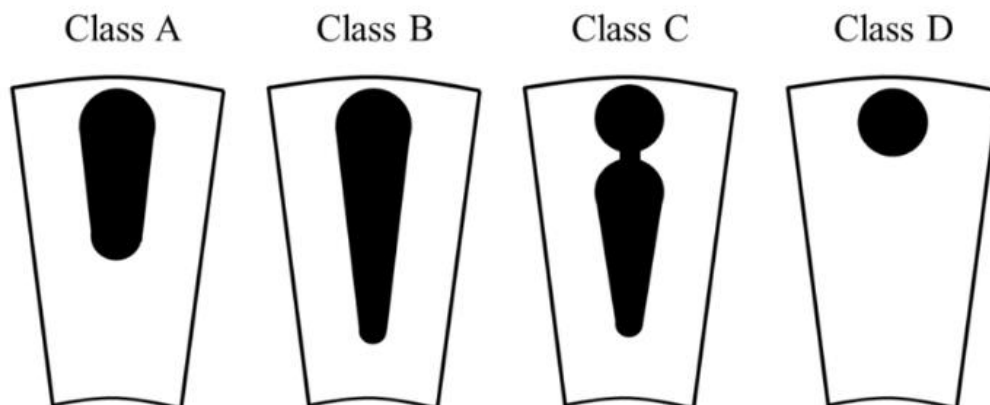


Figure 1.3 Κλάσεις γεωμετρία κινητήρα σύμφωνα με την NEMA.[10]

#### **ΚΛΑΣΗ Α :**

Σε αυτή την γεωμετρία η μέγιστη ολίσθηση που επιτυγχάνεται είναι της τάξεως του 5%. Το ρεύμα εκκίνησης εμφανίζεται σε κανονικές ή υψηλές τιμές. Η ροπή εκκίνησης είναι μεσαία και η ροπή ανατροπής είναι σχετικά υψηλή. Η γεωμετρία αυτή είναι ιδανική για συστήματα εξαερισμού και αντλίες.

#### **ΚΛΑΣΗ Β:**

Στην περίπτωση της Β κλάσης η μέγιστη ολίσθηση κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα με αυτά της κλάσης Α, δηλαδή με μέγιστο τα 5%. Το ρεύμα εκκίνησης εδώ είναι χαμηλό και μικρότερο σε σχέση με αυτό της Α κλάσης, όπως μικρότερη είναι και η ροπή ανατροπής καθώς και η ροπή εκκίνησης. Τα χαρακτηριστικά αυτής της γεωμετρίας την καθιστούν ιδανικά για HVAC συστήματα.

#### **ΚΛΑΣΗ C:**

Και σε αυτή την περίπτωση η ολίσθηση έχει μέγιστο το ποσοστό του 5%. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες δυο κλάσεις εδώ η ροπή εκκίνησης είναι υψηλή, αλλά το ρεύμα εκκίνησης είναι χαμηλό. Η ροπή ανατροπής σε αυτή την γεωμετρία έχει μεσαίες τιμές και τα χαρακτηριστικά της την καθιστούν ιδανικά για εφαρμογές που με υψηλή τιμή ροπής αδράνειας και χρειάζονται υψηλές ροπές εκκίνησης.

#### **ΚΛΑΣΗ D:**

Σε αυτή την κλάση έχουμε μεγαλύτερες τιμές ολίσθησης σε εύρος 5-13%. Η ροπή εκκίνησης είναι πάρα πολύ υψηλή και δεδομένου της υψηλής του αντίστασης το ρεύμα εκκίνησης είναι χαμηλό. Εδώ δεν υπάρχει ροπή ανατροπής καθώς ο η ροπή μετά την εκκίνηση συνεχώς μειώνεται. Ιδανική γεωμετρία για εφαρμογές που τους χαρακτηρίζει υψηλή ροπή αδράνειας.



## Typical Current & Torque Relationship for Squirrel Cage Induction Motor

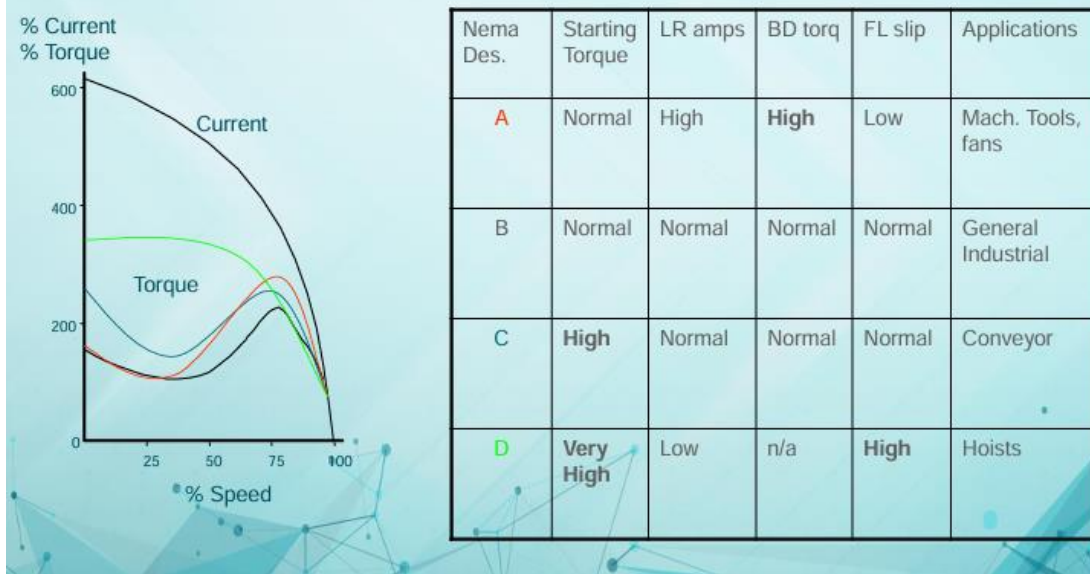


Figure 1.4 Πίνακας ροπών για κάθε κλάση σύμφωνα με τη NEMA.[7]

### Πυρήνας του δρομέα

Ο πυρήνας του δρομέα κατασκευάζεται από ελασματοποιημένα φύλλα φερρομαγνητικό υλικού . Η ελασματοποίηση βοηθά στον περιορισμό της επιρροής των δινορευμάτων που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια της λειτουργίας του κινητήρα ενώ περιορίζει και τις θερμικές καταπονήσεις βελτιώνοντας έτσι την απόδοση του κινητήρα.[12]



Figure 1.5 Ελασματοποιημένος πυρήνας δρομέα.[13]

### 1.1.3 Άξονας και Έδρανα Κινητήρα (ρουλεμάν)

Ο άξονας του επαγωγικού κινητήρα αποτελεί το μηχανικό στοιχείο που μεταφέρει την περιστροφική κίνηση και την ροπή του δρομέα στο φορτίο. Συνήθως κατασκευάζεται από χάλυβα εξασφαλίζοντας υψηλή ανθεκτικότητα. Η σωστή του ευθυγράμμιση είναι απολύτως απαραίτητη για την ομαλή λειτουργία του κινητήρα.

Τα έδρανα αποτελούν τον μηχανισμό στήριξης του άξονα ενώ επιτρέπουν την περιστροφή του άξονα με ελάχιστες τριβές. Χρησιμοποιούνται έδρανα κύλισης (ball bearings) τα οποία διακρίνονται σε διάφορους τύπους ανάλογα το φορτίο και τις συνθήκες λειτουργίας. Η καλή κατάσταση των ρουλεμάν εξασφαλίζει την μακροχρόνια και αξιόπιστη λειτουργία του κινητήρα. Αποτελούνται από τον εξωτερικό δακτύλιο, το εξωτερικό σταθερό μέρος που στηρίζεται στο περίβλημα της μηχανής, τον εσωτερικό δακτύλιο, που στερεώνεται στον άξονα και περιστρέφεται μαζί του και τα στοιχεία κύλισης, πρόκειται για μπάλες ή κυλίνδρους που παρεμβάλλονται μεταξύ εξωτερικού και εσωτερικού δακτυλίου. Αυτά τα στοιχεία είναι που επιτρέπουν την κύλιση μειώνοντας την τριβή μεταξύ των δακτυλίων.

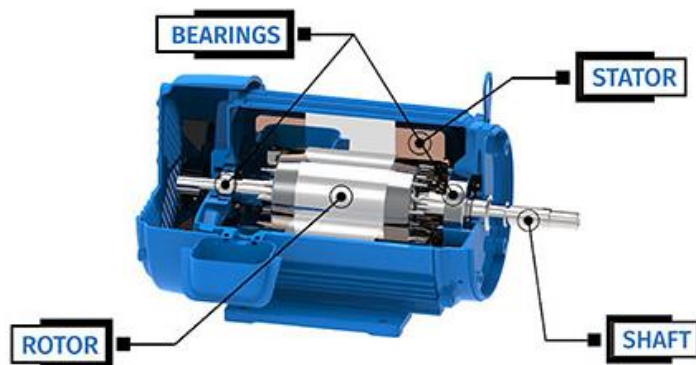


Figure 1.6 Επαγωγικός Κινητήρας και τα εξαρτήματά του.[41]

## 1.2 Αρχή Λειτουργίας Επαγωγικού Κινητήρα[47]

Μόλις το τύλιγμα του στάτη τροφοδοτηθεί με τριφασική εναλλασσόμενη τάση συχνότητας  $f_s$ , χάρη στον τρόπο που είναι διατεταγμένο, δημιουργεί στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο σταθερού πλάτους, συχνότητας  $f_s$  με ταχύτητα:

$$n_s = \frac{60f_s}{p} \quad (1.2)$$

με  $p$  τα ζεύγη των πόλων της μηχανής. Η παραπάνω ταχύτητα ονομάζεται σύγχρονη και μονάδα μέτρησης έχει τα rpm.

Αυτό το γεγονός σηματοδοτεί την μεταβολή της μαγνητικής ροής εντός της μηχανής. Ο δρομέας βρισκόμενος μέσα στον στάτη, και λαμβάνοντας υπόψη τον νόμο Faraday, επάγεται ηλεκτρεγερτική δύναμη (EMF), και κατ' επένταση τάση εξ' επαγωγής σε αυτόν. Αποτελούμενος από έναν πυρήνα από φερρομαγνητικό υλικό με αυλακώσεις, μέσα στις οποίες είναι τοποθετημένες οι μπάρες από αγωγίμο υλικό και είναι βραχυκυκλωμένες μεταξύ τους με δυο δακτυλίους δημιουργώντας τον κλωβό. Η επαγόμενη τάση δημιουργεί ρεύματα τα οποία διαρρέουν τον κλωβό. Έτσι δυνάμεις Lorentz εμφανίζονται σε κάθε μια μπάρα του δρομέα. Τέλος αξίζει να σημειωθεί πως οι μπάρες είναι τοποθετημένες συμμετρικά στην περιφέρεια του δρομέα και σε αντικριστά ζεύγη, οπότε οι δυνάμεις που έχουν αναπτυχθεί προκαλούν ροπή που θα περιστρέψει τον δρομέα. Η παραγόμενη ροπή του κινητήρα εκφράζεται από την παρακάτω σχέση :

$$T_{mech} = T_L + J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.3)$$

Με  $T_L$  την ροπή του φορτίου που πρέπει να ξεπεράσει ο κινητήρας για να λειτουργήσει,  $J$  την συνδυασμένη ροπή αδράνειας του κινητήρα και του φορτίου που είναι πεπλεγμένο και  $\frac{d\omega}{dt}$  την μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα.

### Ολίσθηση

Η τάση που επάγεται σε κάποια από τις μπάρες του δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα εξαρτάται από την σχετική κίνηση του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Το βασικό μέγεθος που περιγράφει την σχετική αυτή κίνηση του δρομέα είναι η ολίσθηση και ορίζεται ως εξής:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1.4)$$

Με  $n_s$  την σύγχρονη ταχύτητα και  $n$  την ταχύτητα του δρομέα και είναι εκφρασμένη σε εκατοστιαία ή ανά μονάδα βάση, ενώ δεν έχει μονάδες.

Από την (1.4) γίνεται αντιληπτό πως αν ο δρομέας περιστρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα τότε η ολίσθηση είναι 0, ενώ αν ο δρομέας είναι ακίνητος τότε η ολίσθηση ισούται με 1.

Στην πρώτη περίπτωση δεν υπάρχει μεταβολή της μαγνητικής ροής και από τον Νόμο του Faraday προκύπτει ότι:  $-\frac{d\Phi}{dt} = 0$  και τότε  $\text{EMF} = 0$ . Έτσι δεν δημιουργούνται ρεύματα και κατ'επέκταση δεν αναπτύσσονται δυνάμεις Lorentz, γεγονός που κάνει αδύνατο την παραγωγή ροπής.

Στην δεύτερη περίπτωση που ο δρομέας παραμένει ακίνητος είναι προφανές ότι ο κινητήρας δεν παράγει ροπή.

Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση η τιμή της ολίσθησης μεταβάλλεται ανάμεσα σε αυτές τις δυο τιμές. Σε ονομαστική λειτουργία η τιμή της ολίσθησης είναι πολύ κοντά στο 0 αλλά όχι ακριβώς 0.

Εύκολα συμπεραίνεται ότι στους επαγωγικούς κινητήρες ο δρομέας προσπαθεί να περιστραφεί με την ταχύτητα του μαγνητικού πεδίου, την σύγχρονη, και κατά την ίδια φορά, αλλά στην πραγματικότητα δεν τα καταφέρνει και περιστρέφεται με μικρότερη ταχύτητα από την σύγχρονη.

Τέλος αναλύοντας την (1.4) μπορεί να προκύψει η σχέση:  $f_r = s \cdot f_s$  (1.5) με  $f_r$  την συχνότητα των επαγόμενων μεγεθών στον δρομέα.

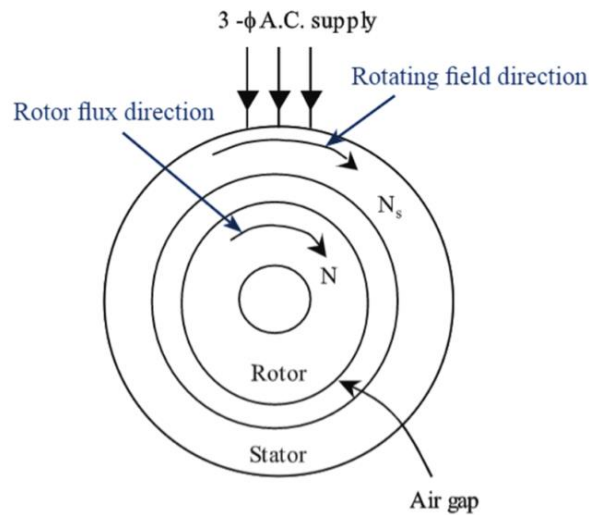


Figure 1.7 Τα στρεφόμενα μαγνητικά πεδία εντός της μηχανής.[14]

### 1.3 Ισοδύναμο Κύκλωμα του Επαγωγικού Κινητήρα

Καθώς γίνεται λόγος για ένα τριφασικό σύστημα, πρέπει να αποσαφηνιστεί πως το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού κινητήρα αναφέρεται σε μια φάση του. Μοντελοποιούνται στο κύκλωμα τα τυλίγματα του στάτη, ο πυρήνας του δρομέα και το κύκλωμα του δρομέα. Η παρακάτω αναπαράσταση καταδεικνύει τις ηλεκτρικές και μαγνητικές αλληλεπιδράσεις μέσα στον κινητήρα συμπεριλαμβανομένων τις αντιστάσεις του στάτη και του κινητήρα, τις αντιδράσεις τους καθώς και την σύζευξη μεταξύ του δρομέα και του στάτη.

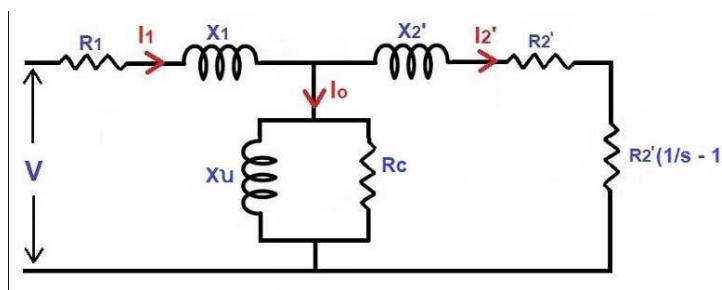


Figure 1.8 Το ισοδύναμο κύκλωμα σε μια φάση ενός επαγωγικού κινητήρα.[15]

- $R_1$ : Αντίσταση του στάτη, είναι υπεύθυνη για τις απώλειες χαλκού του τυλίγματος του στάτη
- $X_1$ : Σκέδαση στάτη
- $R_c$ : Απώλειες σιδήρου στάτη
- $X_u$ : Επαγωγιμότητα μαγνήτισης.
- $X_2$ : Σκέδαση δρομέα

- $R_2'$ : Αντίσταση δρομέα, υπεύθυνη για τις απώλειες Joule του δρομέα
- $R_2'*(1/s-1)$ : Ηλεκτρομαγνητική ισχύς

Να σημειωθεί πως στην πραγματικότητα δεν υπάρχει γαλβανική ζεύξη ανάμεσα στον στάτη και στον δρομέα.

### Ροή Ισχύος

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η ροή ισχύος σε έναν επαγωγικό κινητήρα. Αρχικά η ισχύς εισόδου που παρουσιάζεται παρακάτω ως ενεργή ισχύς εισέρχεται στο σύστημα. Αφού αφαιρέσουμε τις απώλειες χαλκού και τις απώλειες σιδήρου του στάτη προκύπτει η ισχύς διακένου του κινητήρα, η οποία περιγράφεται στο παρακάτω διάγραμμα ως ενεργή ισχύς δρομέα. Αφαιρώντας από την ισχύ διακένου τις απώλειες χαλκού του δρομέα προκύπτει η ηλεκτρομαγνητική ισχύς του κινητήρα. Τέλος αφαιρώντας από την ηλεκτρομαγνητική ισχύ τις μηχανικές απώλειες λόγω τριβών προκύπτει η πραγματική ισχύς εξόδου του κινητήρα.

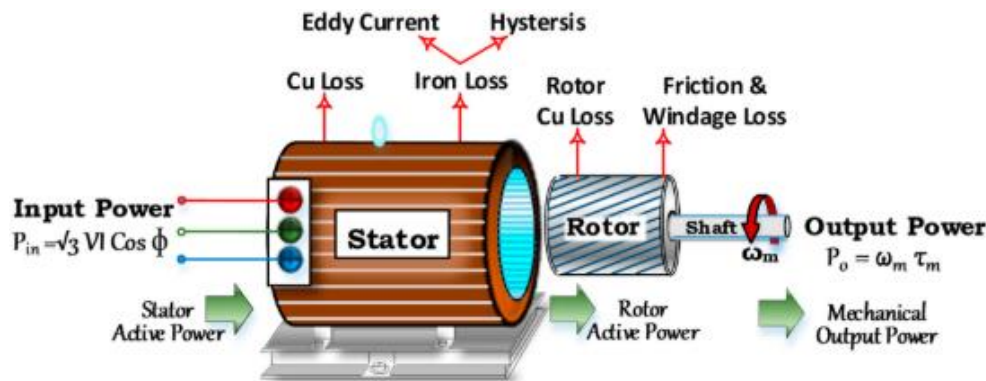


Figure 1.9 Ροή ισχύος του κινητήρα.[16]

### 1.4 Ροπή Επαγωγικού Κινητήρα

Ένα από τα βασικά μεγέθη μελέτης του επαγωγικού κινητήρα είναι η ροπή που παράγει και αποδίδει στο φορτίο που έχει συνδεθεί. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η ροπή ενός επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού σε σχέση με την ταχύτητα του δρομέα του.

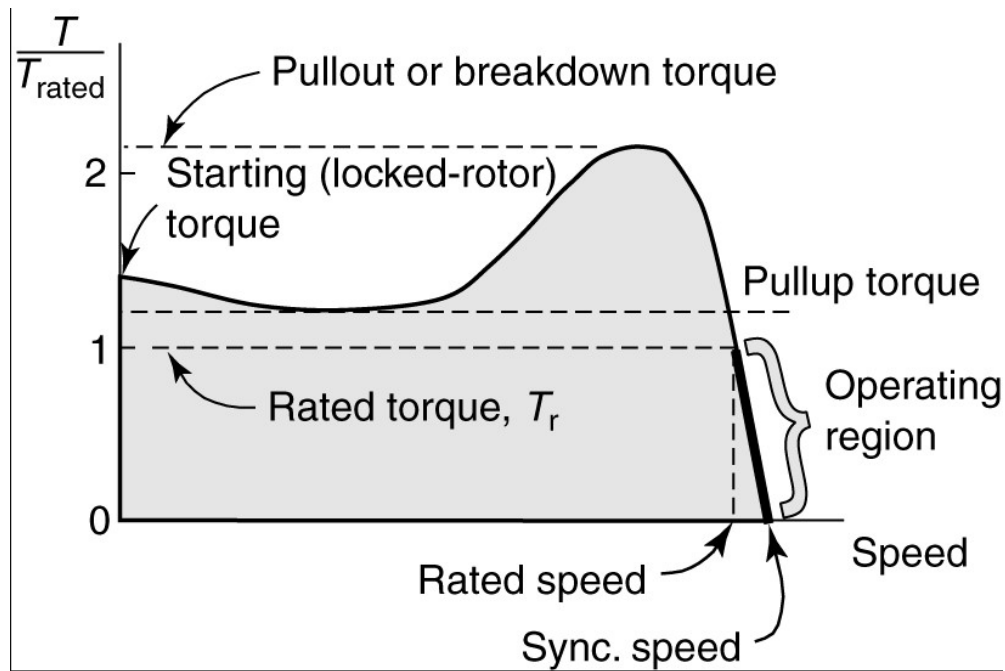


Figure 1.10 Χαρακτηριστική Ροπής Στροφών.[17]

Αρχικά η χαρακτηριστική παρουσιάζει μέγιστο σε μια τιμή που ονομάζεται ροπή ανατροπής (pull-out torque). Η ανατροπή είναι σημαντική για την εύρυθμη λειτουργία του κινητήρα και τα ζεύγη τιμών είναι αναγκαίο να είναι γνωστά.

Η περιοχή που ξεκινά από την ροπή εκκίνησης μέχρι την ροπή ανατροπής ονομάζεται περιοχή αστάθειας και η εναπομείνουσα περιοχή ονομάζεται περιοχή ευστάθειας.

Παρατηρούμε πως όταν η ταχύτητα του δρομέα συγχρονιστεί με την σύγχρονη ταχύτητα η παραγόμενη ροπή είναι μηδενική.

Η περιοχή λειτουργίας του κινητήρα είναι πολύ κοντά στην σύγχρονη ταχύτητα για να έχει υψηλή απόδοση.

#### *Επίδραση Αντίστασης Δρομέα στην Ροπή του Επαγωγικού Κινητήρα*

Για την διευκόλυνση της επίδρασης της αντίστασης του δρομέα στην ροπή του κινητήρα θα χρησιμοποιήσουμε το ισοδύναμο κατά Thevenin το οποίο είναι το παρακάτω:

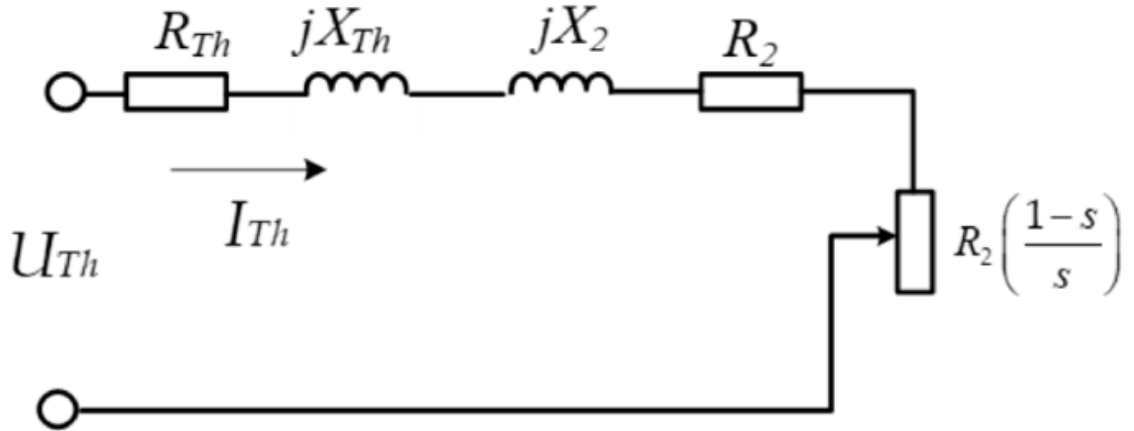


Figure 1.11 Ισοδύναμο κατά Thevenin.[18]

Κάνοντας τις κατάλληλες πράξεις προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$T_{em} = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{V_{TH}^2 \cdot \frac{R'_2}{s}}{\left(R_{TH} + \frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X'_2)^2} \quad (1.6)$$

με:  $V_{TH} \simeq \frac{X_m}{X_1 + X_m} \dot{V}_1 = K_{TH} \cdot V_1$ ,  $R_{TH} = K_{TH}^2 \cdot R_1$ ,  $X_{TH} = j\dot{X}_1$ ,  $s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$

Από την παραπάνω σχέση θέτουμε την ολίσθηση ίση με ένα, δηλαδή στην εκκίνηση του κινητήρα, τότε η σχέση γίνεται:

$$T_{em} = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{V_{TH}^2 \cdot R'_2}{(R_{TH} + R'_2)^2 + (X_{TH} + X'_2)^2} \quad (1.7)$$

Παρατηρούμε ότι η ροπή εκκίνησης είναι ανάλογη της αντίστασης του δρομέα, δηλαδή αυξάνοντας την αντίσταση του δρομέα αυξάνουμε την ροπή εκκίνησης του κινητήρα.

Δεδομένου ότι και η ροπή ανατροπής είναι σημαντικό μέγεθος για την λειτουργία του κινητήρα θα κάνουμε διερεύνηση και για αυτό το μέγεθος. Παίρνοντας την παράγωγο της (1.6) ως προς την ολίσθηση  $s$  προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$s_{\max T} = \pm \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2)^2}} \quad (1.8)$$



Είμαστε στην περίπτωση του κινητήρα, οπότε θα πάρουμε μόνο την θετική τιμή της (1.8) και θα την εφαρμόσουμε στην (1.6) και προκύπτει ότι

$$T_{em_{MAX}} = \frac{1}{2 \cdot \omega_s} \cdot \frac{V_{TH}^2}{R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2')^2}} \quad (1.9)$$

Από την (1.9) γίνεται αντιληπτό ότι η τιμή της ροπής ανατροπής είναι ανεξάρτητη της αντίστασης δρομέα, ωστόσο είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την μέγιστη ολίσθηση και κατ' επένταση με την ταχύτητα του δρομέα. Δηλαδή με αύξηση της αντίστασης του δρομέα αυξάνεται η ολίσθηση που εμφανίζεται η ροπή ανατροπής και συνδυάζοντας την (1.4) μειώνεται η ταχύτητα που εμφανίζεται η ροπή ανατροπής. Συνοψίζοντας τον παραπάνω συλλογισμό αύξηση της αντίστασης δρομέα μετατοπίζει την μέγιστη ροπή αριστερά ως προς τον άξονα των  $\chi$ .

Παρακάτω φαίνεται η επίδραση του μεγέθους της αντίστασης δρομέα:

$$R_1 > R_2 > R_3 > R_4$$

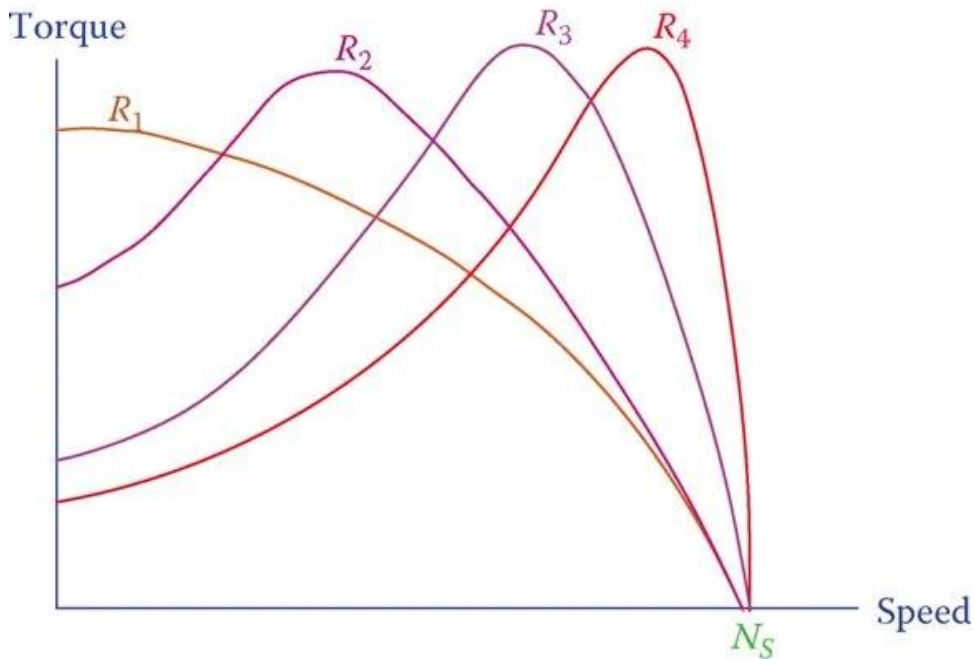


Figure 1.12 Η επίδραση αντίστασης δρομέα στην ροπή στροφών.[17]

## Κεφάλαιο 2. Εισαγωγή στα Σφάλματα Επαγωγικών Κινητήρων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν οι αιτίες εμφάνισης σφαλμάτων στους επαγωγικούς κινητήρες καθώς επίσης τα συχνότερα είδη τους και οι επιπτώσεις αυτών των λαθών.

Οι επαγωγικοί κινητήρες αποτελούν περίπου το 85% των κινητήρων που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία, χάρη στην λειτουργία τους με σχεδόν σταθερή ταχύτητα, στην ανθεκτική κατασκευή τους, στην χαμηλή τους ανάγκη για συντήρηση και στην δυνατότητα τους να λειτουργούν σε ποικίλα περιβάλλοντα, όλα αυτά σε πολύ χαμηλό κόστος. Η εκτεταμένη αυτή χρήση τους καθιστά την λειτουργία τους, σε υγιή κατάσταση αλλά και σε βέλτιστη απόδοση, ανάλογα με την κάθε εφαρμογή, σε θέμα μείζονος σημασίας.[20]

Συνεπώς η έγκυρη αναγνώριση-πρόγνωση αλλά και η επίλυση των σφαλμάτων που εμφανίζονται είναι ένα κρίσιμο θέμα ενασχόλησης της επιστήμης.

### 2.1 Αιτίες Εμφάνισης Σφαλμάτων

Η φύση των αιτιών που ευθύνονται για την εμφάνιση σφαλμάτων διακρίνεται σε:

- Κατασκευαστικές ατέλειες
- Γήρανση
- Ανθρώπινος Παράγοντας

Παρακάτω θα αναλυθούν και τα τρία είδη αιτιών αλλά και συνήθη παραδείγματα που εμφανίζονται σε επαγωγικούς κινητήρες.

#### 2.1.1 Κατασκευαστικές ατέλειες

Οι κατασκευαστικές ατέλειες αποτελούν έναν από τους βασικούς λόγους εμφάνισης σφαλμάτων στους επαγωγικούς κινητήρες. Με την αυξανόμενη ζήτηση για ενεργειακή απόδοση, οι κατασκευαστές κινητήρων αναγκάζονται να παράγουν κινητήρες που πληρούν τα διεθνή πρότυπα αποδοτικότητας στοχεύοντας παράλληλα στην ελαχιστοποίηση του κόστους. Στον βωμό της παραγωγής θυσιάζεται τυχόν έλεγχος για κατασκευαστικές ατέλειες και για τις επιπτώσεις τους στην απόδοση και στην λειτουργία του κινητήρα. Οι ατέλειες αυτές κληροδοτούνται από τον κατασκευαστή και ακολουθούν μόνιμα τον κινητήρα.

Μια από αυτές τις ατέλειες είναι η πορότητα στα ελάσματα του δρομέα. Κατά την κατασκευή των ελασμάτων γίνεται αρχικά χύτευση του αλουμινίου και κατά την σταθεροποίησή του συνήθως συρρικνώνεται κατά 7% με αποτέλεσμα τον εγκλωβισμό δεσμών αέρα στο τελικό αποτέλεσμα. Άλλος ένας τρόπος εισαγωγής πορότητας στον κινητήρα είναι η ανεπαρκής έγχυση αλουμινίου ή η διαρροή αλουμινίου κατά την διάρκεια χύτευσης υπό πίεση. Δεδομένου

ότι ο δρομέας είναι υπεύθυνος για το 20% των συνολικών απωλειών σε κινητήρες επαγωγής, μία δέσμη αέρα στο εσωτερικό του δρομέα αυξάνει την αντίσταση του και συνεπώς τις απώλειες του, καθώς επίσης αποδυναμώνει την κατασκευή του δρομέα και αυξάνει τα επίπεδα της θερμικής και μηχανικής του καταπόνησης. Ο παράγοντας που αντιλαμβανόμαστε το ποσοστό πορότητας στον δρομέα ενός κινητήρα, που έχουν κατασκευαστεί με την τεχνική της χύτευσης, είναι ο συντελεστής πλήρωσης(fill factor).

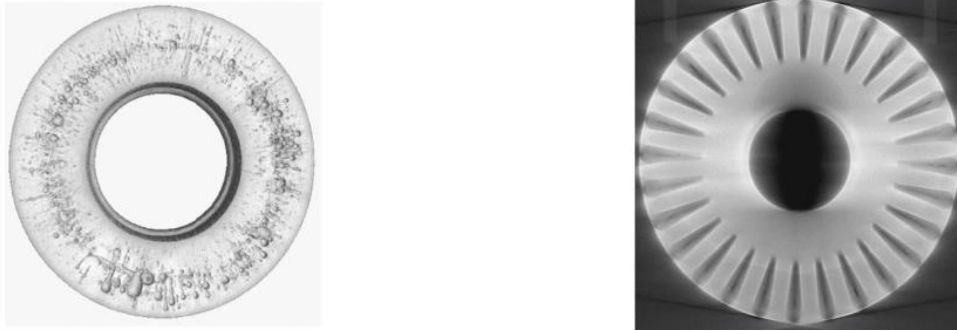


Figure 2.1 Επιπτώσεις πορότητας στο ένα μέρος του κλωβού [22] και Επιπτώσεις πορότητας στις μπάρες του δρομέα.[22]

Το τυπικό εύρος τιμών για αυτόν τον παράγοντα είναι μεταξύ 85% έως 98%. Η πορότητα επηρεάζει με την σειρά τους και τις μπάρες του κινητήρα, οι οποίες συνδέονται σε αστέρια και οποιαδήποτε δέσμη αέρα στο εσωτερικό τους επηρεάζει την αντίσταση κάθε μπάρας και δημιουργεί ασυμμετρία φάσεων. [22]

Ένας ακόμη παράγοντας που οδηγεί στην ύπαρξη σφαλμάτων εξαιτίας κατασκευαστικής ατέλειας είναι η στατική εκκεντρότητα. Από κατασκευαστική άποψη η εκκεντρότητα μπορεί να οφείλεται είτε στην μη ιδανική κυκλική επιφάνεια του στάτη ή από λανθασμένη τοποθέτηση και στήριξη του δρομέα. Η επίπτωση που έγκειται στα παραπάνω είναι η ύπαρξη άνισου διακένου στο χώρο, το οποίο όμως δεν αλλάζει στον χρόνο.[23]

Το άνισο διάκενο έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη μη συμμετρικής τάσης και ρεύμα διακένου, ενώ η πυκνότητα της μαγνητικής ροής στο διάκενο είναι άνιση. Τα παραπάνω οδηγούν στην αύξηση της ταλαντευόμενης ροπής και μείωση της προσφερόμενης ροπής, με αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσης του κινητήρα αλλά και την επιπλέον θερμική του καταπόνηση.[24]

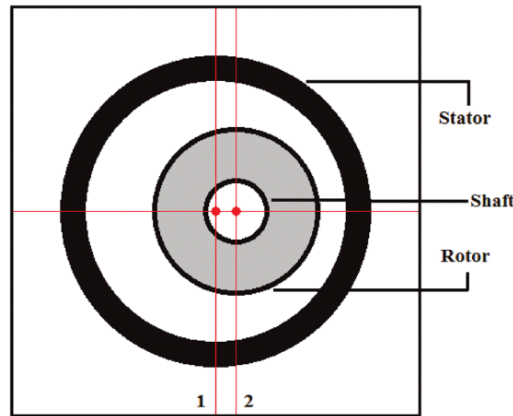


Figure 2.2 Γεωμετρία κινητήρα με στατική εκκεντρότητα.[24]

### 2.1.2 Γήρανση και φθορά μηχανισμών.

Κατά την λειτουργία της οι μηχανές εναπόκεινται σε είδη καταπονήσεων που είναι γνωστές με το ακριτικόλεξο TEAM( Thermal Electrical Ambient Mechanical). Οι μηχανισμοί που υποφέρουν από αυτό το είδος καταπονήσεων είναι κυρίως ο δρομέας, ο στάτης και τα έδρανα(ρουλεμάν). Οι καταπονήσεις είναι συνεχείς και προέρχονται από την θερμότητα, τα ρεύματα, τις συνθήκες του περιβάλλοντος που εργάζεται ο κινητήρας, στις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την λειτουργία του κάνοντας του κινητήρες να εμφανίσουν σφάλματα κατά την πάροδο του χρόνου.

#### Φθορά δρομέα

Αρχικά κατά την λειτουργία του κινητήρα ο δρομέας υποφέρει από μηχανικές καταπονήσεις. Εστιάζοντας σε κινητήρες βραχυκυκλωμένου κλωβού οι καταπονήσεις οφείλονται σε φυγόκεντρες δυνάμεις που αναπτύσσονται στις μπάρες και στα δαχτυλίδια του κλωβού καθώς αυτά τα μέρη του δρομέα είναι υπεύθυνα για την αντέχουν επιπλέον δυνάμεις που κρατάνε τον δρομέα σε άρτια κατάσταση . Οι δυνάμεις αυτές είναι ανάλογες του τετραγώνου της ταχύτητας του δρομέα, άρα μέγιστη στη μόνιμη κατάσταση. Αυτές οι καταπονήσεις οφείλονται για την υποβάθμιση των αντοχών του δρομέα καθώς και την χαλάρωση των μπαρών του και με την πάροδο του χρόνου στην ολική του κατάρρευση.

Οι θερμικές καταπονήσεις οφείλονται κυρίως στο ρεύμα που διαρρέει τον δρομέα και ιδίως στην εκκίνηση του κινητήρα. Κατά την εκκίνηση το ρεύμα δρομέα φτάνει έως και πέντε φορές την τιμή της μόνιμης κατάστασης, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία να παρουσιάζει αρκετά μεγάλη αύξηση. Λόγω επιδερμικού φαινομένου η καταπόνηση στις μπάρες είναι ανομοιομορφη με το πάνω μέρος του δρομέα να υποφέρει παραπάνω σε σχέση με το κάτω μέρος.

Η επιλογή του φορτίου που θα συμπλέξουμε τον κινητήρα είναι ακόμη ένας παράγοντας που προκαλεί γήρανση στον δρομέα. Φορτία με μεγάλη ροπή αδράνειας δυσκολεύουν την εκκίνηση του κινητήρα προκαλώντας επιπλέον μηχανικές καταπονήσεις. Ακριβώς τα ίδια ισχύουν και για φορτία με ταλαντωμένη ροπή.

### Φθορά μόνωσης στάτη [25]

Η βασική καταπόνηση του στάτη προέρχεται από θερμικές αιτίες και είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με την μόνωση ανάμεσα στα αυλάκια του και το τύλιγμα του. Οι απώλειες χαλκού, οι απώλειες πυρήνα και δινορρευσμάτων στους αγωγούς προκαλούν θερμική γήρανση του μονωτικού συστήματος της μηχανής. Επίσης ξαφνικές αλλαγές στην θερμοκρασία οδηγούν σε ταχύτερη διαστολή των χάλκινων αγωγών από τα μονωτικά υλικά υποβαθμίζοντας έτσι τις ιδιότητες των μονωτικών υλικών με την πάροδο του χρόνου.

Ένας ακόμη παράγοντας γήρανσης στην μόνωση του στάτη είναι οι μερικές εκκινώσεις λόγω μη ομοιόμορφης κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου. Η παρουσία μερικών εκκινώσεων μέσα σε αεροθυλάκια ή στην επιφάνεια της μόνωσης προκαλεί ηλεκτρικούς σπινθήρες που φθείρουν τα οργανικά υλικά της μόνωσης (όπως φιλμ, πολυεστέρες, εποξικές ρητίνες) μέσω διάσπασης χημικών δεσμών, με τελικό αποτέλεσμα τη δημιουργία οπών και τη βλάβη της μόνωσης. Η ύπαρξη οπών στην μόνωση του στάτη αυξάνουν την συνολική του αντίσταση. Με αυτόν τον τρόπο έχουν υποβαθμιστεί οι διηλεκτρικές ιδιότητες των μονωτικών υλικών. Αξίζει να σημειωθεί πως οι μερικές εκκινώσεις εμφανίζονται μόνο σε μεγάλες μηχανές, τάξης kV, καθώς για μικρότερες τάσεις ο αέρας δεν ιονίζεται.

Επίσης ανάλογα με την γεωμετρία του καπακιού και της φορὰς περιστροφής της φτερωτής η κατανομή της θερμοκρασίας κατά μήκος της μηχανής είναι ανομοιόμορφη, κάνοντας την παραπάνω γεωμετρία παράγοντα θερμικής καταπόνησης.

Εκτός από τις καταπονήσεις που αφορούν την θερμοκρασία εξίσου σημαντικές είναι οι μηχανικές καταπονήσεις, οι οποίες συνδέονται με τις δυνάμεις και τις δονήσεις που ασκούνται στην μόνωση του στάτη προκαλώντας παραμόρφωση ή καταστροφή της.

Σύμφωνα με τα παραπάνω οι θερμικές καταπονήσεις, κατ' επένταση η θερμοκρασία, παίζει σημαντικό ρόλο στην διάρκεια ζωής της μόνωσης του στάτη. Η μαθηματική έκφραση της διάρκειας ζωής του στάτη είναι η παρακάτω:

$$L_T(T) = L_o e^{\frac{B}{T} - \frac{B}{T_o}} \quad (2.1)$$

Στην εξίσωση αυτή, το  $L_T(T)$  αντιπροσωπεύει τον χρόνο ζωής του υλικού στη θερμοκρασία  $T$ , ενώ το  $L_o$  είναι ο χρόνος ζωής υπό την αναφορά στη θερμοκρασία  $T_o$ . Επιπλέον, η παράμετρος  $B$  σχετίζεται με την ενέργεια ενεργοποίησης της διαδικασίας γήρανσης του υλικού.

Εξίσου σημαντικές είναι οι χημικές και περιβαλλοντικές καταπονήσεις. Χημικές ενώσεις όπως οξέα και όζον μπορούν να προκαλέσουν αποσύνθεση της μόνωσης, μειώνοντας την αντοχή της σε μηχανικές καταπονήσεις. Παράλληλα, περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως η υγρασία, το λάδι,

η σκόνη και άλλα σωματίδια μπορεί να σχηματίσουν αγωγίμες επιφάνειες πάνω στη μόνωση. Αυτό, σε συνδυασμό με το ηλεκτρικό στρες επιταχύνει τη φθορά της μόνωσης.

Ο συνδυασμός θερμικών και μηχανικών καταπονήσεων επιφέρει θερμομηχανική γήρανση στην μόνωση του κινητήρα. Η θερμομηχανική γήρανση προκύπτει από την καταπόνηση που αναπτύσσεται μεταξύ της επιφάνειας του αγωγού και της μόνωσης. Αυτή η καταπόνηση οφείλεται στην ανομοιόμορφη κατανομή της θερμοκρασίας μέσα στον αγωγό, η οποία εμφανίζεται όταν υφίσταται μεταβαλλόμενη θερμική καταπόνηση και προκαλεί διαφορετικά επίπεδα διαστολής ανάμεσα στον αγωγό και τη μόνωση.

Όσο πιο γρήγορη είναι η αύξηση της θερμοκρασίας, τόσο μεγαλύτερη είναι η ανομοιομορφία της θερμοκρασίας στον αγωγό. Επομένως, η θερμομηχανική καταπόνηση εξαρτάται από την ταχύτητα μεταβολής της θερμοκρασίας με το χρόνο ( $v$ ). Δεδομένης της μηχανικής φύσης αυτής της μορφής γήρανσης, ο υπολειπόμενος χρόνος ζωής της μόνωσης υπό σταθερή θερμομηχανική καταπόνηση μπορεί να περιγραφεί με τον ακόλουθο μαθηματικό τύπο:

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

όπου  $LM$  αντιπροσωπεύει τη διάρκεια ζωής της μόνωσης σε σταθερή ταχύτητα θερμοκρασιακής μεταβολής  $v$ , ενώ οι παράμετροι  $k$  και  $N$  καθορίζονται μέσω επιταχυνόμενων δοκιμών γήρανσης.

### *Γήρανση εδράνων*

Τα έδρανα(ρουλεμάν) αποτελούν τον μηχανισμό στήριξης του άξονα της μηχανής. Οι βλάβες στα ρουλεμάν μπορεί να είναι διάφορων τύπων και να προκύπτουν από διαφορετικούς λόγους. Ορισμένες βλάβες είναι συνηθισμένες λόγω φυσικής κόπωσης των υλικών από τα οποία αποτελούνται τα ρουλεμάν, ενώ άλλες οφείλονται σε λανθασμένη συναρμολόγηση, συντήρηση ή επιλογή φορτίων των επαγωγικών κινητήρων. Επίσης από ηλεκτρολογική άποψη τα μαγνητικά πεδία που εξέρχονται της μηχανής και διαρρέουν τα έδρανα έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία δινορευμάτων και συνεπώς την σταδιακή υποβάθμιση του προσδόκιμου ζωής τους.

### *2.1.3 Ανθρώπινος Παράγοντας*

Η χρήση κάθε κινητήρα από τον άνθρωπο αν δεν είναι προσεκτική μπορεί να του προκαλέσει σφάλματα. Η λανθασμένη επιλογή τύπου ή μεγέθους κινητήρα σε σχέση με την εφαρμογή, ο αυξημένος αριθμός εκκινήσεων καθώς και η μη συχνή συντήρηση του μπορεί να προκαλέσει σφάλματα τα οποία μπορούν να εξελιχθούν σε ανεπανόρθωτες βλάβες.

## *2.2 Τα Είδη Σφαλμάτων σε Επαγωγικούς Κινητήρες*

Εφόσον ένας κινητήρας εκτεθεί σε κάποιον παράγοντα από την παραπάνω παράγραφο, το πιθανότερο σενάριο είναι ένα σφάλμα να εξελιχθεί κατά την λειτουργία του. Τα λάθη χωρίζονται ως προς το είδος τους σε μηχανικά και ηλεκτρικά. Τα ηλεκτρικά λάθη αφορούν κυρίως τον στάτη και τον δρομέα του εκάστοτε κινητήρα ενώ τα μηχανικά αφορούν διάφορες ανισορροπίες

των μηχανισμών του κινητήρα όπως την δυναμική εκκεντρότητα ή τις βλάβες στα έδρανα. Σε αυτό το κεφάλαιο θα επικεντρωθούμε στα ηλεκτρικά σφάλματα του στάτη μιας και αυτό είναι το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Όσον αφορά τα σφάλματα του δρομέα κάποια ενδεικτικά είναι το σπάσιμο ενός αριθμού μπαρών του κλωβού του κινητήρα είτε το σπάσιμο των δακτυλιδιών στα άκρα του κλωβού.

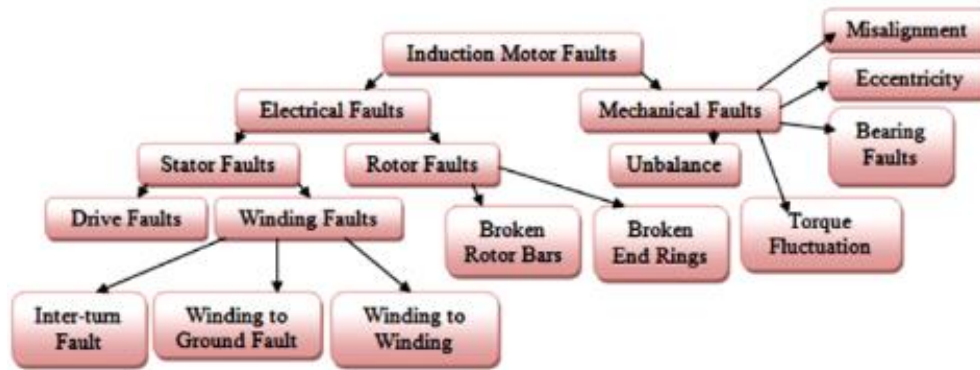


Figure 2.3 Κατηγορίες Σφαλμάτων σε Επαγωγικούς Κινητήρες. [26]

### Τα Σφάλματα Στάτη

Περίπου το 26% με 36% των καταρρέψεων που αφορούν επαγωγικούς κινητήρες αφορούν σφάλματα στα τυλίγματα του στάτη. Τα σφάλματα του στάτη διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

- Σφάλμα Τυλίγματος προς Γη (Turn to Ground)
- Σφάλμα Φάσης προς Φάση (Phase to Phase)
- Σφάλμα Φάσης προς Γη (Phase to Ground)
- Σφάλμα Ανοιχτοκυκλώματος
- Σφάλμα Τυλίγματος προς Τύλιγμα (Turn to Turn)

Οι πρώτες 4 κατηγορίες οδηγούν απευθείας σε κατάρρευση του κινητήρα. Κατά την εμφάνιση τους ο κινητήρας αποσυνδέεται καθώς οι συνέπειες είναι καταστροφικές. Το σφάλμα Τυλίγματος προς Τύλιγμα δεν έχει άμεσες καταστροφικές συνέπειες, ωστόσο η μη έγκυρη διάγνωση τους μπορεί και αυτό να οδηγήσει σε κατάρρευση του κινητήρα. Βάσει των παραπάνω έχει νόημα η μελέτη του σφάλματος Τύλιγμα προς τύλιγμα.

Η κύρια αιτία εμφάνισης Turn to Turn σφάλματος είναι η φθορά της μόνωσης μεταξύ των σπειρών, η οποία οφείλεται στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την διάρκεια της λειτουργίας του κινητήρα με το γεγονός αυτό να οδηγεί στην δημιουργία θερμών περιοχών (hotspots) μέσα στην μόνωση του τυλίγματος. [27]



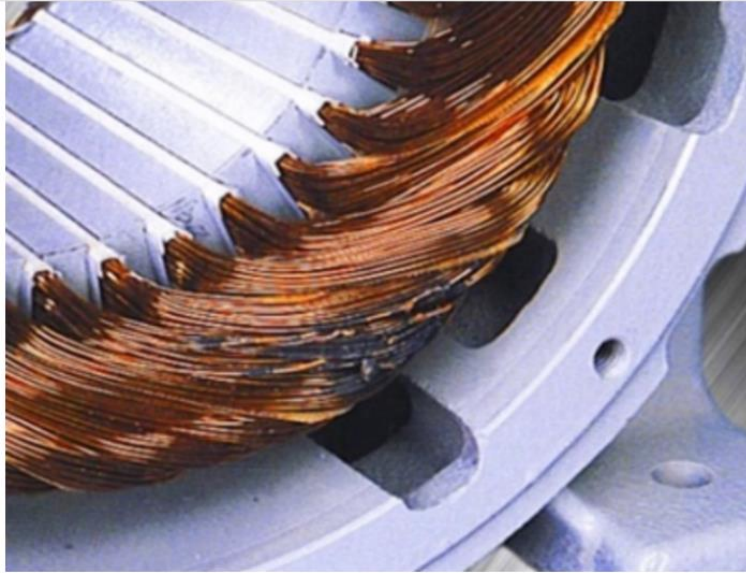


Figure 2.4 Βραχυκυκλωμένες Σπείρες σε μια φάση του Στάτη.[30]

Συνεπώς έχουμε την δημιουργία ενός κλειστού κυκλώματος ανάμεσα στις σπείρες του τυλίγματος. Στις σπείρες που έχει δημιουργηθεί το σφάλμα υπάρχει βραχυκύκλωμα μεταξύ τους με μια αντίσταση, η τιμή της οποίας συνδέεται με την θερμική καταπόνηση της μόνωσης των τυλιγμάτων. Λόγω του στρεφόμενου πεδίου τάση επάγεται στις βραχυκυκλωμένες σπείρες λόγω του νόμου της επαγωγής. Έτσι ρέει ρεύμα στο κλειστό κύκλωμα του βραχυκυκλώματος και οδηγεί σε ασυμμετρία του ρεύματος που διαρρέει τις τρεις φάσεις του στάτη.[28]

Το πλάτος του βραχυκυκλώματος εξαρτάται από την σύγχρονη ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου και από τον αριθμό των βραχυκυκλωμένων σπειρών.

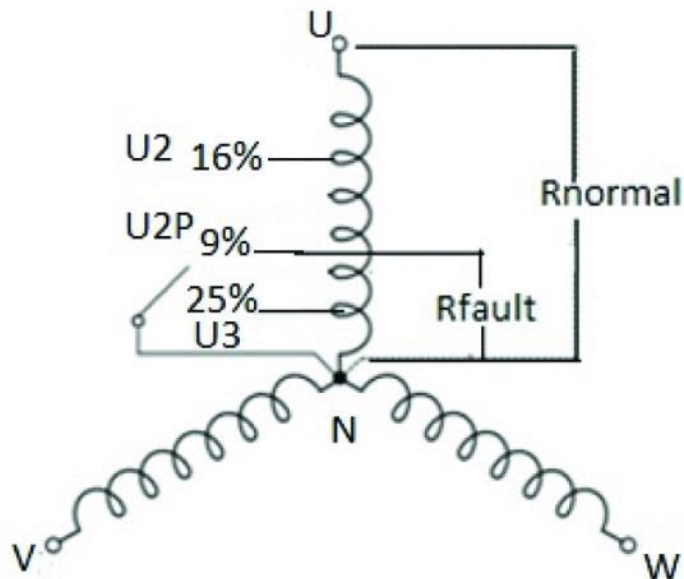


Figure 2.5 Προσέγγιση Βραχυκυκλωμένων Σπειρών [29].



### Κεφάλαιο 3. Διάγνωση Βραχυκυκλωμένων Σπειρών Στάτη σε Επαγωγικούς Κινητήρες

Κατά την λειτουργία των επαγωγικών κινητήρων εμφανίζονται σφάλματα τα οποία είτε μειώνουν την απόδοση τους είτε τους θέτουν εκτός λειτουργίας, επηρεάζοντας έτσι την παραγωγή των βιομηχανιών. Η συνθήκη αυτή δημιουργήσε την ανάγκη διάγνωσης των σφαλμάτων στα πρώιμα τους στάδια ώστε να αποφευχθούν καταστροφικές ζημιές στον κινητήρα. Όλα τα σφάλματα προκαλούν ασυμμετρία στο μαγνητικό πεδίο του κινητήρα, επιφέροντας αλλαγές που περνάει στις κυματομορφές τους.

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί η επίδραση των σφαλμάτων στάτη και συγκεκριμένα το σφάλμα βραχυκυκλωμένων σπειρών στάτη. Αξίζει να σημειωθεί πως αυτό το είδος σφάλματος έχει επίδραση σε αρκετές παραμέτρους του κινητήρα επιφέροντας ασυμμετρίες στα ρεύματα των φάσεων, αύξηση του αρμονικού περιεχομένου, μειωμένη απόδοση και γενικότερα υποβάθμιση στην αξιοπιστία και λειτουργία της μηχανής.[31]

Η βασική ιδέα πίσω από την διαγνωστική είναι η έγκαιρη και όσο πιο γρήγορη αναγνώριση του σφάλματος ενώ η μηχανή βρίσκεται ακόμα σε λειτουργία. Δηλαδή το σφάλμα να μην έχει την σοβαρότητα που να αποτρέπει την εκάστοτε μηχανή από το να είναι λειτουργική. Γι' αυτόν το λόγο τα σφάλματα μεγαλύτερης σοβαρότητας αντιμετωπίζονται με διαδικασίες διακοπής λειτουργίας των μηχανών ώστε να αποφευχθεί η μόνιμη καταστροφή τους.[44]

Η διαδικασία που ακολουθείται στις διαγνωστικές μεθόδους είναι η εξής: μετά την λήψη των δεδομένων ανάλογα με την μέθοδο που έχει επιλεχθεί, πραγματοποιείται ανάλυση σήματος πάνω στα δεδομένα που συλλέχθηκαν και σε τελικό στάδιο η εύρεση ενός μοτίβου συμπεριφοράς πάνω στα επεξεργασμένα σήματα για την κατανόηση της επίδρασης του εκάστοτε σφάλματος με την μορφή αρμονικών. Σε αρκετές μεθόδους η συλλογή των δεδομένων γίνεται στο πεδίο του χρόνου και η ανάλυση σήματος στο πεδίο της συχνότητας με την κατάλληλη δειγματοληψία.[45]

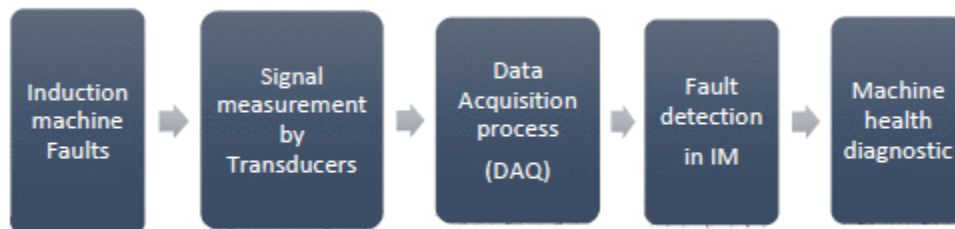


Figure 3.1 Διαδικασία διάγνωσης σφαλμάτων ηλεκτρικών μηχανών.[45]

### 3.1 MCSA

Η MCSA που αντιστοιχεί στα αρχικά Motor Current Signature Analysis είναι μία από τις πιο διαδεδομένους μεθόδους ανίχνευσης σφαλμάτων σε επαγωγικούς κινητήρες. Χρησιμοποιείται μαζί με διάφορες μεθόδους επεξεργασίας σήματος για την διάγνωση ύπαρξης λαθών που σχετίζονται με τον στάτη του κινητήρα κατά την μόνιμη κατάσταση.

Η παρακολούθηση του ρεύματος μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε κατά την εκκίνηση είτε κατά την μόνιμη κατάσταση της λειτουργίας του κινητήρα. Ανάλογα με την κάθε περίπτωση πρέπει να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος επεξεργασίας του κάθε σήματος.

Τα δεδομένα για αυτήν την μέθοδο συλλέγονται με έναν αισθητήρα ρεύματος(αμπεροτσιμπίδα) που παρακολουθεί την κυματομορφή του ρεύματος σε μια από τις φάσεις του κινητήρα. Κατά την παρακολούθηση της μόνιμης κατάστασης γίνεται η ανάλυση του σήματος εφαρμόζοντας FFT(Fast Fourier Transform) διεξάγοντας το φάσμα του ρεύματος, πάνω στο οποίο γίνεται η αναζήτηση και η ταυτοποίηση των υπογραφών σε συγκεκριμένες συχνότητες. Έτσι καταφέρνουμε την διάγνωση σφάλματος με την συγκεκριμένη μέθοδο.

Στην περίπτωση που θέλουμε να παρακολουθήσουμε το ρεύμα κατά την εκκίνηση του κινητήρα θα εφαρμόσουμε SFT(Short Fourier Transform) και θα εξάγουμε το αντίστοιχο φασματογράφημα με τις ανάλογες υπογραφές στην περίπτωση ύπαρξης σφάλματος.

Να σημειωθεί ότι η παρακολούθηση διεξάγεται κατά την λειτουργία του κινητήρα χωρίς την διακοπή του. Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε πως πρόκειται για μια απλή και φθηνή μέθοδο καθώς απαιτείται ένας αισθητήρας και μη διεισδυτική καθώς δεν απαιτείται η διακοπή λειτουργίας ή η αποσυναρμολόγηση του κινητήρα. Άρα η απλότητα και το χαμηλό κόστος είναι οι βασικοί λόγοι της ευρείας χρήσης αυτής της μεθόδου.[32]

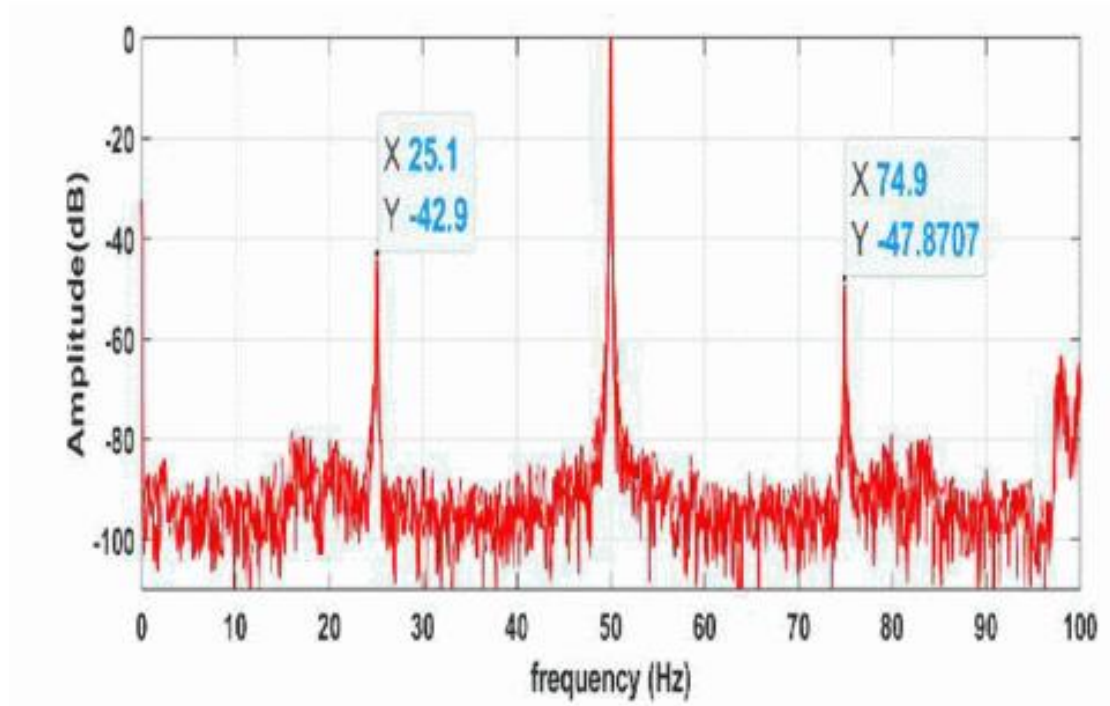


Figure 3.2 Εφαρμογή MCSA στην μόνιμη κατάσταση ενός κινητήρα.[43]

### 3.1.1 Συχνότητες που εμφανίζονται Υπογραφές Σφάλματος Στάτη στην Μόνιμη κατάσταση

Αναλύοντας το φάσμα του ρεύματος σε μια φάση η βασική αρμονική είναι στα 50 Hz δηλαδή η πρώτη. Οι υπόλοιπες αρμονικές εμφανίζονται σε συχνότητες που υπακούουν την παρακάτω εξίσωση:

$$f_{scIM} = \left[ kR \left( \frac{1-s}{p} \right) \pm 2n_{sa} \pm n \right] * f_s, \quad k \in N \quad (3.1)$$

Με R τον αριθμό των μπαρών του δρομέα, p τα ζεύγη των πόλων, s την τιμή της ολίσθησης στο σημείο λειτουργίας του κινητήρα, ο δείκτης **sa** αφορά τον κορεσμό της μηχανής, n ένας ακέραιος αριθμός που αφορά τις αρμονικές του στάτη και  $f_s$  η συχνότητα του μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί ο στάτης. [33]

Εάν στην **(3.1)** θέσουμε όπου  $2n_{sa} = 0$  και  $k, n = 1$  παίρνουμε συχνότητες που αφορούν τις PSH (Principal Slot Harmonics) με την παραπάνω σχέση να μετασχηματίζεται ως εξής:

$$f_{PSH} = \left[ \frac{R}{p} (1-s) \pm n \right] * f_s \quad (3.2)$$

Αξίζει να σημειωθεί πως σε συνδεσμολογία αστέρα οι αρμονικές τάξεως ακέραιου πολλαπλάσιου του 3 δεν εμφανίζονται στο φάσμα του ρεύματος κάτω από υγιή κατάσταση. Ωστόσο με την ύπαρξη βραχυκυκλώματος η Τρίτη αρμονική (150 Hz) παρουσιάζει αύξηση ανάλογη με την

σοβαρότητα του σφάλματος. Η αύξηση αυτή οφείλεται στην ασυμμετρία του μαγνητικού πεδίου εξαιτίας του βραχυκυκλώματος.

Όσον αφορά τις PSH, η εμφάνιση τους συνδέεται με τον αριθμό των μπαρών του δρομέα. Στην περίπτωση που ο αριθμός των μπαρών του δρομέα είναι άρτιος αλλά όχι ακέραιο πολλαπλάσιο του αριθμού των πόλων το αρμονικό αποτέλεσμα είναι ικανοποιητικό. Σε πραγματικές μηχανές, όπου παρουσιάζονται φυσικές ασυμμετρίες, το πλάτος τους είναι πολύ χαμηλό αλλά όχι

ακριβώς μηδέν. Η υπαρχή τους σχετίζεται άμεσα με τον βαθμό ασυμμετρίας και αποτελούν το πιο ευαίσθητο μέσο για την ανίχνευση βραχυκυκλώματος μεταξύ σπειρών, καθώς με την υπαρχή βραχυκυκλώματος το πλάτος των PSH θα αυξηθεί αισθητά.[33],[42]

### 3.2 Παρακολούθηση Μαγνητικής Ροής

Η υπαρχή ενός σφάλματος προκαλεί ασυμμετρίες στο μαγνητικό πεδίο του κινητήρα και η διαγνωστική μέθοδος που περιλαμβάνει την παρακολούθηση της μαγνητικής ροής του μπορεί να αναγνωρίσει την υπαρχή ενός σφάλματος. Όμοια με την MCSA αφού εξαχθούν τα δεδομένα παρακολούθησης της μαγνητικής ροής του κινητήρα και γίνει η κατάλληλη επεξεργασία τους, μπορούμε να ερευνήσουμε για μοτίβα συμπεριφοράς που υποδηλώνουν την υπαρχή σφάλματος. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί τόσο στην εκκίνηση όσο και στην μόνιμη κατάσταση του κινητήρα.

Μπορούμε να παρακολουθήσουμε την μαγνητική ροή του κινητήρα με δύο διακριτούς τρόπους: είτε την μαγνητική ροή στο διάκενο του κινητήρα ( Air Gap Flux Analysis) είτε την μαγνητική ροή που διαφεύγει εξωτερικά του κινητήρα (Stray Flux Analysis), με τον κάθε τρόπο να έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

Η SFA προϋποθέτει την τοποθέτηση αισθητήρων μαγνητικής ροής είτε στον άξονα του κινητήρα είτε στην περιφέρεια του κινητήρα, ενώ τις περισσότερες φορές τοποθετούνται αισθητήρες αξονικά και ακτινικά στον κινητήρα σε συνδυασμό. Οι αισθητήρες έχουν την μορφή μιας σπείρας με μεγάλο αριθμό τυλιγμάτων. Καταγράφουν μαγνητική ροή που διαπερνά το εξωτερικό του καλύμματος της μηχανής στην τάξη των millivolts. Η μαγνητική ροή που καταγράφεται είναι είτε μαγνητική ροή σκέδασης είτε η μαγνητική ροή που διαπερνά τον δρομέα.[35]

Τα πλεονεκτήματα της SFA είναι το χαμηλό κόστος καθώς και η πρακτικότητα της αφού οι αισθητήρες μπορούν να τοποθετηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να μην διακόπτεται η λειτουργία του κινητήρα. Ωστόσο η ευαισθησία της διαφέρει ανάλογα με την τάξη ισχύος του κινητήρα και των συνθηκών λειτουργίας τους όπως ο θόρυβος. Επίσης η αξιοπιστία αυτής της μεθόδου συνδέεται και με την τοποθέτηση των αισθητήρων.

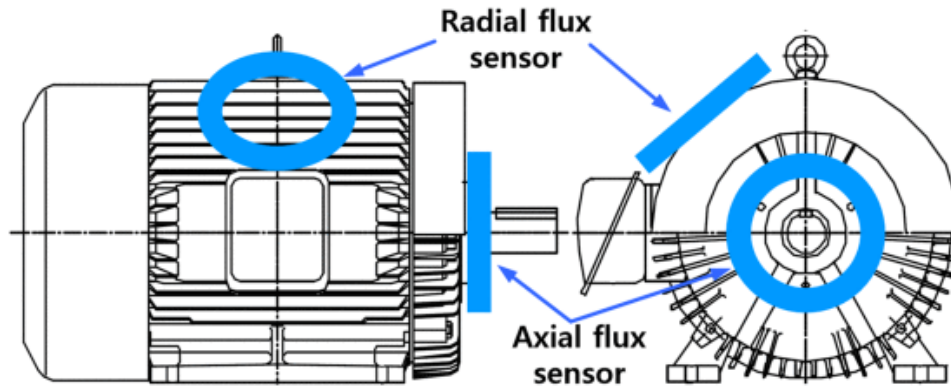


Figure 3.3 Τοποθέτηση αισθητήρων για SFA. [34]

Όσον αφορά την παρακολούθηση της μαγνητικής ροής του διακένου είναι απαραίτητη η τοποθέτηση αισθητήρων μαγνητικής ροής στο τύλιγμα του στάτη. Ο αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για αυτή την μέθοδο είναι κατασκευασμένοι με λίγα τυλίγματα και καταγράφει την αλλαγή του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του κινητήρα.[35]

Σε αυτόν τον τρόπο παρακολούθησης μαγνητικής ροής ο αισθητήρας είτε πρέπει να έχει τοποθετηθεί από τον κατασκευαστή και αν όχι πρέπει ο κινητήρας να διακόψει την λειτουργία του και να γίνει εκ νέου συναρμολόγηση του για να τοποθετηθεί ο αισθητήρας. Πρόκειται για μια διεισδυτική μέθοδο και η δυσκολία αυτή είναι το κύριο μειονέκτημα σε σχέση με την SFA. Ωστόσο αν ξεπεραστούν αυτά τα εμπόδια πρόκειται για μια μέθοδο που παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα με υψηλή ευαισθησία.

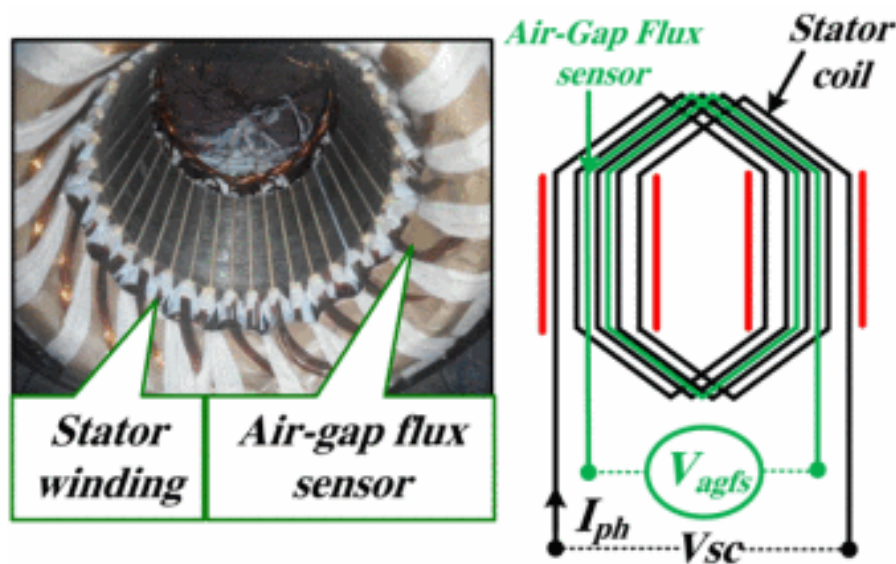


Figure 3.4 Αισθητήρες για AGFA.[35]

### 3.2.1 Υπογραφές Σφάλματος Στάτη με SFA[36]

Τα πλεονεκτήματα της SFA και η εκτεταμένη ανάγκη για παρακολούθηση της κατάστασης των κινητήρων οδήγησαν την έρευνα να αναπτύξει εξισώσεις για τις συχνότητες που εμφανίζονται υπογραφές σφαλμάτων. Σε αυτή την παράγραφο θα αναλυθούν οι υπογραφές για σφάλματα στάτη και πιο συγκεκριμένα για σφάλματα βραχυκυκλωμένων σπειρών.

Πριν αναλύσουμε τις εξισώσεις αυτές αξίζει να σημειωθεί πως αξονική ροή δεν υπάρχει σε μια υγιή μηχανή, αλλά στην πραγματικότητα έχουμε αξονική ροή από τις κεφαλές των τυλιγμάτων.

Αν υπάρχει σφάλμα τότε η υπογραφή του εμφανίζεται σε συχνότητες που υπακούν την παρακάτω εξίσωση:

$$f_{sc} = \left(k \pm n \frac{1-s}{p}\right) * f_s \quad (3.3)$$

Με  $k$  την τάξη αρμονικών του στάτη,  $n$  η τάξη των χωριών αρμονικών,  $s$  η ολίσθηση,  $p$  τα ζεύγη των πόλων και  $f_s$  η συχνότητα του μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί ο στάτης.

Αναλύοντας στο πεδίο της συχνότητας το σήμα που έχουν καταγράψει οι αισθητήρες αυτής της μεθόδου, παρατηρούμε πως η Τρίτη βασική αρμονική στα 150 Hz είναι ήδη ισχυρή.

Τέλος επειδή η μαγνητική ροή εξαρτάται άμεσα από το ρεύμα αν υπάρχει σφάλμα τότε θα αυξηθεί το πλάτος της 9<sup>ης</sup> αρμονικής στα 450 Hz καθώς και το πλάτος των PSH.

### 3.3 Park's Vector Approach

Αυτή η μέθοδος διάγνωσης σφαλμάτων είναι από τις πιο βασικές σε τριφασικές μηχανές και ιδίως σε επαγωγικούς κινητήρες. Στους επαγωγικούς κινητήρες η κύρια πρόκληση για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς τους είναι το γεγονός πως η επαγωγή τους εξαρτάται από την μηχανική και ηλεκτρική γωνία μεταξύ στάτη και δρομέα. Ο R.H Park έδωσε μια απλή προσέγγιση στην συμπεριφορά του κινητήρα μετασχηματίζοντας τα τρία ρεύματα, ένα για κάθε φάση, σε δύο συνιστώσες και τις απεικόνισε σε ένα κοινό σύστημα ορθογώνιων αξόνων. Το σκεπτικό στην προσέγγιση του Park είναι ότι λόγω της απουσίας ομοπολικού ρεύματος ή ρεύματος μηδενικής ακολουθίας σε υγιή κατάσταση, ο γεωμετρικός τόπος των δύο συνιστωσών θα είναι ένας τέλεια ζυγισμένος κύκλος. Σε οποιαδήποτε περίπτωση σφάλματος που προκαλεί ασυμμετρίες στο σύστημα, η ασυμμετρία αυτή θα αποτυπωθεί με μια μετατόπιση του γεωμετρικού τόπου στο διάγραμμα των κοινών αξόνων, κάνοντας την διάγνωση λαθών απλή και εύκολη. Το μαθηματικό υπόβαθρο στην προσέγγιση του Park για τον υπολογισμό των συνιστωσών των ρευμάτων  $I_d$  και  $I_q$  αναλύεται παρακάτω:

$$i_d = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} i_a - \frac{1}{\sqrt{6}} i_b - \frac{1}{\sqrt{6}} i_c \quad (3.4) \quad \text{και} \quad i_q = \frac{1}{\sqrt{2}} i_b - \frac{1}{\sqrt{2}} i_c \quad (3.5)$$



Με  $i_a$  το ρεύμα της πρώτης φάσης,  $i_b$  το ρεύμα της δεύτερης φάσης και  $i_c$  το ρεύμα της τρίτης φάσης του κινητήρα. [32],[38]

Για την συγκεκριμένη μέθοδο παρακολούθησης χρειαζόμαστε τρεις αισθητήρες που να καταγράφουν το ρεύμα στις τρεις φάσεις και έναν μαθηματικό αλγόριθμο που να υπολογίζει τις παραπάνω συνιστώσες και να της απεικονίζει σε ένα ορθοκανονικό σύστημα αξόνων. Να σημειωθεί επίσης πως η παρακολούθηση των ρευμάτων γίνεται κατά την λειτουργία του κινητήρα και δεν χρειάζεται η διακοπή του, οπότε πρόκειται για μια μη διεισδυτική μέθοδο.

Όπως έχει αναφερθεί σε υγιή κατάσταση ο γεωμετρικός τόπος των συνιστωσών είναι κύκλος. Στην εμφάνιση σφάλματος βραχυκυκλωμένων σπειρών ο γεωμετρικός τόπος από κύκλος μετατρέπεται σε έλλειψη, ενώ το κέντρο του μετατοπίζεται προς μια κατεύθυνση ανάλογα σε ποια φάση εκδηλώνεται το σφάλμα και την σοβαρότητα του.[37]

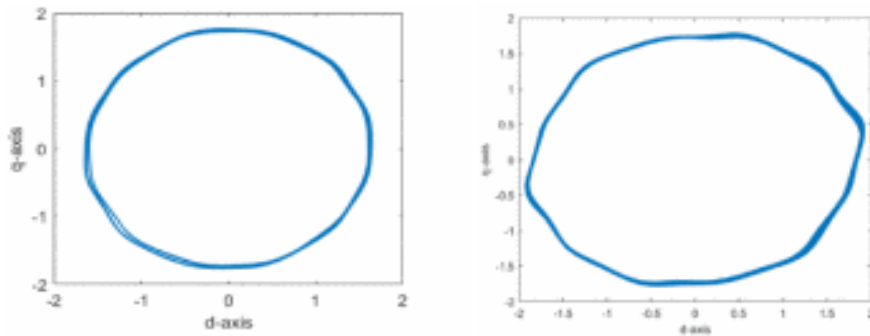


Figure 3.5 Park 's Vector approach. Αριστερά υγιή κατάσταση δεξιά με σφάλμα βραχυκυκλωμένης σπείρας.[37].

### 3.4 Extended Park's Vector Approach

Παρά την απλότητα του Park's Vector Approach, δεν έχει την κατάλληλη ευαισθησία για την ανίχνευση του είδους του σφάλματος σε έναν επαγωγικό κινητήρα. Γι' αυτό τον λόγο αναπτύχθηκε το Extended Park's Vector Approach. Σε αυτήν την μέθοδο υπολογίζονται οι συνιστώσες  $i_d$  και  $i_q$  ακριβώς όπως το PVA. Κάτω από υγιείς συνθήκες η διαφορά φάσης τους ισούται με 90 μοίρες. Έπειτα υπολογίζεται το πλάτος των  $i_d$  και  $i_q$  με την βοήθεια του τύπου

$$I_{mod} = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (3.6)$$

Έτσι σε υγιή λειτουργία, δηλαδή υπό συμμετρική τάση και κανένα σφάλμα βραχυκυκλωμένων σπειρών εμφανίζεται μόνο μια DC συνιστώσα σταθερή στον χρόνο. Στην περίπτωση εμφάνισης ασυμμετρίας εμφανίζεται αρμονικό ταλαντευόμενο περιεχόμενο το οποίο είναι ισχυρό ιδίως στα άρτια πολλαπλάσια της βασικής συχνότητας( $f_s$ ). Υπό πραγματικές συνθήκες υπάρχουν έμφυτες ασυμμετρίες οπότε αρμονικές εμφανίζονται και στην υγιή κατάσταση ενός κινητήρα, αλλά το πλάτος τους είναι ιδιαίτερα χαμηλό.

Συνοψίζοντας πρόκειται για μια μέθοδο που έχει ακριβώς τις ίδιες απαιτήσεις με το PVA για να εφαρμοστεί ενώ χρειάζεται μια επιπλέον επεξεργασία σήματος. Δεδομένου όμως ότι υπάρχει μεγαλύτερη ευαισθησία και ικανότητα ταυτοποίησης για το είδος σφάλματος πρόκειται για μια βελτιωμένη μέθοδο διάγνωσης σε σχέση με την απλή εκδοχή του.[38]

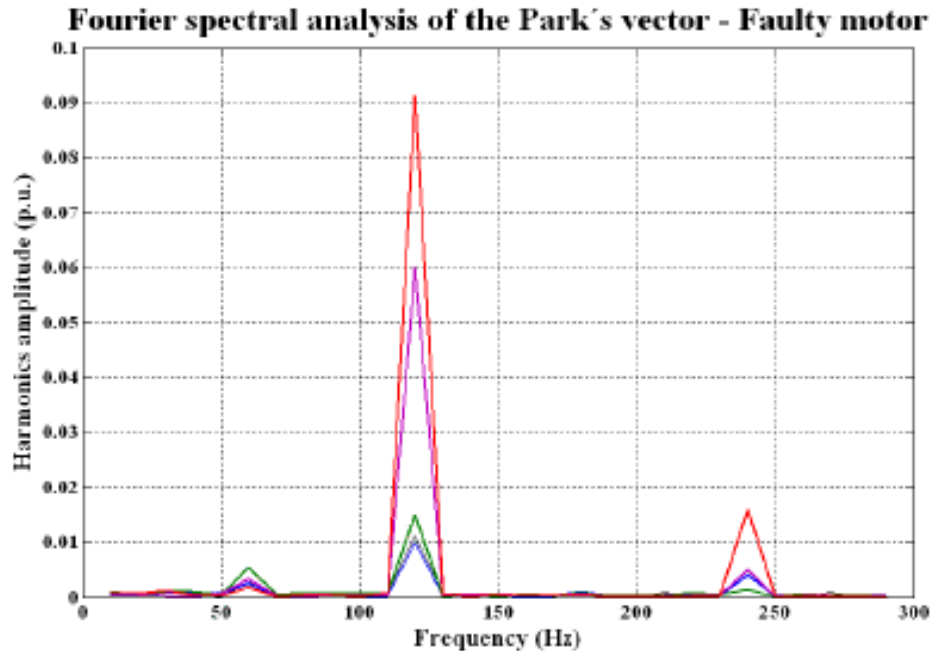


Figure 3.6 Προσέγγιση Extended Park Vector.[38].

### 3.6 Παρακολούθηση Ροπής

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή παράγεται από την αλληλεπίδραση των μαγνητικών ροών και των ρευμάτων του κινητήρα. Περιέχει αρμονικό περιεχόμενο που εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως την ηλεκτρεγερτική δύναμη του στάτη και του δρομέα, τον κορεσμό του κινητήρα και τις αρμονικές που παράγει ο στάτης.[21].

Για την ανίχνευση ηλεκτρικών σφαλμάτων στάτη δεν υπάρχει συγκεκριμένη σχέση η οποία να φανερώνει τις συχνότητες που θα εμφανιστεί υπογραφή σφάλματος σε αντίθεση με τα ηλεκτρικά σφάλματα δρομέα όπου οι συχνότητες υπογραφής σφάλματος υπακούουν στην εξίσωση :

$$f_{bb} = 2ksf_s. \quad (3.6)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την συνεισφορά του στάτη και του δρομέα στην ροπή ακόμα και στην μη ύπαρξη σφάλματος εμφανίζεται αρμονικό περιεχόμενο γύρω στα 300 Hz.



Κατά την λειτουργία της μηχανής η ροπή μπορεί να μετρηθεί είτε με αισθητήρες(ροπόμετρο) είτε να γίνει η εκτίμησή της. Σε πραγματικές εφαρμογές η εγκατάσταση του ροπόμετρου είναι ακριβή και μη πρακτική, ενώ η εκτίμηση της μέσω τάσεων και ρευμάτων είναι πιο πρακτική και εύκολη οπότε προτιμάται. Για να γίνει η εκτίμηση της ροπής υπολογίζονται τα ρεύματα στον d και q άξονα του επαγωγικού κινητήρα είτε με την βοήθεια των φασικών ρευμάτων είτε με δύο ρεύματα γραμμής. Το ίδιο ισχύει και με τις τάσεις.

Αφού μετρηθεί ή εκτιμηθεί η ροπή μπορούμε είτε να επεξεργαστούμε μέσω FFT στην μόνιμη κατάσταση του κινητήρα ώστε να πάρουμε το φάσμα της, είτε με SFT στην εκκίνηση του για να πάρουμε το φάσμα της εκκίνησης του κινητήρα.

Πάνω στο φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ροπής γίνεται η προσπάθεια ανίχνευσης υπογραφών σφαλμάτων και η έγκυρη διάγνωσή τους.

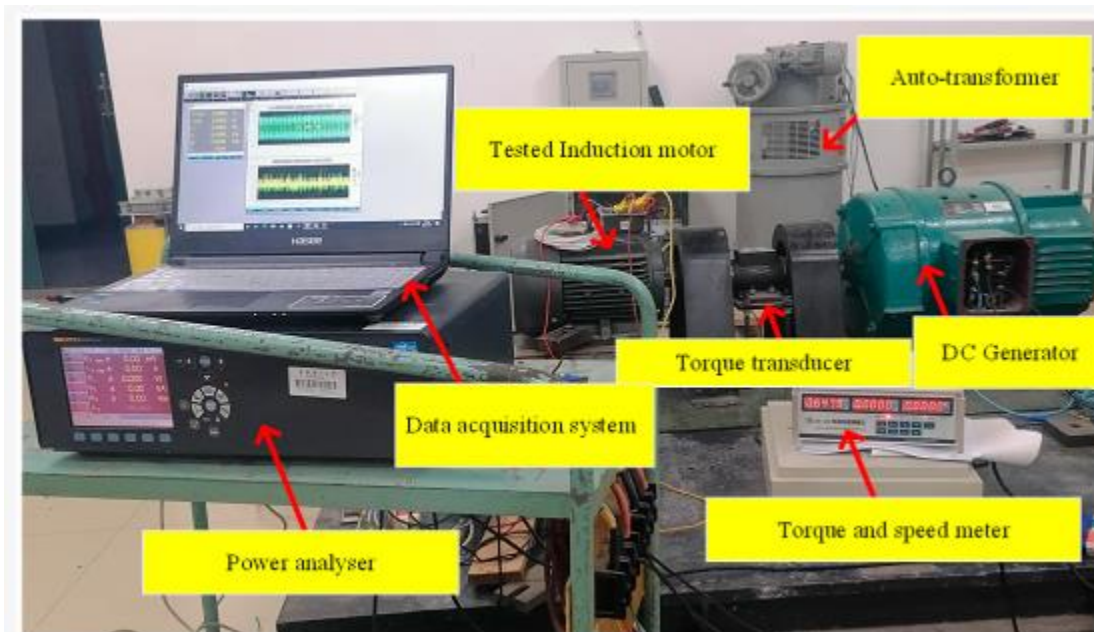


Figure 3.7 Testbench για παρακολούθηση ροπής.

## Κεφάλαιο 4. Η Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων

Οι αριθμητικές μέθοδοι, και ιδίως η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Analysis – FEA), εφαρμόζονται ευρέως στη μοντελοποίηση, τον σχεδιασμό και την ανάλυση ηλεκτρικών μηχανών, λόγω της εξαιρετικής υπολογιστικής τους ακρίβειας και της ενσωμάτωσής τους σε πληθώρα εμπορικών λογισμικών. Οι ηλεκτρικές μηχανές αποτελούν σύνθετα συστήματα, τα οποία ενσωματώνουν πολύπλοκες γεωμετρικές δομές, ηλεκτρικά κυκλώματα, μαγνητικά πεδία και μηχανικές κινήσεις. Η αξιόπιστη μοντελοποίησή τους απαιτεί την επίλυση μη γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες απορρέουν από τους νόμους του Maxwell και συζευγνύονται με τις ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών, καθώς και με πρόσθετα φαινόμενα, όπως η κίνηση κινούμενων μερών.[1]

Αξίζει να σημειωθεί πως το βασικό σκεπτικό πίσω από αυτού του είδους την ανάλυση είναι η υποδιαίρεση του κάθε συστήματος σε μικρότερα στοιχεία τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Έπειτα από αυτή την υποδιαίρεση στον χώρο προκύπτει το πλέγμα του προβλήματος (mesh). Τα στοιχεία του πλέγματος συνδέονται σε κοινές τοποθεσίες, τους κόμβους, και καθένα περιγράφεται από ένα απλοποιημένο σύστημα εξισώσεων, που καθιστά τη λύση υπολογιστικά ευκολότερη σε σχέση με την αρχική μορφή του προβλήματος. Η κρισιμότητα της πυκνότητας του πλέγματος και η επιρροή της στον χρόνο επίλυσης του προβλήματος θα αναλυθεί παρακάτω ενδελεχώς. [3]

Στην περίπτωση μας, δεδομένου ότι μελετάμε έναν επαγωγικό κινητήρα, το λογισμικό που επελέχθη είναι το SimCenter MAGNET της Siemens. Αυτό το λογισμικό μας επιτρέπει την πραγματοποίηση της προαναφερθείσας υποδιαίρεσης του συστήματος σε πεπερασμένα στοιχεία καθώς και την επίλυση της συνήθους διαφορικής εξίσωσης που αντιστοιχεί σε κάθε στοιχείο.

Η μέθοδος Galerkin αξιοποιείται για την προσέγγιση των μερικών διαφορικών εξισώσεων με απλούστερες μορφές, διευκολύνοντας έτσι την επίλυσή τους. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση της δυναμικής ανάλυσης, οι μερικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το εξεταζόμενο φαινόμενο μετατρέπονται σε συνήθεις διαφορικές εξισώσεις. Αντίστοιχα, όταν εξετάζεται η μόνιμη κατάσταση, η προσέγγιση πραγματοποιείται μέσω πολυωνυμικών εξισώσεων.[2]

Καταλήγουμε με αυτόν τον τρόπο στο να έχουμε για κάθε ένα στοιχείο του προβλήματος ένα σύνολο απλών εξισώσεων οι οποίες ικανοποιούν τις συνοριακές και αρχικές συνθήκες που επιβάλλονται στο πρόβλημα.

Κατά την διάρκεια αυτής της διαδικασίας, η επίλυση των εξισώσεων για κάθε στοιχείο επηρεάζεται από τα παρακείμενα στοιχεία του συστήματος. Για να προκύψει η τελική λύση του

προβλήματος ,αφού επιλυθεί το σύνολο των εξισώσεων που αντιστοιχεί σε κάθε στοιχείο ,οι λύσεις αυτές συνενώνονται για να σχηματίσουν την καθολική λύση του προβλήματος η οποία αντανακλά με μεγάλη ακρίβεια την πραγματική ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά ενός επαγωγικού κινητήρα. Η εν λόγω προσέγγιση λαμβάνει υπόψη τις σύνθετες εσωτερικές αλληλεπιδράσεις του κινητήρα και συμβάλλει στην εις βάθος κατανόηση της λειτουργικής του συμπεριφοράς.

#### 4.1 FEA και Μέθοδοι Αποσφαλμάτωσης Κινητήρων

Όπως προαναφέρθηκε η σύσταση του πλέγματος(mesh) παίζει καθοριστικό ρόλο στην προσομοίωση του εκάστοτε μοντέλου. Αυξάνοντας την πυκνότητα του πλέγματος τόσο βελτιώνεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Λαμβάνοντας υπ' όψη πως σε κάθε αριθμητική μέθοδο η απόλυτη ακρίβεια των αποτελεσμάτων είναι αδύνατη καθώς και το γεγονός πως η αύξηση της πυκνότητας του πλέγματος αυξάνει επίσης τον χρόνο και τους υπολογιστικούς πόρους που απαιτούνται για την επίλυση του προβλήματος, πρέπει να βρεθεί η βέλτιστη τιμή του.

Το SimCenter Magnet μας δίνει την δυνατότητα αλλαγής της προαναφερθείσας μεταβλητής είτε για όλο το μοντέλο συνολικά, είτε για κάθε στοιχείο του ξεχωριστά.

#### 4.2 Οι εξισώσεις που επιλύονται στο λογισμικό SimCenter Magnet[2] ,[3]

Με τη χρήση των θεωρημάτων Gauss και Stokes, μπορούμε να μετατρέψουμε τις ολοκληρωτικές μορφές των εξισώσεων του Maxwell στις αντίστοιχες διαφορικές τους μορφές. Αυτή η μετάβαση επιτρέπει την ανάλυση των εξισώσεων σε συγκεκριμένα σημεία του χώρου, με την προϋπόθεση ότι όλα τα μεγέθη των πεδίων και οι παράγωγοί τους παρουσιάζουν συνέχεια. Έτσι, επιτυγχάνουμε μια σαφέστερη και πιο τοπική κατανόηση της συμπεριφοράς των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου.

Φέροντας τον Νόμο Maxwell στην διορθωμένη μορφή του για μεταβαλλόμενα ή στρεφόμενα μαγνητικά πεδία προκύπτει η εξής σχέση :

**Νόμος Faraday :**

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (4.1)$$

*όπου:*

- $\nabla \times \mathbf{E}$  είναι η περιστροφή του ηλεκτρικού πεδίου  $\mathbf{E}$ .

- $B$  είναι το μαγνητικό πεδίο.
- $-\frac{\partial B}{\partial t}$  είναι ο ρυθμός μεταβολής του μαγνητικού πεδίου με το χρόνο.

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει πως ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο προκαλεί την εμφάνιση ενός ηλεκτρικού πεδίου, το οποίο είναι στροβιλώδες (δηλαδή δεν μπορεί να περιγραφεί απλώς ως πεδίο που προκύπτει από στατικά φορτία).

### Νόμος Maxwell–Ampère:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (4.2)$$

όπου:

- $\nabla \times \mathbf{H}$  είναι η περιστροφή του μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{H}$ .
- $\mathbf{J}$  είναι η πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος αγωγιμότητας.
- $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$  είναι ο ρυθμός μεταβολής του μαγνητικού πεδίου με το χρόνο.

Ο νόμος αυτός περιγράφει ότι ένα ηλεκτρικό ρεύμα ( $\mathbf{J}$ ) και ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο (δηλαδή μια μεταβαλλόμενη ηλεκτρική μετατόπιση  $\mathbf{D}$ ) δημιουργούν γύρω τους ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{H}$ .

Αυτό αποτελεί τη θεμελιώδη σχέση που συνδέει τα ηλεκτρικά ρεύματα και τις χρονικές μεταβολές του ηλεκτρικού πεδίου με τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου.

### Νόμος του Gauss :

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (4.3)$$

Όπου:

- $\nabla \cdot \mathbf{D}$  είναι η διάκλαση (divergence) του ηλεκτρικού διανύσματος  $\mathbf{D}$  (ηλεκτρική μετατόπιση).  
Μετράει πόσο «πηγάξει» το πεδίο  $\mathbf{D}$  από ένα σημείο, δηλαδή την καθαρή ροή ηλεκτρικού πεδίου που βγαίνει από έναν μικρό όγκο.
- $\rho$  είναι η πυκνότητα του ηλεκτρικού φορτίου σε ένα σημείο (φορτίο ανά μονάδα όγκου).

Η εξίσωση αυτή περιγράφει ότι η απόκλιση (divergence) του διανύσματος ηλεκτρικής μετατόπισης  $\mathbf{D}$  ισούται με την πυκνότητα φορτίου ( $\rho$ ) στο συγκεκριμένο σημείο του χώρου.

Πρόκειται για θεμελιώδη εξίσωση που εκφράζει τη σύνδεση ανάμεσα στα ηλεκτρικά φορτία και στο ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργούν.

**Εξίσωση Συνέχειας :**

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (4.4)$$

**Όπου:**

- $\nabla \cdot \mathbf{J}$  είναι η διάκλαση (divergence) του διανύσματος πυκνότητας ρεύματος  $\mathbf{J}$ .  
Υποδεικνύει πόσο «πηγάξει» ή «βυθίζεται» ρεύμα σε ένα σημείο, δηλαδή αν το ρεύμα σε ένα σημείο συγκεντρώνεται ή διαχέεται.
- $\rho$  είναι η πυκνότητα φορτίου (η ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου ανά μονάδα όγκου).
- $-\frac{\partial \rho}{\partial t}$  είναι ο ρυθμός μεταβολής της πυκνότητας φορτίου με το χρόνο, δηλαδή πόσο γρήγορα αλλάζει το φορτίο μέσα σε έναν όγκο.

Η εξίσωση συνέχειας εκφράζει την αρχή διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου.

Δηλαδή, αναφέρει πως η απόκλιση (**divergence**) της πυκνότητας ρεύματος ( **$\mathbf{J}$** ) σε ένα σημείο ισούται με τον αρνητικό ρυθμό μεταβολής της πυκνότητας φορτίου ( **$\rho$** ) στο ίδιο σημείο.

Με άλλα λόγια, δείχνει ότι το φορτίο δεν μπορεί να δημιουργηθεί ή να καταστραφεί, αλλά μόνο να μετακινηθεί ή να συσσωρευτεί σε ένα σημείο.

**Νόμος του Gauss στο μαγνητικό πεδίο :**

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4.5)$$

**Όπου:**

- $\nabla \cdot \mathbf{B}$  είναι η διάκλαση (divergence) του μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{B}$ .  
Μετράει την «πηγή» ή «καταβύθιση» του μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο.

Ανάλογα με την φύση του προβλήματος είναι αναγκαία η επιλογή των κατάλληλων εξισώσεων. Τα προβλήματα διακρίνονται σε αρμονικά και μαγνητοστατικά. Στην πρώτη κατηγορία τα μεγέθη είναι μεταβαλλόμενα στον χρόνο και ημιτονοειδή, ενώ στην δεύτερη κατηγορία τα μεγέθη είναι χρονικά σταθερά.

#### 4.3 Επίλυση Μαγνητοστατικών και Αρμονικών Προβλημάτων [4]

Στην περίπτωση των μαγνητοστατικών προβλημάτων οι εξισώσεις (4.1), (4.2), (4.4) γράφονται ως:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (4.6)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (4.7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (4.8)$$

Μια ακόμη χρήσιμη σχέση που συνδέει την μαγνητική επαγωγή με την ένταση του μαγνητικού πεδίου μέσω της μαγνητικής διαπερατότητας του εκάστοτε υλικού  $\mu$  :

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (4.9)$$

Για την επίλυση των εξισώσεων του Maxwell, είναι δυνατό να μετασχηματιστούν οι διαφορικές εξισώσεις πρώτης τάξης —οι οποίες περιλαμβάνουν δύο μεγέθη του πεδίου— σε εξισώσεις δεύτερης τάξης που περιγράφουν μόνο ένα από αυτά. Η διαδικασία αυτή θα παρουσιαστεί στη συνέχεια, εστιάζοντας στην περίπτωση του μαγνητοστατικού πεδίου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το μαγνητοστατικό πεδίο περιγράφεται από τις εξισώσεις **4.5** και **4.7**. Η εξίσωση 4.5 μπορεί να ικανοποιηθεί αν το μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{B}$  εκφραστεί με την ακόλουθη μορφή:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (4.10)$$

Με αυτόν τον τρόπο, διασφαλίζεται ότι ικανοποιείται η συνθήκη μηδενικής απόκλισης του  $\mathbf{B}$ , δηλαδή  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ , όπως απαιτείται από τον νόμο του Gauss για το μαγνητικό πεδίο.

Αντικαθιστώντας την σχέση **4.10** στην σχέση **4.7** και συνδυάζοντας την **4.9** οδηγούμαστε στην επίλυση της παρακάτω εξίσωσης :

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (4.11)$$

Για γραμμικό και ισотροπικό μέσο έχουμε :

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} = \mathbf{J} \quad (4.12)$$

Τώρα για την περίπτωση των αρμονικών προβλημάτων έχει αναφερθεί πως το μαγνητικό πεδίο, από χρονικά σταθερό, γίνεται χρονικά μεταβαλλόμενο. Το γεγονός αυτό είναι αιτία εμφάνισης δινορευμάτων Foucault σε οποιοδήποτε υλικό χαρακτηρίζεται από  $\sigma$  αγωγιμότητα. Τώρα η πυκνότητα του ρεύματος  $\mathbf{J}$  είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με αυτή την αγωγιμότητα  $\sigma$  και ανάλογη της έντασης του μαγνητικού πεδίου  $\mathbf{E}$  όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (4.13)$$

Στην συνέχεια συνδυάζοντας την **4.1** και την **4.10** η τελική εξίσωση που προκύπτει είναι η :

$$\nabla \times E = -\nabla \times \left( \frac{\partial A}{\partial t} \right) \quad (4.14)$$

Αυτή η εξίσωση δηλώνει ότι το στροφικό του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  ισούται με το αρνητικό στροφικό της χρονικής παραγώγου του διανυσματικού δυναμικού  $A$ , και προκύπτει στο πλαίσιο αρμονικών ή χρονικά μεταβαλλόμενων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.

Τέλος συνδυάζοντας την παραπάνω σχέση με την **1.12** προκύπτει η εξίσωση:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (4.15)$$

Είναι σημαντικό να μην ξεχάσουμε πως όταν μελετάμε έναν κινητήρα συμπλεγμένο με φορτίο η παρακάτω εξίσωση παίζει σημαντικό ρόλο:

$$T = J \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \quad (4.16)$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι η διαφορική μορφή του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα για περιστροφική κίνηση, και εκφράζει τη σχέση μεταξύ της ροπής που ασκείται σε ένα σώμα και της γωνιακής του επιτάχυνσης.

- Όπου  $J$  είναι η ροπή αδράνειας που εξαρτάται από τη μάζα και τη γεωμετρία του σώματος και εκφράζει την αντίστασή του στην αλλαγή περιστροφής,  $T$ : Η ροπή (torque), δηλαδή η δύναμη που προκαλεί περιστροφή γύρω από έναν άξονα και  $\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2}$  η γωνιακή επιτάχυνση, δηλαδή ο ρυθμός μεταβολής της γωνιακής ταχύτητας με τον χρόνο.

Τέλος η συνολική ροπή εκφράζεται ως το παρακάτω άθροισμα :

$$T = T_{em} + T_L + T_F \quad (1.17)$$

Όπου  $T_{em}$  ηλεκτρομαγνητική ροπή,  $T_L$  η ροπή του φορτίου και  $T_F$  η ροπή των τριβών ή απωλειών.

#### 4.4 Υλοποίηση της FEA μέσω του λογισμικού SimCenter Magnet[3]

Ένα ακόμα κρίσιμο κομμάτι της προσομοίωσης είναι η συμπερίληψη ενός εξωτερικού κυκλώματος που αντικατοπτρίζει το πραγματικό κύκλωμα του κινητήρα το οποίο διασφαλίζει την ακριβή μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του κινητήρα.



Παρακάτω παρουσιάζεται βήμα-βήμα η υλοποίηση της Ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων (FEA) για έναν επαγωγικό κινητήρα:

- 1) Η γεωμετρία του κινητήρα εισάγεται στο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού SimCenter Magnet και κατασκευάζεται το αντίστοιχο μοντέλο είτε σε δισδιάστατη είτε σε τρισδιάστατη μορφή.
- 2) Αφού ολοκληρωθεί η δημιουργία της γεωμετρίας του μοντέλου, ακολουθεί η διαδικασία διαχωρισμού του σε μικρότερα τμήματα, γνωστά ως πεπερασμένα στοιχεία, και η κατασκευή του πλέγματος. Σε αυτό το στάδιο, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ρυθμίσει την πυκνότητα του πλέγματος, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ισορροπία μεταξύ της ακρίβειας της προσομοίωσης και του υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται για την επίλυσή της. Παράλληλα, επιλέγεται το είδος της ανάλυσης – γραμμική ή μη γραμμική – και ορίζονται βασικές παράμετροι, όπως οι οριακές συνθήκες και τα υλικά χαρακτηριστικά. Όλες αυτές οι ρυθμίσεις πραγματοποιούνται μέσω ειδικών λογισμικών που λειτουργούν ως προεπεξεργαστές (pre-processors).
- 3) Αφού ολοκληρωθεί η δημιουργία του πλέγματος και η εισαγωγή όλων των απαραίτητων δεδομένων, τη διαδικασία αναλαμβάνει ο επιλυτής (solver). Πρόκειται για ένα υπολογιστικό εργαλείο που εφαρμόζει προαναφερθείσες αριθμητικές τεχνικές για την επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν τη λειτουργία και τη συμπεριφορά του κινητήρα. Μέσω αυτής της διαδικασίας, υπολογίζονται κρίσιμες παράμετροι, όπως τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, τα ηλεκτρικά ρεύματα, οι τάσεις, οι αναπτυσσόμενες ροπές και άλλες σημαντικές φυσικές ποσότητες.
- 4) Μετά την επίλυση του προβλήματος τα αποτελέσματα επεξεργάζονται από τους μετεπεξεργαστές (post-processors). Αυτό το βήμα μας επιτρέπει να οπτικοποιήσουμε τα αποτελέσματα καθώς και να εκτιμήσουμε την συμπεριφορά του κινητήρα.

Τα βήματα παρουσιάζουν με περιεκτικό τρόπο την εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης Πεπερασμένων Στοιχείων στο περιβάλλον του SimCenter Magnet , η οποία μετατρέπει το μοντέλο από συνεχές σε διακριτό. Έτσι επιτυγχάνεται η προσομοίωση της λειτουργίας μιας ηλεκτρικής μηχανής σε βαθμό που ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

## Κεφάλαιο 5. Μοντελοποίηση του Κινητήρα

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί ο τρόπος που σχεδιάστηκε στο λογισμικό που επιλέξαμε ο επαγωγικός κινητήρας. Πρόκειται για έναν κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού, βιομηχανικής εφαρμογής. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του κινητήρα:

Συνδεσμολογία Στάτη	Αστέρας
Μπάρες Δρομέα	70
Αύλακες Στάτη	54
Ζεύγη Πόλων	3
Ονομαστική Ισχύς	1.14 MW
Ονομαστική Τάση	6.6 kV
Ονομαστική Ροπή	11 kNm

Table 5.1 Χαρακτηριστικά του Υπό Μελέτη Επαγωγικού Κινητήρα.

### 5.1 Γεωμετρία του Κινητήρα

Σχεδιάσαμε τον κινητήρα που παρουσιάστηκε στο παραπάνω πίνακα χρησιμοποιώντας το λογισμικό της Siemens, SimCenter Magnet. Το διάκενο αέρα μεταξύ στάτη και δρομέα σχεδιάστηκε ως πολλαπλά στρώματα αέρα διασφαλίζοντας έτσι την ακρίβεια της ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης. Επίσης δημιουργήθηκε ένα στρώμα αέρα που περικλείει τον κινητήρα (air-box). Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως το πρώτο βήμα ήταν ο καθορισμός της μονάδας μήκους που χρησιμοποιήθηκε για το μοντέλο σε mm. Αυτό επετεύχθη κάνοντας δεξί κλικ με το ποντίκι το **project\_name.mn** → **Properties** → **Units** → **Length** και επιλέγοντας τα χιλιοστά από το μενού των επιλογών.

#### 5.1.1 Εξωτερικό στρώμα αέρα (air-box)

Στο μενού Draw κάνουμε κλικ την επιλογή **Circle** και, αφού έχουμε ενεργοποιήσει την μπάρα εισόδου από το πληκτρολόγιο (keyboard input bar) από την γραμμή των εργαλείων (**Tools** → **Keyboard Input Bar**), πληκτρολογούμε ως κέντρο το σημείο **(0,0)** και ακτίνα το σημείο **(0,600)** προκύπτει ένας κύκλος με κέντρο το **(0,0)** με ακτίνα 600 mm.

#### 5.1.2 Εσωτερικοί Διάμετροι και Διάκενο

Στο σχέδιο που μας δόθηκε δεν υπήρχε το διάκενο που είναι σημαντικό για την λειτουργία του κάθε κινητήρα. Πιο συγκεκριμένα η εξωτερική διάμετρος του στάτη ήταν 430 mm και η εσωτερική του διάμετρος 290 mm, ενώ η εξωτερική διάμετρος του δρομέα ήταν 280 mm και η εσωτερική του 167.5 mm. Έτσι αποφασίστηκε να ελαττωθεί η εξωτερική διάμετρος του δρομέα κατά 2 mm και τα υπόλοιπα μεγέθη να διατηρηθούν ως έχουν.

### 5.1.3 Αύλακες Στάτη

Ως αρχικό βήμα θα σχεδιάσουμε μια γραμμή που ξεκινάει από το κέντρο ως την εξωτερική διάμετρο του στάτη. Αυτή η γραμμή χρησιμοποιείται ως **γραμμή αναφοράς**. Επιλέγουμε από το μενού **Draw** την επιλογή **Add Line**. Χρησιμοποιώντας το πληκτρολόγιο δημιουργούμε την γραμμή που ξεκινάει από το σημείο **(0.0)** ως το σημείο **(0,430)**.

Στην συνέχεια πάλι με την επιλογή **Add Line** και σαν είσοδο το πληκτρολόγιο σχεδιάζουμε την μισή αύλακα. Έπειτα διαλέγουμε τις άκρες(edges) της μισής αύλακας και χρησιμοποιούμε την επιλογή **Mirror Edges (Draw → Mirror Edges)** ώστε να τις αντικατοπτρίσουμε σε σχέση με την γραμμή αναφοράς που σχεδιάσαμε προηγουμένως.



Figure 5.1 Γεωμετρία Αύλακα Στάτη.

Για την δημιουργία των υπόλοιπων αυλάκιων του στάτη θα χρησιμοποιήσουμε την επιλογή **Rotate Edges**. Αφού επιλέξουμε την γωνία  $6.667^\circ$  που θέλουμε να γίνει η περιφορά (αν κάνουμε την διαίρεση  $\frac{360}{54} = 6.667^\circ$ , όπου 54 ο αριθμός των αυλάκιων) και τον αριθμό 53 ως αντίγραφα που επιθυμούμε να δημιουργήσουμε έχουμε δημιουργήσει έτσι όλες τις αύλακες του στάτη.

### 5.1.4 Μπάρες Δρομέα

Ακολουθούμε ακριβώς την ίδια διαδικασία για μια αύλακα του δρομέα. Αρχικά χρησιμοποιώντας την γραμμή αναφοράς σχεδιάζουμε την μισή μπάρα του δρομέα. Έπειτα με την χρήση του **Mirror Edges** σχεδιάζουμε ολόκληρη την μπάρα και τέλος επιλέγοντας γωνία  $5.15^\circ$  (αν κάνουμε την διαίρεση  $\frac{360}{70} = 5.15^\circ$ , όπου 70 ο αριθμός των μπαρών) και 69 των αριθμό των υπόλοιπων μπαρών του δρομέα.

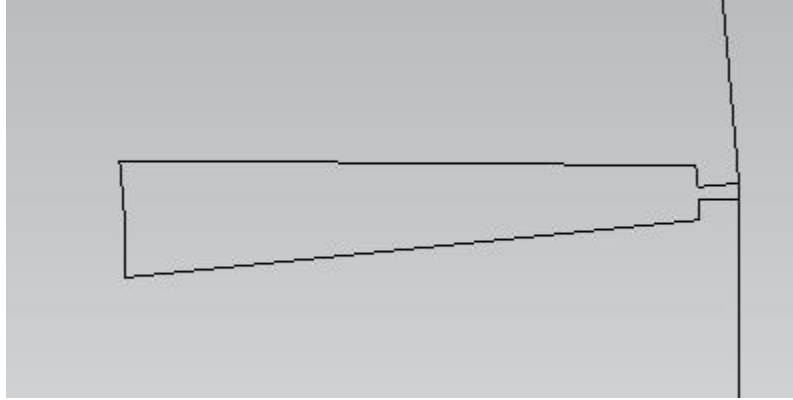


Figure 5.2 Γεωμετρία Μπάρα Δρομέα.

#### 5.1.5 Σπείρες Στάτη

Χρησιμοποιώντας παρόμοια διαδικασία με τις δυο προηγούμενες δημιουργούμε την γεωμετρία για τις σπείρες του στάτη. Οι διαστάσεις επιλέχθηκαν σύμφωνα με το σχέδιο του κινητήρα. Κάθε αύλακα του στάτη περιέχει δυο σπείρες, μία πάνω και μια κάτω.

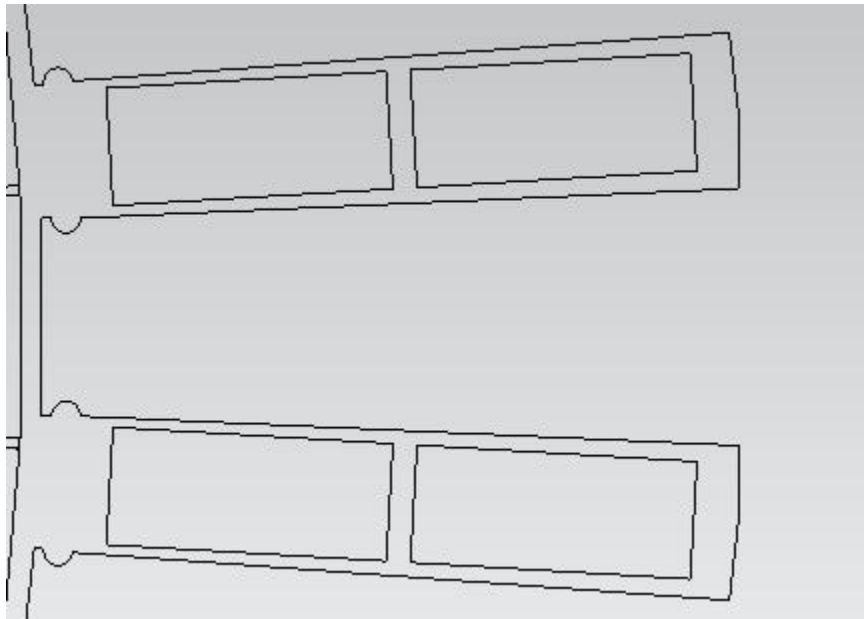


Figure 5.3 Γεωμετρία Σπειρών Στάτη.

#### 5.1.6 Διάκενο

Όπως αναφέρθηκε από πάνω το διάκενο έχει μέγεθος 2 mm. Τα δυο αυτά χιλιοστά τα έχουμε διαιρέσει σε τρία μέρη: το πρώτο με μέγεθος 0.7 mm , το δεύτερο με μέγεθος 0.6 mm και το τρίτο με μέγεθος 0.6 mm.

Το πρώτο μέρος το οποίο είναι κοντά στον δρομέα συμπεριλαμβάνεται στην κίνηση της προσομοίωσης απεικονίζει την δυναμική αλληλεπίδραση του στρεφόμενου δρομέα και του στάτη.

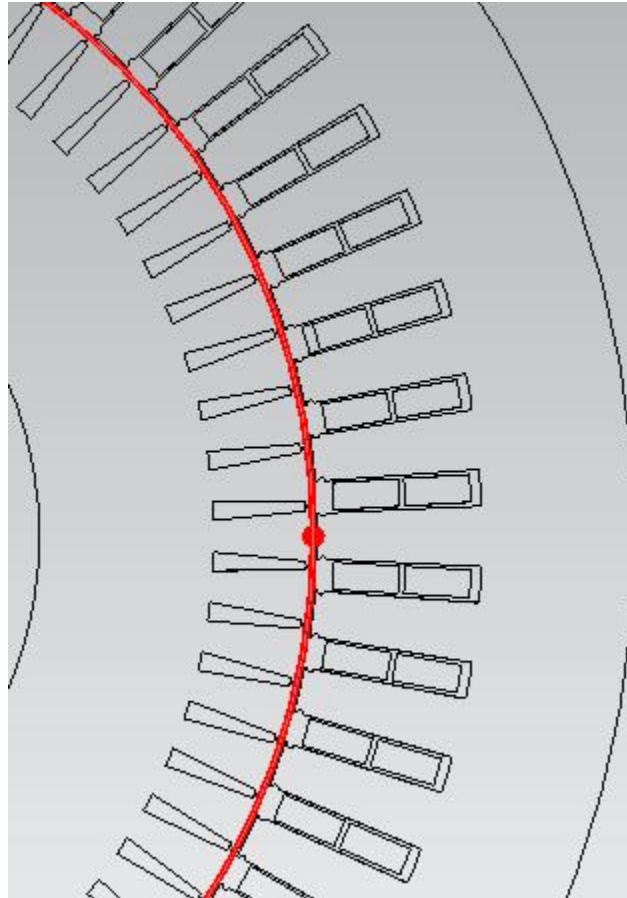


Figure 5.4 Το πρώτο και κινούμενο μέρος του διακένου.

Το δεύτερο μέρος αναπαριστά το στρώμα διαχωρισμού του δρομέα και του στάτη.

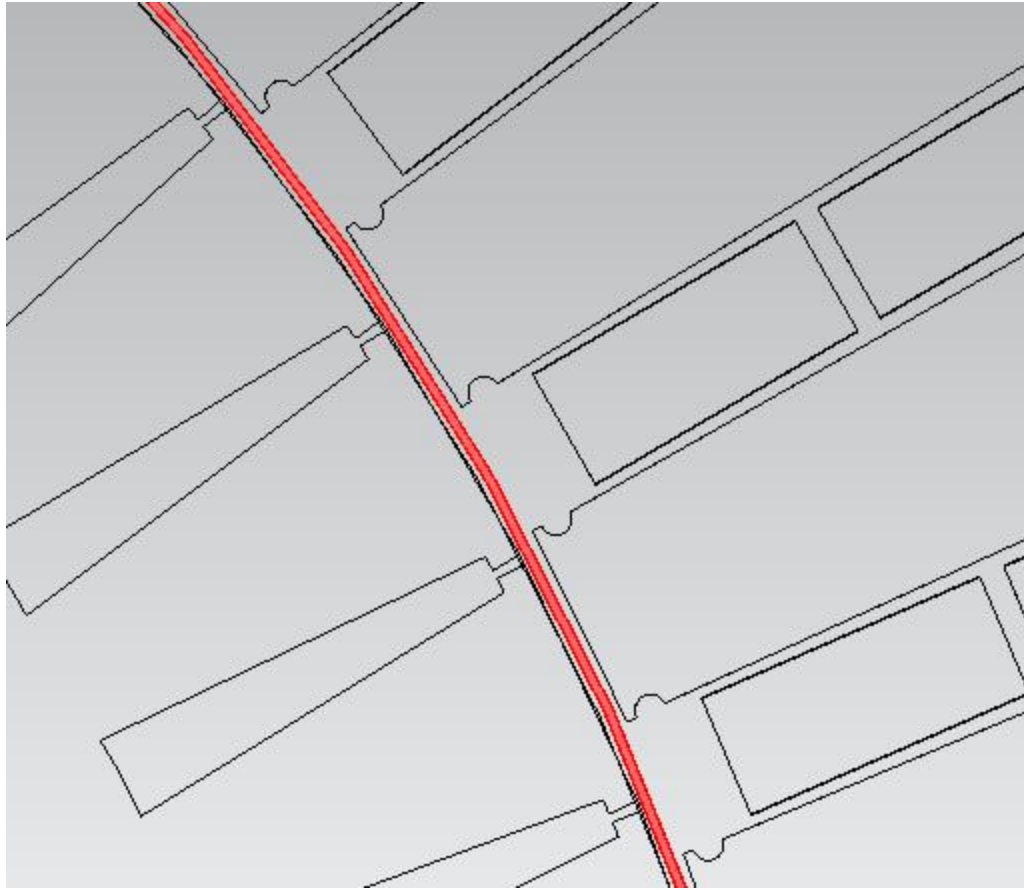


Figure 5.5 Το ενδιάμεσο μέρος του διακένου.

Το τελευταίο μέρος αναπαριστά τόσο το διάκενο αέρα όσο και την μόνωση ανάμεσα στις σπείρες του στάτη. Η μόνωση δεν αποτελείται από υλικά με μαγνητικές ιδιότητες έτσι επιλέχθηκε το στοιχείο του αέρα για την μοντελοποίησή της και να ομαδοποιηθεί με το τελευταίο μέρος του διακένου.

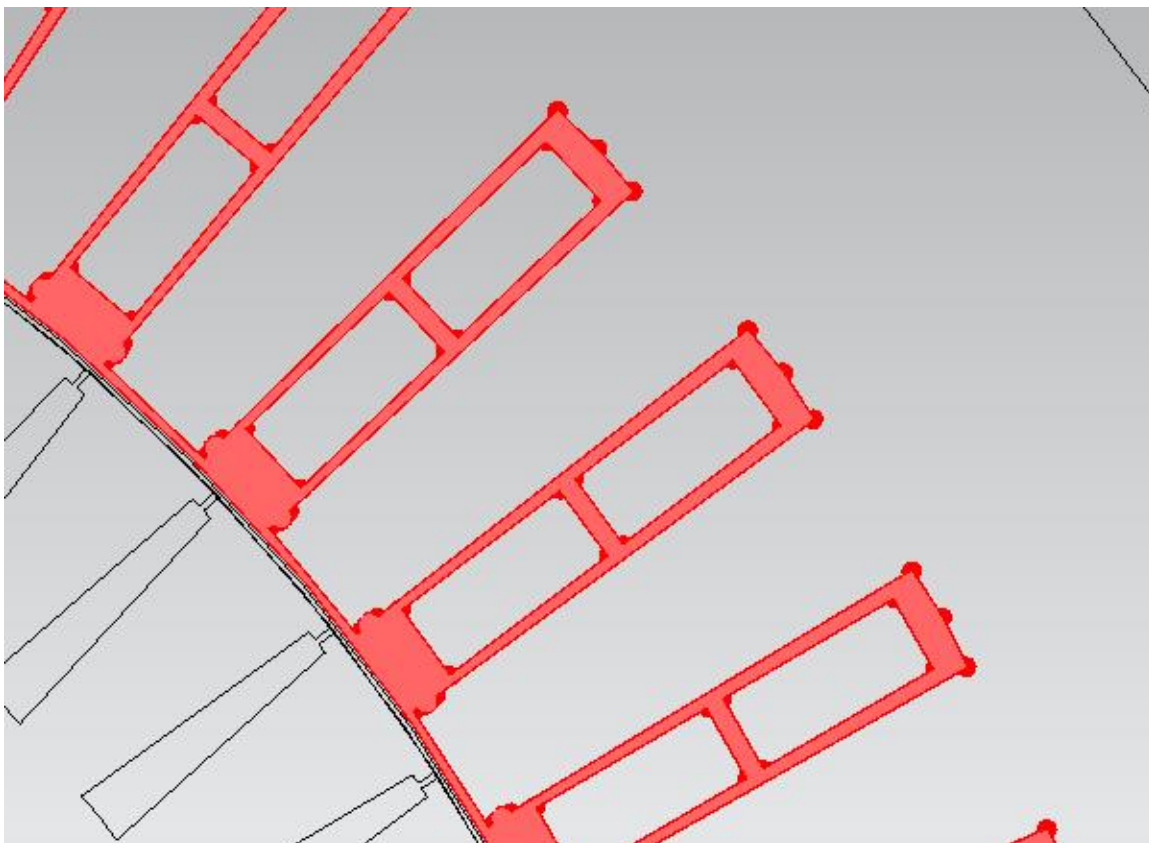


Figure 5.6 Το τρίτο και τελευταίο μέρος του διακένου μαζί με την μόνωση στάτη.

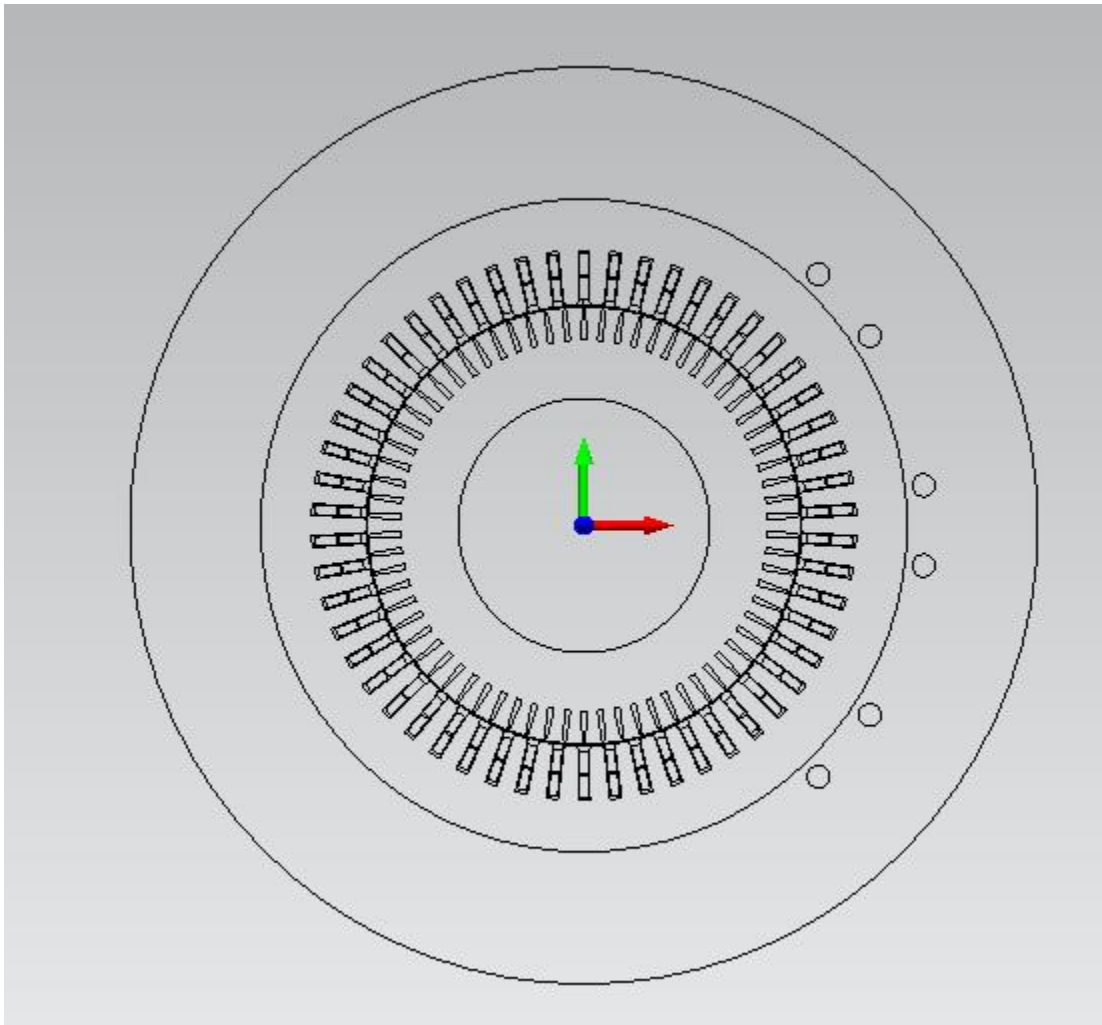


Figure 5.7 Τελική Γεωμετρία Μοντέλου.

## 5.2 Δημιουργία Components

### 5.2.1 Component Στάτη

Σε αυτό το βήμα αρχικά κάνουμε κλικ στην επιλογή **Select Construction Slice Surfaces** και διαλέγουμε την επιφάνεια του στάτη που σχεδιάστηκε στο προηγούμενο βήμα. Έπειτα επιλέγουμε **Make Component in a Line** και από την λίστα των υλικών διαλέγουμε το M-19 29 Ga. Τέλος στις ιδιότητες του component στο πεδίο του sweep θέτουμε την απόσταση στα 1152 mm.

### 5.2.2 Component Μπάρες Δρομέα και Σπείρες Στάτη

Ομοίως ακολουθούμε την παραπάνω διαδικασία για την δημιουργία μιας μπάρας του δρομέα. Αφού ολοκληρωθεί για να δημιουργήσουμε τις υπόλοιπες μπάρες, μέσω της επιλογής **Select**



**Component**, διαλέγουμε την μπάρα που δημιουργήσαμε και επιλέγουμε με δεξί κλικ **Rotate Components**, έχοντας καθορίσει τόσο την γωνία περιφοράς όσο και τον αριθμό αντιγράφων που απαιτούνται. Ακριβώς η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τις σπείρες του στάτη.

### 5.2.3 Component Άξονα και Εξωτερικού Πεδίου Αέρα (Airbox)

Αυτά τα components δημιουργούνται με ακριβώς τον ίδιο τρόπο με τα προηγούμενα. Σε αυτό το μοντέλο το υλικό τόσο του άξονα όσο και του airbox είναι αέρας.

### 5.2.4 Component Διάκενο Αέρα και Μόνωση στάτη

Στην πραγματικότητα οι αύλακες του στάτη περιέχουν μονωτικό υλικό. Ωστόσο στο μοντέλο η μόνωση αναπαρίσταται από αέρα.

Επίσης το υλικό στο διάκενο αέρα, και στα τρία κομμάτια του, αποτελείται από αέρα.

### 5.2.5 Component Κίνησης

Για να αποσαφηνιστούν τα κινούμενα κομμάτια της προσομοίωσης, επιλέγουμε τον άξονα, τον πυρήνα του δρομέα, όλες τις μπάρες του δρομέα και το πρώτο μέρος του διακένου αέρα. Έπειτα στο μενού του Model διαλέγουμε **Make Motion Component**. Αφού γίνεται λόγος για κινήτηρα επιλέγουμε στο **Source Type** την επιλογή **Load Driven** και προσαρμόζουμε κατάλληλα το φορτίο ανάλογα με τον χρόνο. Τέλος θέτουμε την τιμή της ροπής αδράνειας στα  $149 \text{ kg-m}^2$  καθώς είναι η βέλτιστη τιμή που προέκυψε μέσα από δοκιμές για να εξασφαλίσουμε τον απαιτούμενο χρόνο που παραμένει η προσομοίωση στο transient.

**Motion#1 Properties**

General	Load	Mass	Limits	Position	References	Parameters
Specify these values if you want to override the ones automatically calculated from the mesh by the solver.						
<input type="checkbox"/>	Mass:					kilograms
<input type="checkbox"/>	Center of gravity:					meters
<input checked="" type="checkbox"/>	Moment of inertia:	149				kilograms-meter squared

Figure 5.8 Τα properties για την μάζα του δρομέα.

## Motion#1 Properties

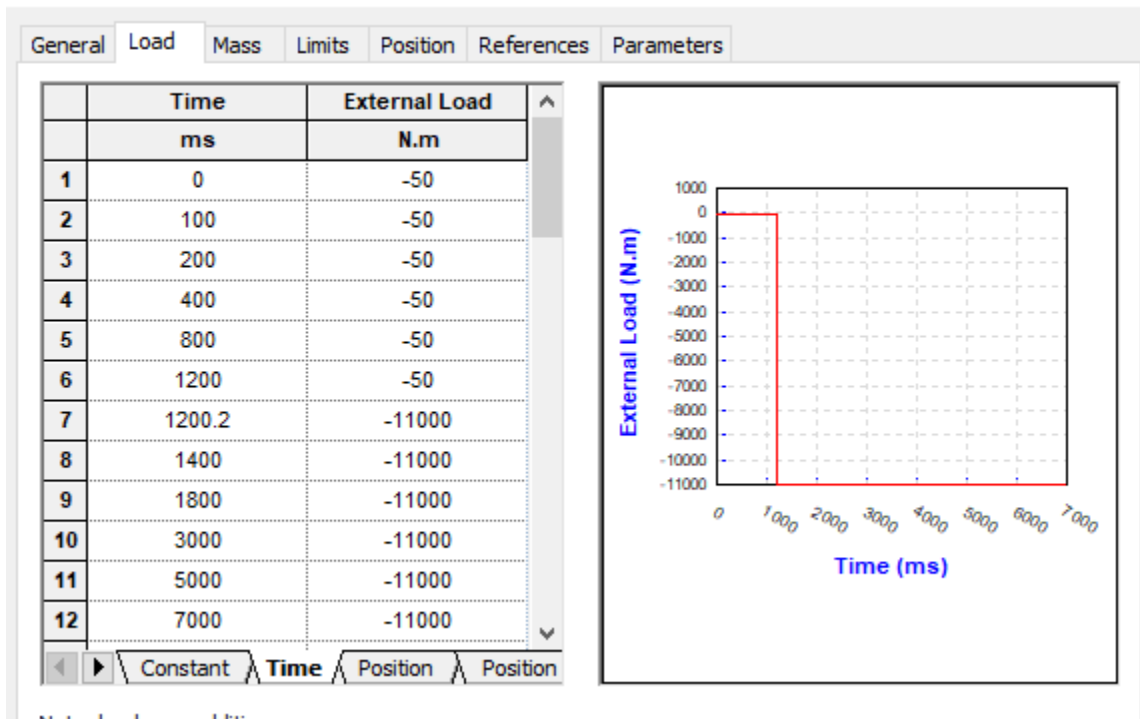


Figure 5.9 Το φορτίο που συμπλέχθηκε με βάση τον χρόνο.

### 5.3 Δημιουργία ηλεκτρικών σπειρών(coils)

Έχοντας δημιουργήσει τα components του κινητήρα, πρέπει να μοντελοποιηθούν και τα στοιχεία του κινητήρα που συμμετέχουν στο εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα. Πιο συγκεκριμένα για να προσομοιωθεί η συμπεριφορά του κινητήρα είναι απαραίτητη η περιέλιξη των σπειρών του στάτη καθώς και πηνία που προσομοιώνουν την συμπεριφορά των μπαρών του δρομέα.

#### 5.3.1 Περιέλιξη του Στάτη

Έχοντας ως σκοπό την σχεδίαση ενός τριφασικού εξαπολικού κινητήρα πρέπει να διαχωρίσουμε τις σπείρες του στάτη με κατάλληλο τρόπο ώστε να είναι διακριτές τόσο οι τρεις φάσεις όσο και τα τρία ζευγάρια πόλων. Δεδομένου ότι οι σπείρες του στάτη έχουν χωριστεί σε πάνω και κάτω μέρος καθώς και ο αριθμός των αυλάκων είναι 54, είναι αντιληπτό ότι έχουμε 108 σπείρες συνολικά να ομαδοποιήσουμε. Κάθε φάση θα περιλαμβάνει 36 σπείρες και κάθε ζευγάρι πόλου 12 σπείρες.

Για να είναι τα παραπάνω ξεκάθαρα στο μοντέλο μας έχουμε δώσει χρώμα(με την επιλογή **Override Material Colour**) σε κάθε σπείρα ανάλογα με την φάση που βρίσκεται : Α Φάση με μπλε χρώμα, Β Φάση με κόκκινο χρώμα, C Φάση με κίτρινο χρώμα. Έπειτα διαλέγουμε τις σπείρες που ανήκουν στην ίδια φάση και από το μενού του Model επιλέγουμε **Make Simpe**

**Coil.** Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι διαλέγοντας μια σπείρα η επόμενη που θα επιλεγεί είναι από τον επόμενο αντίθετο πόλο, εξασφαλίζοντας έτσι την σωστή κατεύθυνση των σπειρών, σε κάθε πόλο, η οποία είναι σημαντική για την σωστή λειτουργία του κινητήρα. Ακριβώς την ίδια διαδικασία ακολουθούμε για τις υπόλοιπες δυο φάσεις.

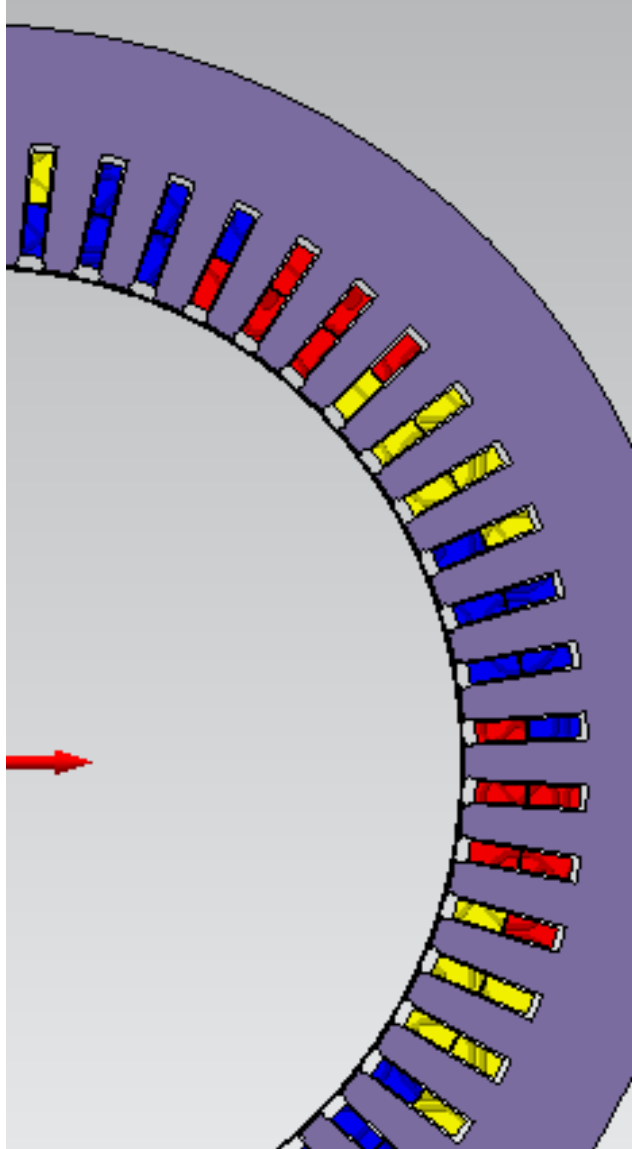


Figure 5.10 Ο διαχωρισμός των coils σε χρώματα.

Τέλος στα properties της κάθε σπείρας επιλέγουμε τον τύπο **Stranded** και αριθμό περιστροφών 6.

COIL\_A Properties

Coil Attributes | Waveform | Current Flow Volumes | Parameters

Name: COIL\_A

Placement	<input checked="" type="checkbox"/> Placed in circuit	
Type	Stranded	
No. of Turns	6	turn(s)
Strand Area	<input type="checkbox"/> Use specified value:	in mm². Uncheck the checkbox to use the automatically calculated value.
Additional Resistance		ohms
Additional Inductance		henries
Terminal 1	T1	Stator Coil Return Copy#10,Face#1 Position: (780, 240)
Terminal 2	T2	Stator Coil Return Copy#1,Face#1 Position: (825, 240)
Coil Side 1	Stator Coil Return Copy#10,Face#1 --> Stator Coil Return Copy#10,Face#2	Reverse Direction
Coil Side 2	Stator Coil Copy#75,Face#2 --> Stator Coil Copy#75,Face#1	Reverse Direction

Figure 5.11 Τα properties μιας σπείρας του στάτη.

### 5.3.2 Σπείρες Μπαρών Δρομέα

Επιλέγουμε μια μπάρα και έπειτα Make Simple Coil. Στα properties τώρα στον τύπο επιλέγουμε **Solid**. Το ίδιο κάνουμε και για τις υπόλοιπες 69 μπάρες.

Coil#182 Properties

Coil Attributes | Waveform | Current Flow Volumes | Parameters

Name: Coil#182

Placement	<input checked="" type="checkbox"/> Placed in circuit	
Type	Solid	
Additional Resistance		ohms
Additional Inductance		henries
Terminal 1	T1	Rotor Bar Copy#67,Face#1 Position: (264, 5292)
Terminal 2	T2	Rotor Bar Copy#67,Face#2 Position: (309, 5292)
Coil Side 1	Rotor Bar Copy#67,Face#1 --> Rotor Bar Copy#67,Face#2	Reverse Direction

Figure 5.12 Properties για ένα Coil μιας μπάρας δρομέα.

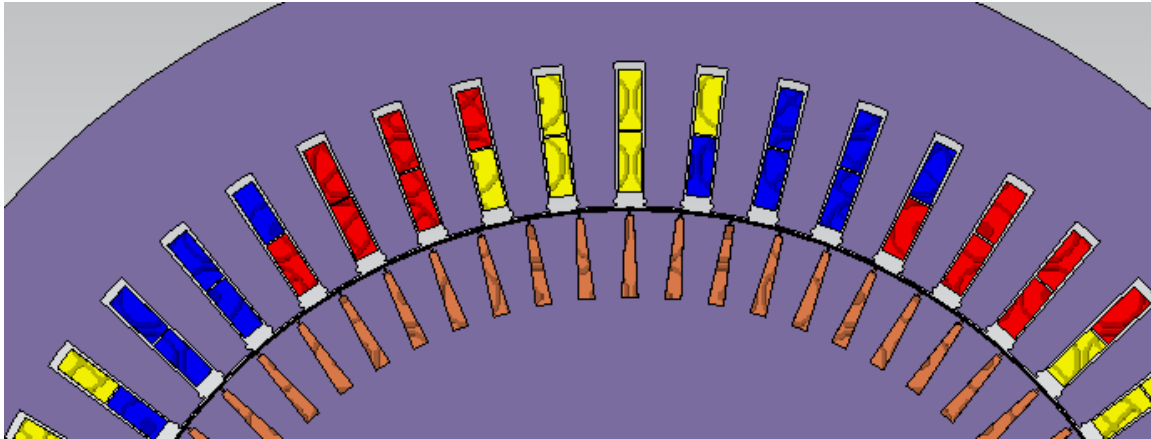


Figure 5.13 Τελική διανομή σπειρών στάτη και μπαρών δρομέα.

## 5.4 Ηλεκτρικό Κύκλωμα

Μόλις δημιουργηθούν τα πηνία πρέπει να τα εντάξουμε στο κύκλωμα όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Η τελική τοποθέτηση όλων των στοιχείων φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.

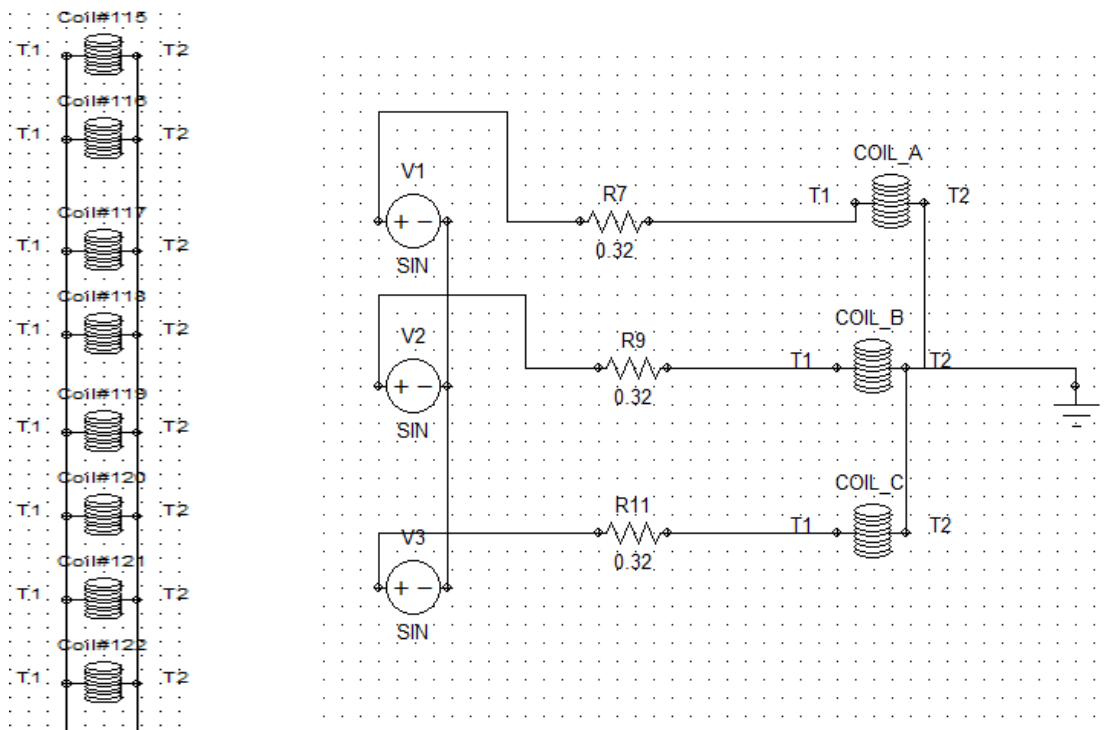


Figure 5.14 Ηλεκτρικό κύκλωμα επαγωγικού κινητήρα στο simulation.

Στο Figure 5.14 φαίνεται η διάταξη 8 από τις 70 σπείρες του δρομέα. Με αντίστοιχο τρόπο έχουν τοποθετηθεί και οι υπόλοιπες 62 σπείρες.

Στο Figure 5.14 φαίνεται η διάταξη των σπειρών του στάτη, όπου κάθε φάση τροφοδοτείται από πηγές τάσης που είναι συνδεδεμένες σε αστέρια. Επίσης έχουν προστεθεί αντιστάσεις σε σειρά με κάθε φάση που αντικατοπτρίζουν την αντίσταση του κυκλώματος του κινητήρα. Για να επιτύχουμε την ονομαστική τάση των 6.6 kV έγιναν οι εξής υπολογισμοί :

$$V_{\text{phase}} = \frac{6600 \text{ V}}{\sqrt{3}} \approx 3810 \text{ V}$$

Από την στιγμή που τα 3810 V είναι η RMS τιμή, η τελική τιμή της τάσης σε κάθε πηγή υπολογίζεται ως εξής :

$$V_{\text{peak}} = 3810 \text{ V} \cdot \sqrt{2} \approx 5388 \text{ V}$$

Τέλος προσαρμόζουμε την συχνότητα για κάθε πηγή στα 50 Hz και τις γωνίες τους με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει η κάθε μια διαφορά 120°.

V3 Properties

Voltage Source    Waveform    Parameters

Type: Sinusoidal

$0 - T_d : V_o + V_a \sin(\phi\pi/180)$   
 $T_d - T_{\text{stop}} : V_o + V_a \sin(2\pi(F(t - T_d) + \phi/360)) \text{ EXP}(-(t - T_d)\theta)$

		Value	Default
$V_o$		0	
$V_a$		5388	
F (Transient only)	<input checked="" type="checkbox"/>	50	50 (Hz)
$T_d$	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0
$\theta$	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0
$\phi$	<input checked="" type="checkbox"/>	240	0

There are too many data points for the graph

Close    Cancel    Apply

Figure 5.15 Properties μιας πηγής τάσης στο ηλεκτρικό κύκλωμα.

### 5.5 Τοποθέτηση αισθητήρων μαγνητικής ροής

Για να πάρουμε δεδομένα για την μαγνητική ροή που απορρέει από τον κινητήρα, είναι απαραίτητη η τοποθέτηση 3 αισθητήρων που ο κάθε αισθητήρας απέχει από τον άλλον 120 ηλεκτρικές μοίρες. Κάθε σπείρα του αισθητήρα αποτελείται από 1000 περιστροφές και κάθε αισθητήρας από 2 σπείρες. Επιπλέον κάθε αισθητήρας είναι συνδεδεμένος στο κύκλωμα με μια αντίσταση 1 TΩ. Το μέγεθος της αντίστασης επιλέχθηκε για να ελαχιστοποιηθεί η ροή ρεύματος προς τις σπείρες του κινητήρα.

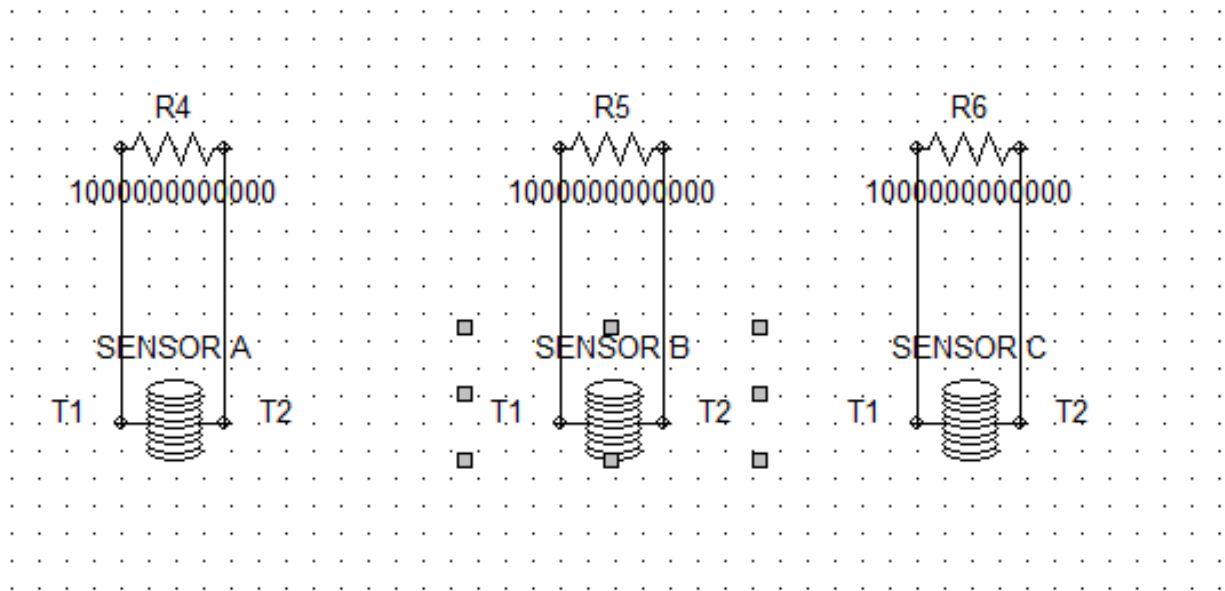


Figure 5.16 Κύκλωμα αισθητήρων μαγνητικής ροής.

Το τελικό μοντέλο της προσομοίωσης είναι το εξής :

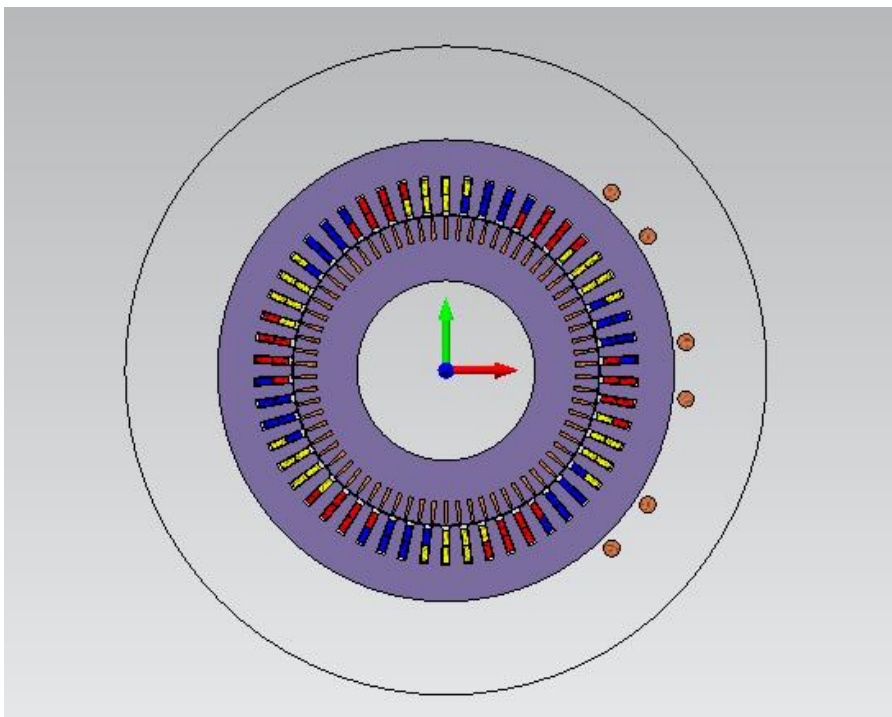


Figure 5.17 Τελικό μοντέλο επαγωγικού κινητήρα.

Τέλος στο [Κεφάλαιο 4](#) έγινε λόγος για την σημαντικότητα του και στο Figure 5.18 παρουσιάζεται η τελική μορφή του πλέγματος.

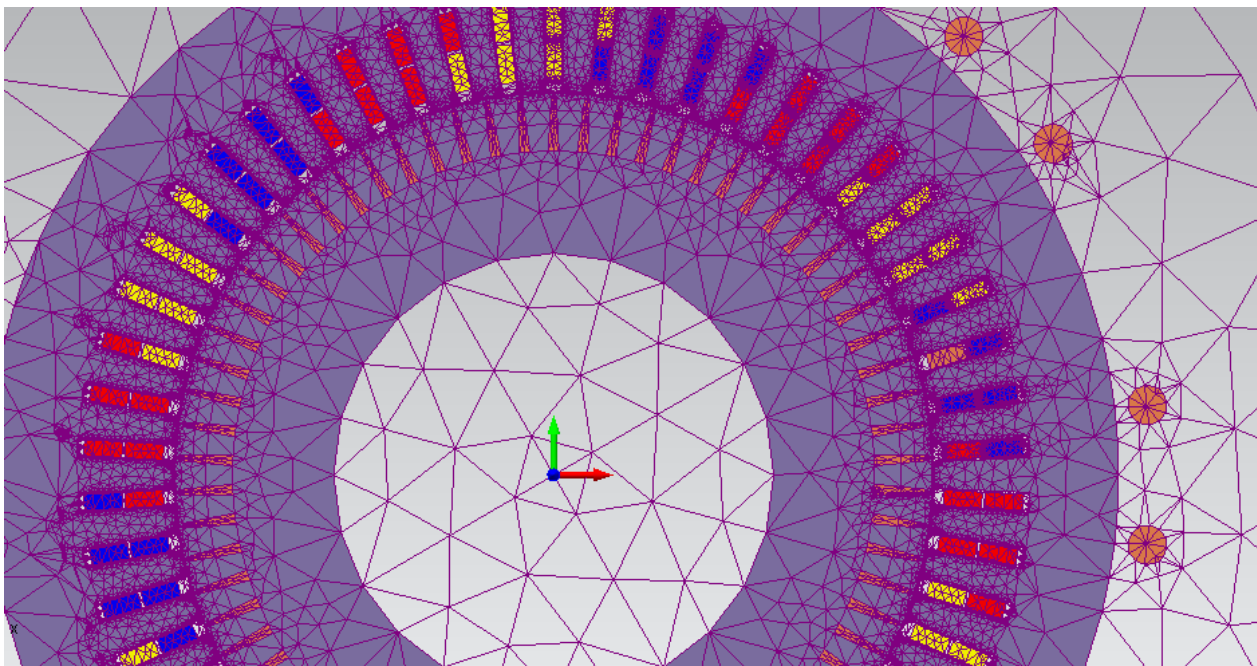


Figure 5.18 Πλέγμα(mesh) του μοντέλου που σχεδιάστηκε.



## Κεφάλαιο 6. Μοντελοποίηση Σφάλματος Στάτη σε Επαγωγικό Κινητήρα και Ηλεκτρομαγνητική του Ανάλυση

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί ο τρόπος που μοντελοποιήθηκε το σφάλμα που μελετάμε στην παρούσα εργασία στο περιβάλλον του SimCenter Magnet της Siemens. Έπειτα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα έπειτα από τις προσομοιώσεις τόσο σε υγιή αλλά και στις περιπτώσεις των εσφαλμένων καταστάσεων.

### 6.1 Μοντελοποίηση Σφάλματος Στάτη

Αρχικά θα πρέπει να προσδιορίσουμε πως το είδος σφάλματος στάτη που επιλέχθηκε να μοντελοποιηθεί είναι αυτό των βραχυκυκλωμένων σπειρών. Για να επιτύχουμε την παραπάνω μοντελοποίηση ήταν αναγκαία η παραλλαγή του αρχικού κυκλώματος που παρουσιάστηκε λεπτομερώς στο **Κεφάλαιο 5**.

Επιλέξαμε να βραχυκυκλώσουμε μια σπείρα από ένα coil του στάτη από την πρώτη Φάση της περιέλιξης του (PHASE A). Ένα coil αποτελείται από έξι τυλίγματα, οπότε χρειάστηκε να γίνει η κατάλληλη σχεδιαστική επέμβαση ώστε το coil όπου θα παρουσιαστεί το σφάλμα να είναι κατάλληλα διαχωρισμένο.

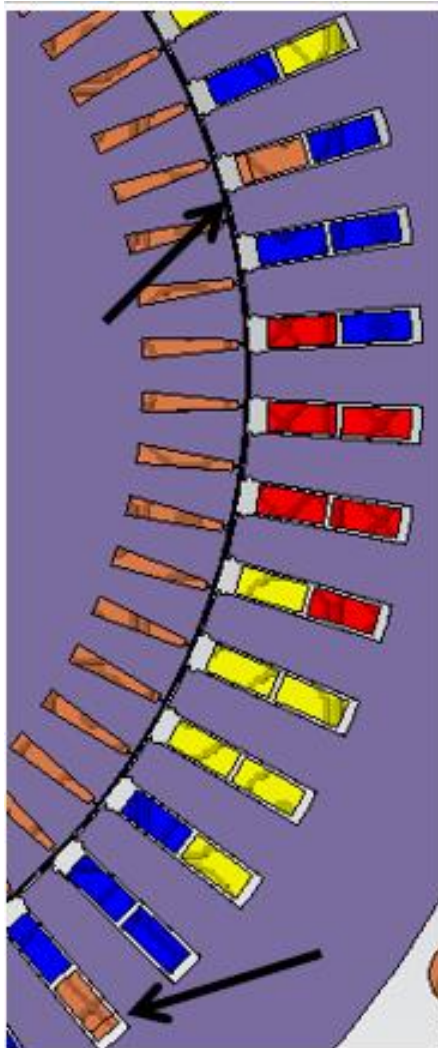


Figure 6.1 Σπείρα που επιλέχθηκε για μοντελοποίηση σφάλματος.

Στην εικόνα οι καφέ σπείρες είναι αυτές που θα χρησιμοποιηθούν για να μοντελοποιηθεί το σφάλμα. Το μικρότερο μέρος θα αποτελείται από 1 τύλιγμα και το υπόλοιπο μέρος από 5.

#### Coil#4 Properties

Coil Attributes			Waveform	Current Flow Volumes	Parameters
Name: Coil#4					
Placement	<input checked="" type="checkbox"/> Placed in circuit				
Type	Stranded				
No. of Turns	1	turn(s)			
Strand Area	<input type="checkbox"/> Use specified value:	in m <sup>2</sup> . Uncheck the checkbox to use the automatically calculated value.			
Additional Resistance	ohms				
Additional Inductance	henries				
Terminal 1	T1	StatorReturn Coil Piece 1,Face#1 Position: (840, 192)			
Terminal 2	T2	Stator coil Piece 1,Face#1 Position: (885, 192)			
Coil Side 1	StatorReturn Coil Piece 1,Face#1 --> StatorReturn Coil Piece 1,Face#2		Reverse Direction		
Coil Side 2	Stator coil Piece 1,Face#2 --> Stator coil Piece 1,Face#1		Reverse Direction		
<div>Close Cancel Apply</div>					

Figure 6.2 Properties μιας βραχυκυκλωμένης σπείρας.

Με αυτόν τον τρόπο αυτή η διαχωρισμένη σπείρα μοιάζει με τις υπόλοιπες σπείρες.

#### Coil#5 Properties

Coil Attributes			Waveform	Current Flow Volumes	Parameters
Name: Coil#5					
Placement	<input checked="" type="checkbox"/> Placed in circuit				
Type	Stranded				
No. of Turns	5	turn(s)			
Strand Area	<input type="checkbox"/> Use specified value:	in m <sup>2</sup> . Uncheck the checkbox to use the automatically calculated value.			
Additional Resistance	ohms				
Additional Inductance	henries				
Terminal 1	T1	Stator coil Piece 2,Face#1 Position: (732, 192)			
Terminal 2	T2	Stator coil Piece 3,Face#1 Position: (777, 192)			
Coil Side 1	Stator coil Piece 2,Face#1 --> Stator coil Piece 2,Face#2		Reverse Direction		
Coil Side 2	Stator coil Piece 3,Face#2 --> Stator coil Piece 3,Face#1		Reverse Direction		

Figure 6.3 Properties της υπόλοιπης βραχυκυκλωμένης σπείρας.

Έπειτα θα πρέπει να βραχυκυκλώσουμε τις σπείρες που διαχωρίστηκαν και αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση μια αντίστασης παράλληλα με τις βραχυκυκλωμένες σπείρες. Η τιμή της αντίστασης έχει δύο τιμές ανάλογα το σενάριο προσομοίωσης: είτε 0.2 Ohms είτε 0.6 Ohms. Ωστόσο χρειάστηκε να υπολογιστεί και η αντίσταση μιας σπείρας και να τοποθετηθεί σε σειρά

με τις δυο βραχυκυκλωμένες σπείρες ώστε να εξασφαλιστεί η ακριβής συμπεριφορά του κυκλώματος του στάτη.

Μια φάση αποτελείται από 9 αύλακες και κάθε αύλακα περιέχει 12 τυλίγματα δηλαδή από 6 σε κάθε σπείρα. Για να βρούμε την αντίσταση που αντιστοιχεί στην βραχυκυκλωμένη σπείρα ενός τυλίγματος διαιρούμε την συνολική αντίσταση του στάτη σε μια φάση του, δηλαδή τα 0.32 Ohm, με το γινόμενο του αριθμού των αυλακιών με τον αριθμό των τυλιγμάτων. Ο αριθμός που προκύπτει είναι το 0.00296296 . Αυτή η αντίσταση αντιστοιχεί σε μια βραχυκυκλωμένη σπείρα και συνδέεται σε σειρά με τις υπόλοιπες. Αφαιρούμε την αντίσταση μιας σπείρας από την συνολική αντίσταση και προκύπτει το παρακάτω κύκλωμα:

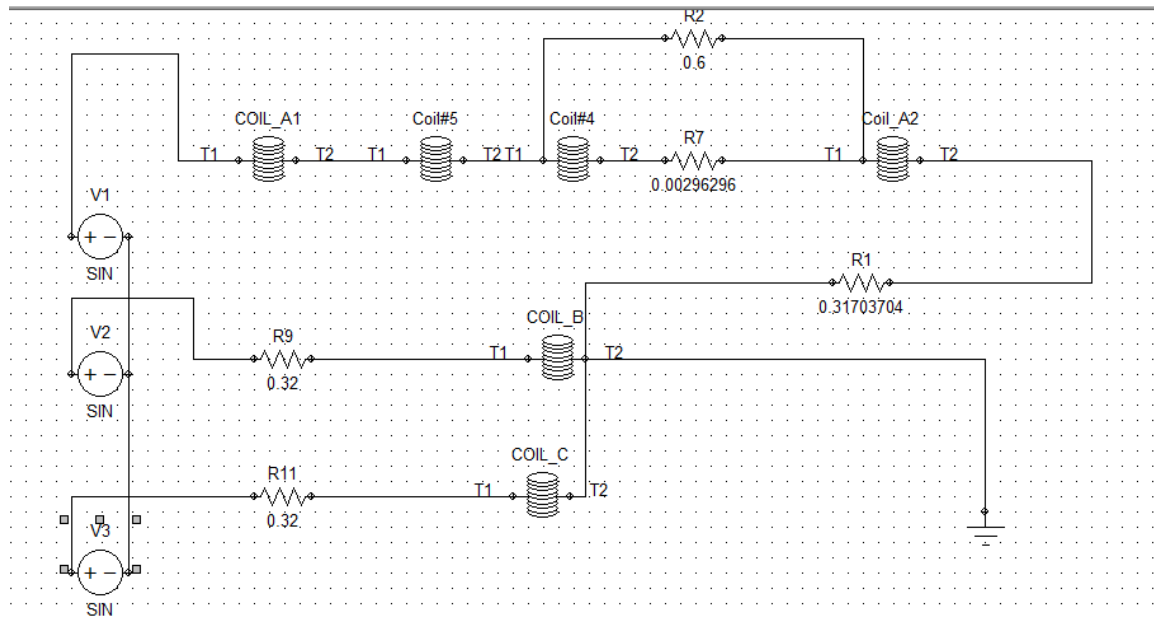


Figure 6.4 Η προσέγγιση του ηλεκτρικού κυκλώματος για μια βραχυκυκλωμένη σπείρα με σφάλμα βραχυκύκλωσης τα 0.2 Ohm.

## 6.2 Ηλεκτρομαγνητική Ανάλυση και Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Τα σενάρια προσομοίωσης διακρίνονται αρχικά από το φορτίο που συμπλέχθηκε στον δρομέα του επαγωγικού κινητήρα και έπειτα σε υγρή κατάσταση, σε μια βραχυκυκλωμένη σπείρα με αντίσταση βραχυκύκλωσης τα 0.2 Ohms και σε μια βραχυκυκλωμένη σπείρα με αντίσταση βραχυκύκλωσης τα 0.6 Ohms. Αρχικά εξετάζουμε τα αποτελέσματα για ονομαστικό φορτίο (11 kNm).

Κατάσταση	$I_{ph}$ (A)	$P_{in}$ (MW)	$P_{em}$ (MW)	Ταχύτητα δρομέα (rpm)	Ολίσθηση	Απόδοση (%)
Υγιής	123.975	1.202	1.138	995.43	0.00457	94.6
Βραχυκύκλωμα 0.2	125.178	1.228	1.1376	995.427	0.004573	92.6
Βραχυκύκλωμα 0.6	124.484	1.224	1.1377	995.429	0.004571	92.9

Table 6.1 Πίνακας με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για 11kNm.

Γίνεται αντιληπτό ότι παρότι την ύπαρξη σφάλματος η απόδοση του κινητήρα δεν επηρεάζεται σημαντικά. Επίσης έχουν αμεληθεί οι μηχανικές απώλειες λόγω της τάξης του κινητήρα έχοντας εισάγει στους υπολογισμούς ένα αμελητέο ποσοστό σφάλματος.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για φορτίο μισό του ονομαστικού (5.5 kNm)

Κατάσταση	$I_{ph}$ (A)	$P_{in}$ (MW)	$P_{em}$ (MW)	Ταχύτητα δρομέα (rpm)	Ολίσθηση	Απόδοση (%)
Υγιής	68.48	0.648	0.57109	997.84	0.00216	88.13
Βραχυκύκλωμα 0.2	69.930	0.658	0.57069	997.83	0.00217	86.6
Βραχυκύκλωμα 0.6	69.287	0.656	0.57069	997.67	0.00233	86.9

Table 6.2 Πίνακας με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για 5.5kNm.

Η επιλογή φορτίου μειώνει την απόδοση του κινητήρα. Ωστόσο στην εσφαλμένη κατάσταση και εδώ η απόδοση του κινητήρα δεν επηρεάζεται σχεδόν καθόλου.

Παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή της μαγνητικής ροής και της πυκνότητας του ρεύματος σε υγιή και εσφαλμένη λειτουργία με αντίσταση βραχυκύκλωσης 0.2 Ohms τόσο στα 11 kNm όσο και στα 5.5 kNm.

### 6.2.1 Κατανομή Μαγνητικής Ροής και Πυκνότητας Ρεύματος στα 11kNm

Παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή του μαγνητικού πεδίου του κινητήρα στην μόνιμη κατάσταση με συμπλεγμένο ονομαστικό φορτίο όπως προέκυψε από την Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων. Φαίνεται ξεκάθαρα η ομοιόμορφη κατανομή του μαγνητικού πεδίου, ενώ έχουν σχηματιστεί και έξι πόλοι όπως αναμενόταν.

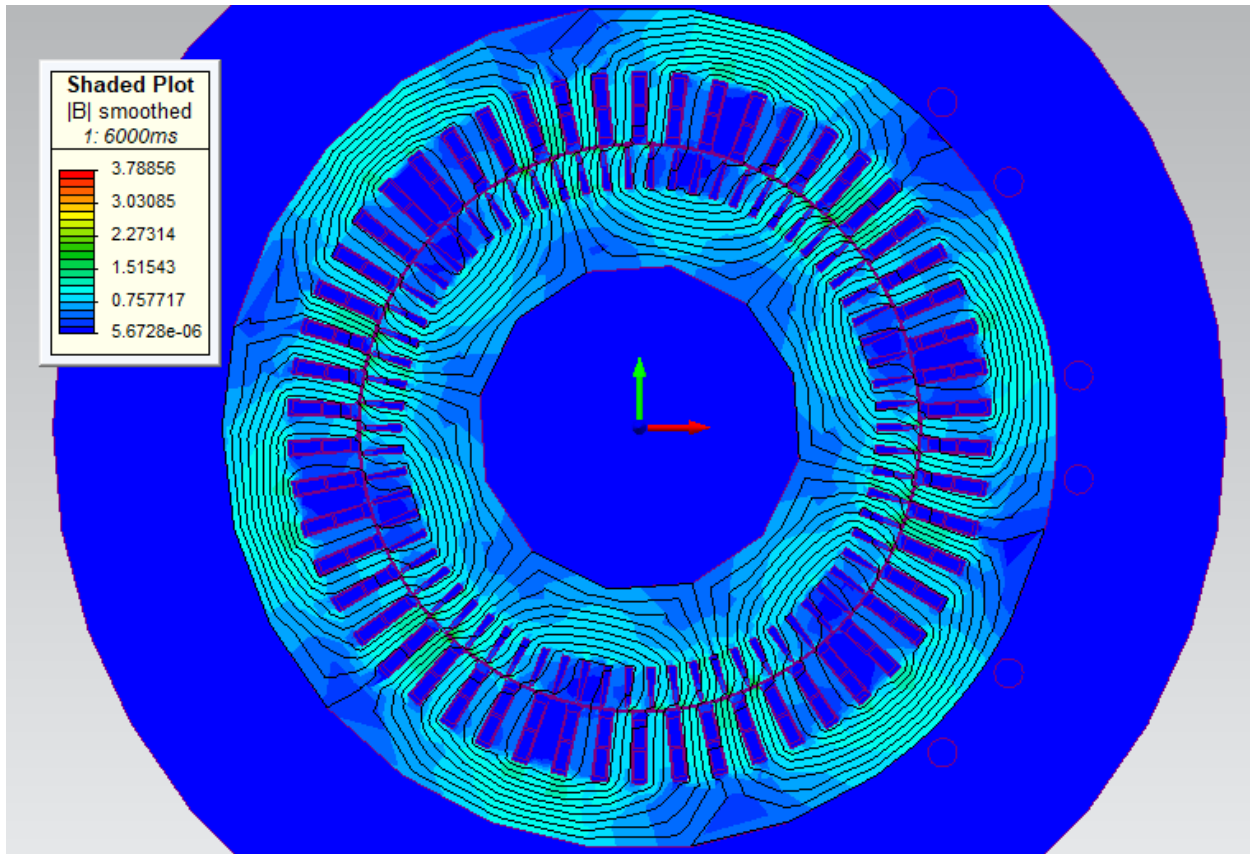


Figure 6.5 Κατανομή Μαγνητικής Ροής στην Μόνιμη Κατάσταση του Κινητήρα με 11 kNm Φορτίο σε υγιή Κατάσταση.

Κατά την εκκίνηση βλέπουμε ότι δεν έχουν διαμορφωθεί πλήρως οι έξι πόλοι ενώ οι μαγνητικές γραμμές δεν έχουν κατανεμηθεί κατάλληλα στον δρομέα του κινητήρα.

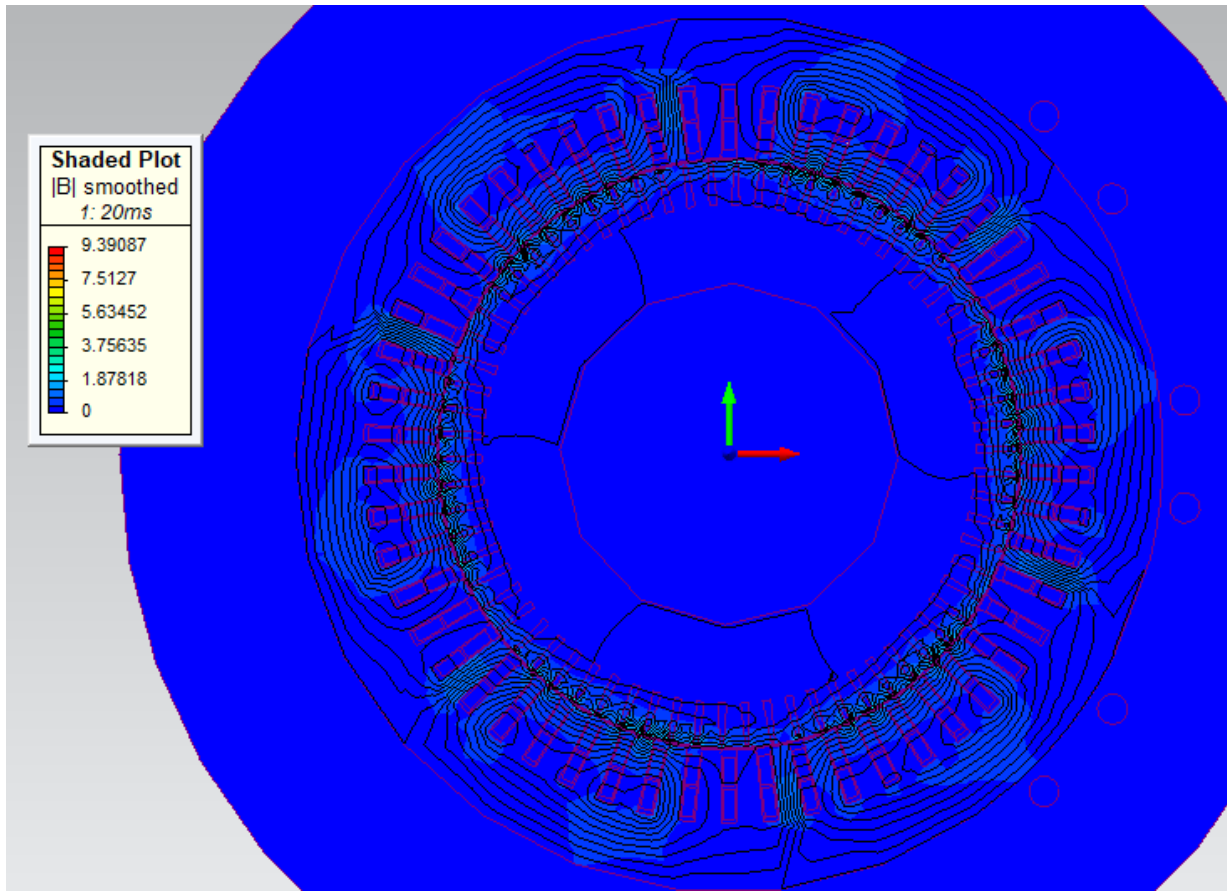


Figure 6.6 Κατανομή Μαγνητικής Ροής στην Εκκίνηση του Κινητήρα με 11 kNm Φορτίο σε υγιή Κατάσταση.

Στην **Εικόνα 6.7** παρουσιάζεται η πυκνότητα του ρεύματος κατά την διάρκεια της εκκίνησης του κινητήρα. Είναι εμφανές το επιδερμικό φαινόμενο στις μπάρες του δρομέα το οποίο αποτελεί αναγκαία συνθήκη για την λειτουργία του κινητήρα.





Figure 6.7 Πυκνότητα Ρεύματος στην Εκκίνηση Επαγωγικού Κινητήρα με Φορτίο 11 kNm σε υγιή Κατάσταση.

Ακολουθούν οι αντίστοιχες εικόνες για την εσφαλμένη λειτουργία του κινητήρα, με μια βραχυκυκλωμένη σπείρα και 0.2 Ohm αντίσταση βραχυκυκλώματος.



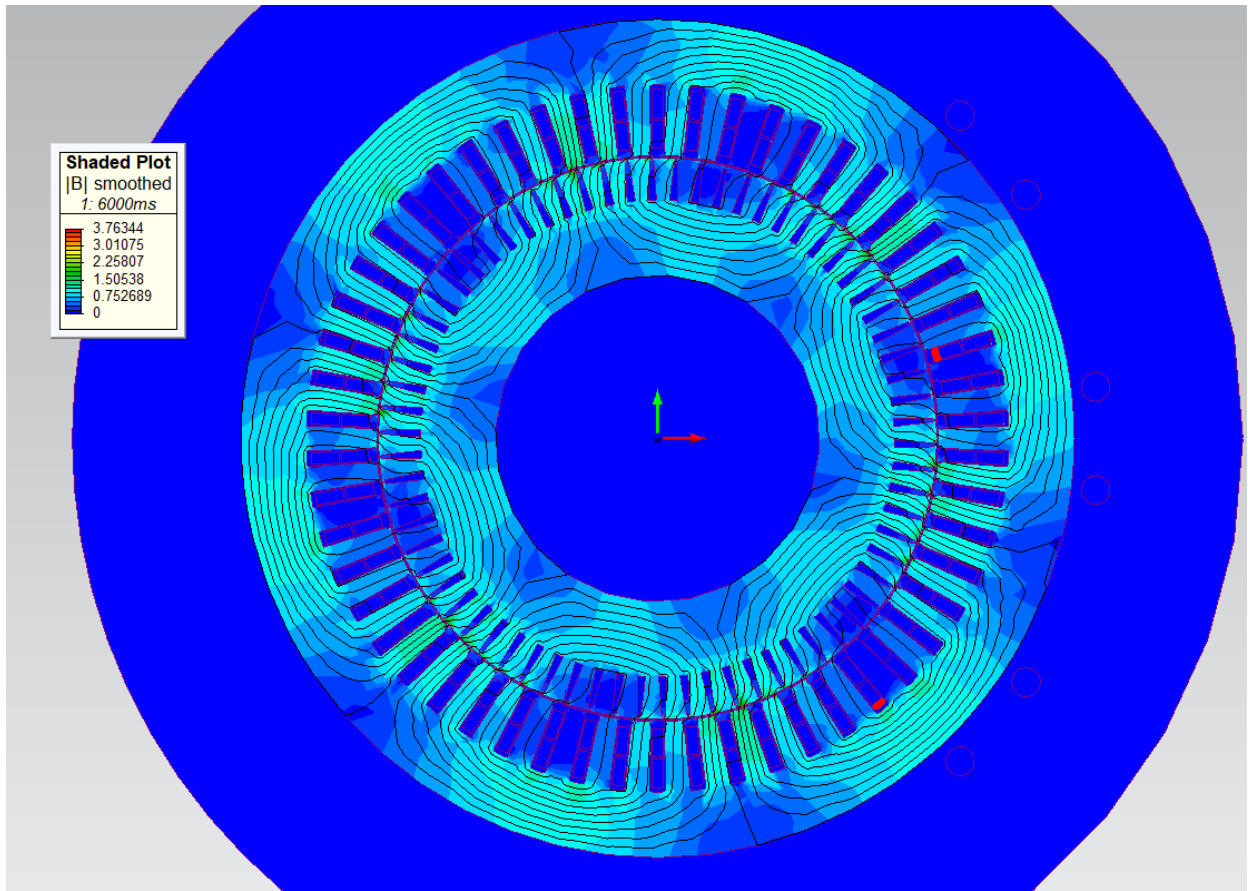


Figure 6.8 Κατανομή Μαγνητικής Ροής στην Μόνιμη Κατάσταση του Κινητήρα με 11kNm Φορτίο σε εσφαλμένη Κατάσταση.

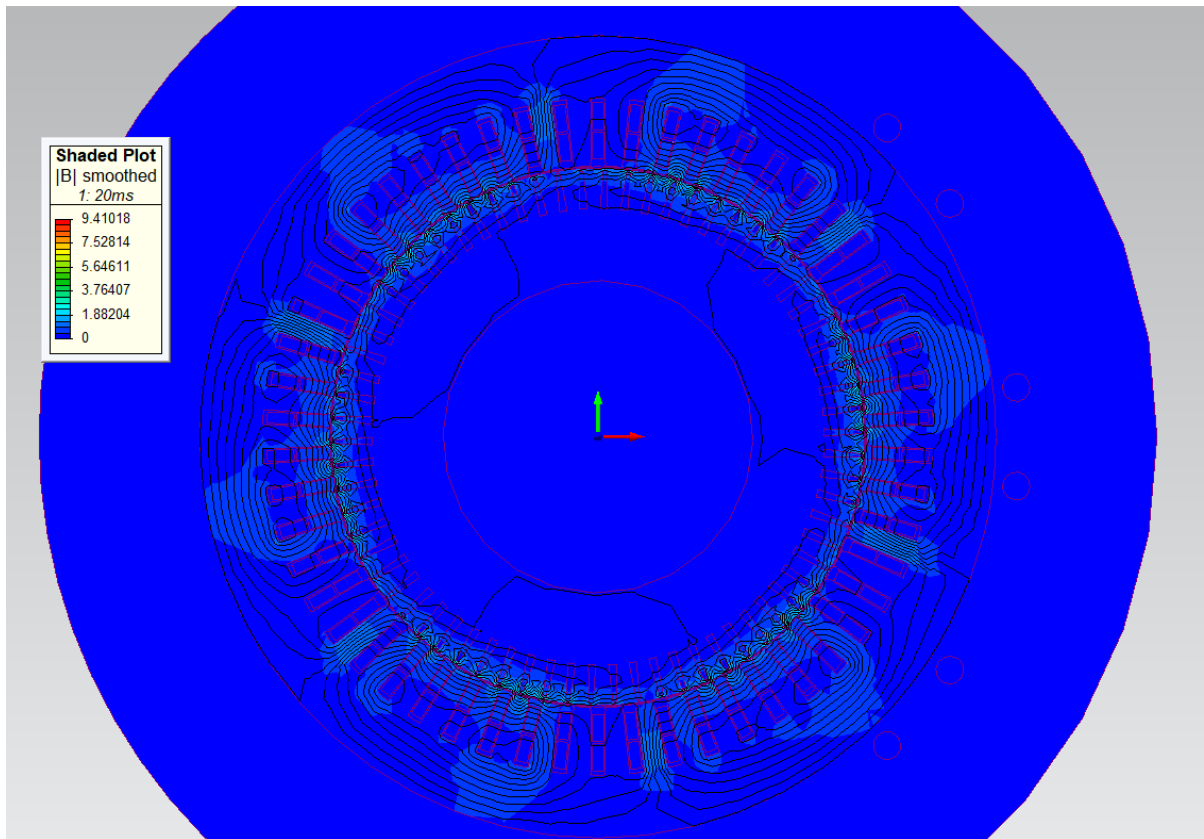


Figure 6.9 Κατανομή Μαγνητικής Ροής στην Εκκίνηση του Κινητήρα με 11 kNm Φορτίο σε Εσφαλμένη Κατάσταση.



Figure 6.10 Πυκνότητα Ρεύματος στην Εικίνηση Επαγωγικού Κινητήρα με Φορτίο 11 kNm σε εσφαλμένη Κατάσταση.

Στα Figure 6.7 και Figure 6.10 παρουσιάζεται η πυκνότητα ρεύματος τα βέλη δείχνουν την βραχυκυκλωμένη σπείρα. Δεν παρατηρείται καμία διαφορά ανάμεσα στις δυο φωτογραφίες.

Τέλος έχει γίνει εστίαση στην βραχυκυκλωμένη σπείρα τόσο στην υγιή όσο και στην εσφαλμένη λειτουργία. Δεν παρατηρείται καμία αξιοσημείωτη διαφορά ωστόσο στην εσφαλμένη λειτουργία η μαγνητική ροή είναι ελαφρώς πιο έντονη στο δόντι του στάτη κάτω από την βραχυκυκλωμένη σπείρα. Ωστόσο δεν παρατηρείται κάποια έντονη ασυμμετρία.

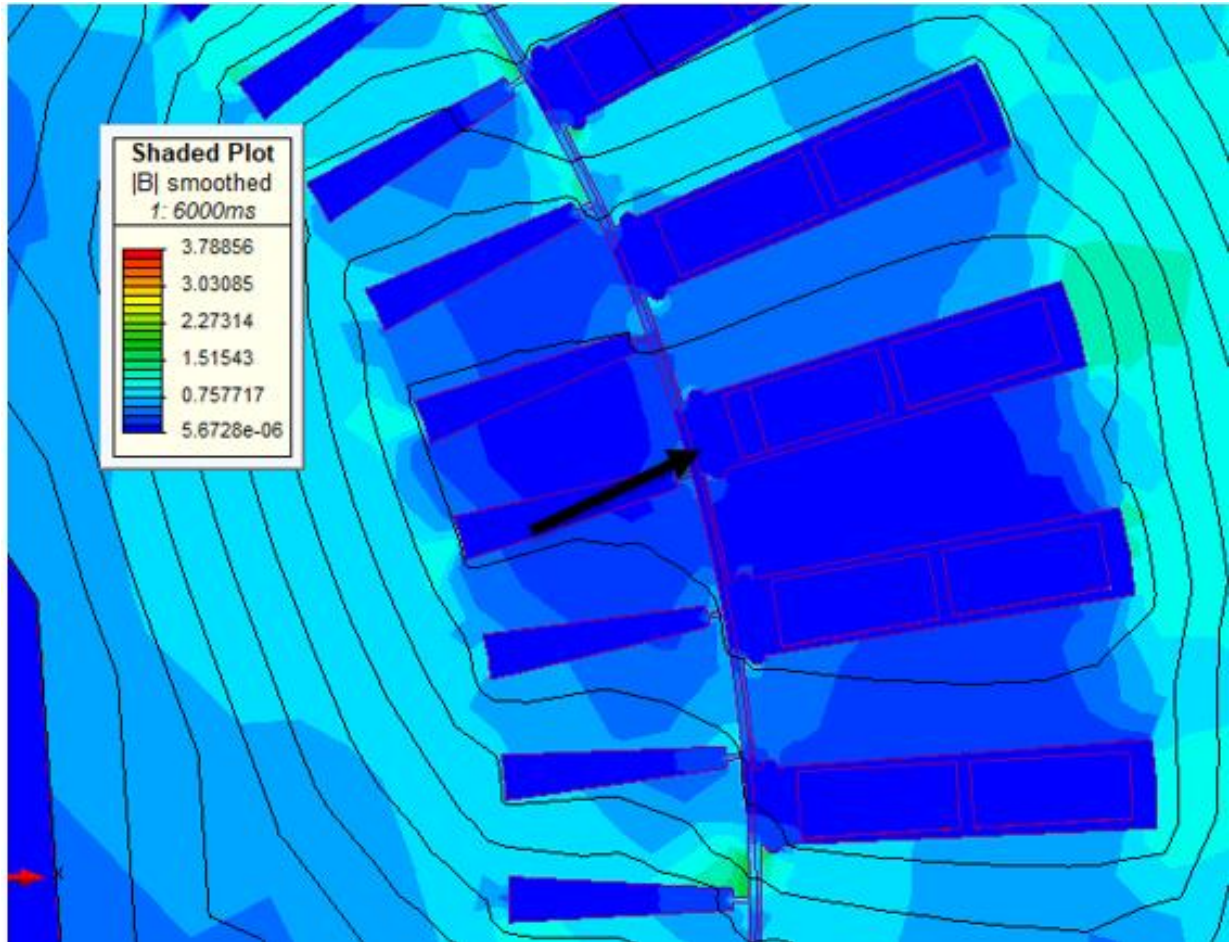


Figure 6.11 Κατανομή Μαγνητικής Ροής στην σπείρα που θα βραχυκυκλωθεί σε υγιή Κατάσταση με 11 kNm Φορτίο.



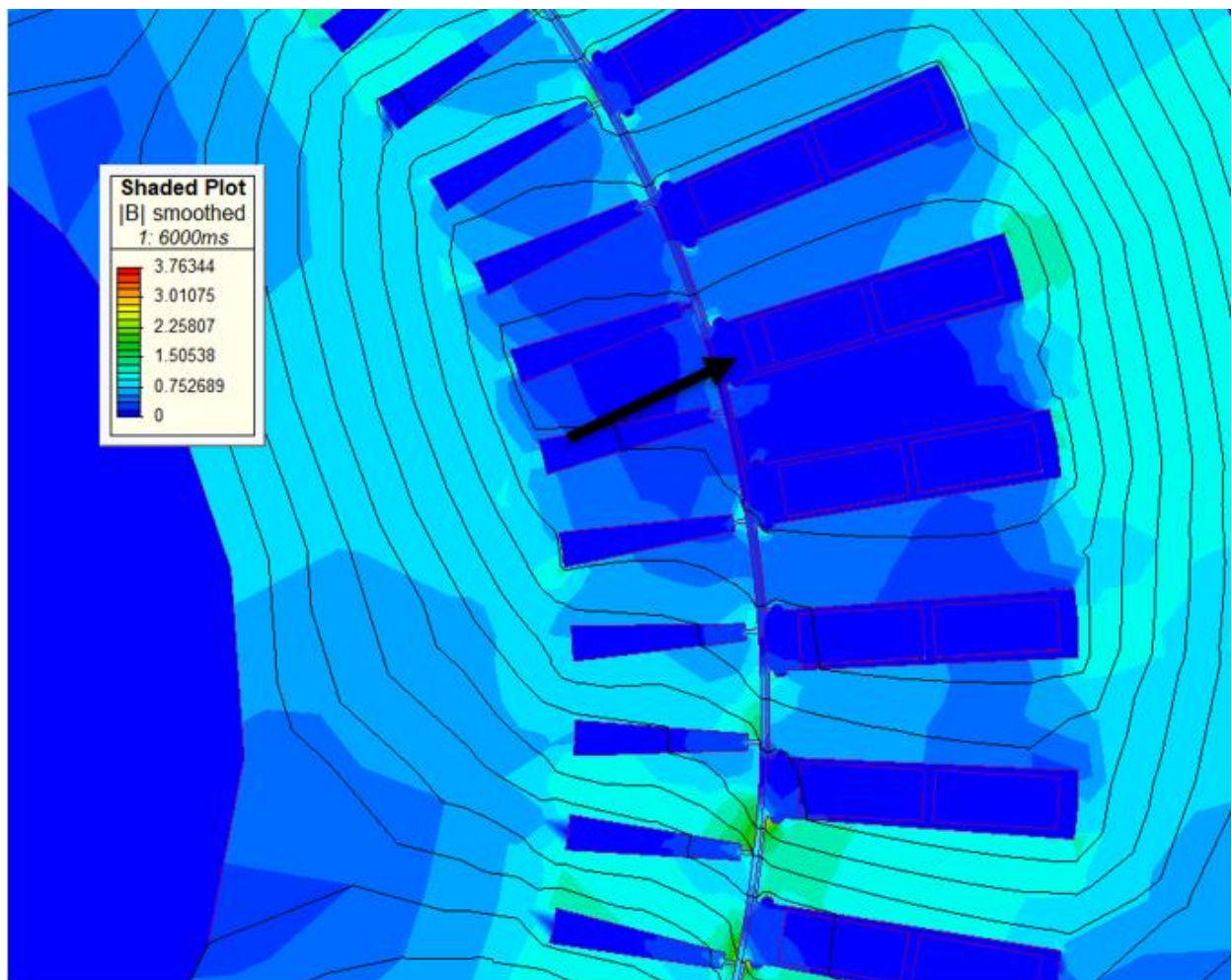


Figure 6.12 Κατανομή Μαγνητικής Ροής στην Βραχυκυκλωμένη Σπείρα με 11 kNm Φορτίο.

## Κεφάλαιο 7. Εξαγωγή Αποτελεσμάτων για την κάθε Διαγνωστική Μέθοδο.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί αναλυτικά η εφαρμογή των διαγνωστικών μεθόδων που συζητήθηκαν στο **Κεφάλαιο 3**. Εξετάζονται τα σενάρια με ονομαστικό φορτίο(11kNm) και με φορτίο μισό του ονομαστικού(5.5 kNm) σε υγιή κατάσταση, σε εσφαλμένη κατάσταση με μια βραχυκυκλωμένη σπείρα με σφάλμα βραχυκύκλωσης 0.2 Ohm και τέλος σε εσφαλμένη κατάσταση με μια βραχυκυκλωμένη σπείρα με σφάλμα βραχυκύκλωσης 0.6 Ohm ώστε να εκτιμηθεί η επίδραση του φορτίου και του σφάλματος βραχυκύκλωσης στις διαγνωστικές μεθόδους.

Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο που αναλύθηκε στα προηγούμενα δυο κεφάλαια για την προσομοίωση λειτουργίας του επαγωγικού κινητήρα κλωβού, η οποία έχει διάρκεια 7 sec με βήμα 0.2 msec.

Έπειτα από την ολοκλήρωση της προσομοίωσης εξάγονται τα απαιτούμενα σήματα στην υγιή και στις περιπτώσεις σφάλματος, ανάλογα με την εκάστοτε διαγνωστική μέθοδο, από το περιβάλλον του SimCenter Magnet σε ένα Spreadsheet. Στην συνέχεια γίνεται η κατάλληλη επεξεργασία σήματος με την βοήθεια του εργαλείου της MATLAB. Τέλος ανιχνεύονται αρμονικές που σχετίζονται με το σφάλμα που να συμφωνούν με τις εξισώσεις του **Κεφαλαίου 3**, ώστε να εξαχθεί ένα ασφαλές συμπέρασμα για την κατάσταση της μηχανής.

### 7.1 Παρακολούθηση Ρεύματος Στάτη και MCSA

#### 7.1.1 Σήματα Ρευμάτων Στάτη στον Χρόνο

Αρχικά θα εξάγουμε το σήμα του ρεύματος του στάτη στην φάση που θα εξελιχθεί το λάθος και στην περίπτωση μας στην Πρώτη Φάση(PHASE A)..Παρακάτω παρουσιάζονται τα εν λόγω σήματα στον χρόνο για φορτίο 11 kNm και για 5.5 kNm.

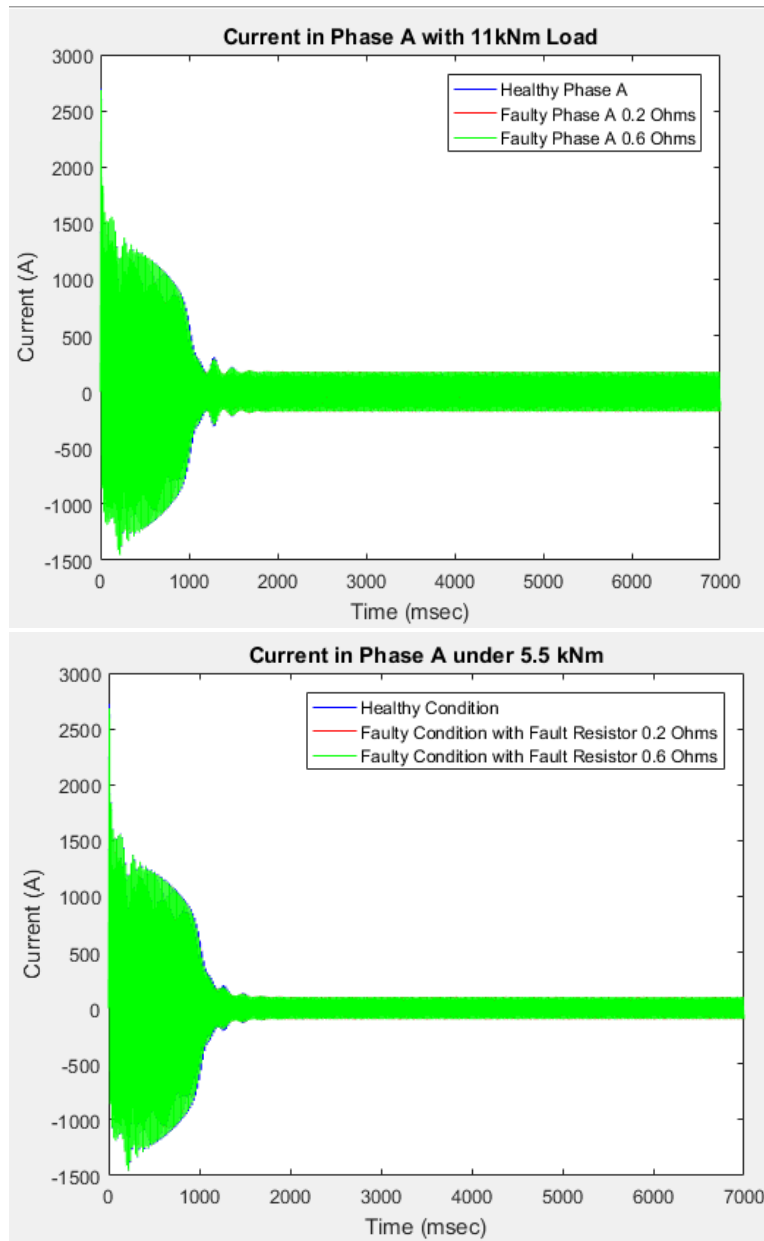


Figure 7.1 Ρεύμα Στάτη Φάσης Α πάνω με φορτίο 11kNm, κάτω με φορτίο 5.5 kNm.

Και στις δύο περιπτώσεις είναι ξεκάθαρο πως στην εκκίνηση το ρεύμα φάσης Α του στάτη είναι υψηλό (τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο) και φτάνουν στην μόνιμη κατάσταση μετά από το ίδιο χρονικό διάστημα και η μορφή τους είναι ημιτονοειδής. Με μία βραχυκυκλωμένη σπείρα και σφάλμα βραχυκύκλωσης 0.2 Ohm το ρεύμα έχει το μέγιστο πλάτος σε σχέση με τα υπόλοιπα δύο και σε υγιή κατάσταση το χαμηλότερο. Επίσης δεδομένου ότι το φορτίο συμπλέκεται στα 1200 milliseconds παρατηρείται μια εμφανής διαταραχή την συγκεκριμένη χρονική στιγμή στα σήματα των ρευμάτων.

Με ονομαστικό φορτίο συμπλεγμένο οι διαφορές είναι πιο διακριτές σε σχέση με την περίπτωση μισού ονομαστικού φορτίου. Η βασική διαφορά που παρουσιάζεται είναι η εξής: υπό ονομαστικό φορτίο το ρεύμα είναι υψηλότερο και σχεδόν διπλάσιο σε σύγκριση με το ρεύμα υπό 5.5 kNm. Το γεγονός αυτό φανερώνει την επίδραση του φορτίου στο ρεύμα που απαιτείται ώστε ο κινητήρας να ξεπεράσει την αδράνεια του φορτίου και να περιστραφεί



### 7.1.2 Εφαρμογή και Αποτελέσματα MCSA

Αφού έγινε η εξαγωγή των σημάτων του ρεύματος επόμενο βήμα είναι η επεξεργασία τους με το εργαλείο της MATLAB. Για την εφαρμογή του MCSA χρησιμοποιήθηκε η μόνιμη κατάσταση του κινητήρα οπότε χρησιμοποιήθηκε το κατάλληλο χρονικό παράθυρο που αγνοεί την εκκίνηση του. Έπειτα με την χρήση της συνάρτησης FFT έγινε ο γρήγορος σχηματισμός Fourier των παραπάνω σημάτων και εξήχθη το φάσμα του ρεύματος στην μόνιμη κατάσταση στο πεδίο της συχνότητας. Στις εικόνες Figure 7.2 και παρουσιάζεται το εν λόγω γράφημα.

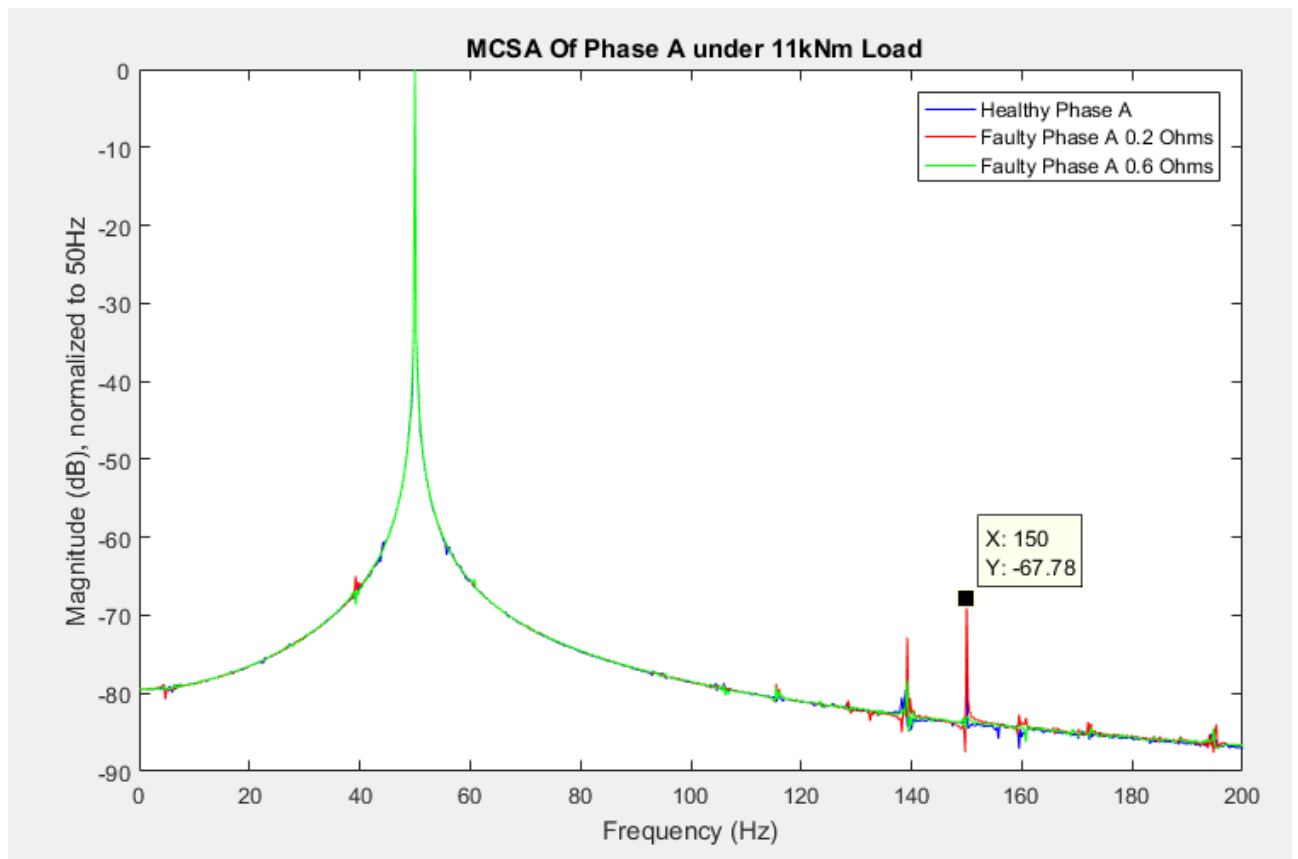


Figure 7.2 MCSA υπό Ονομαστικό Φορτίο 11 kNm.

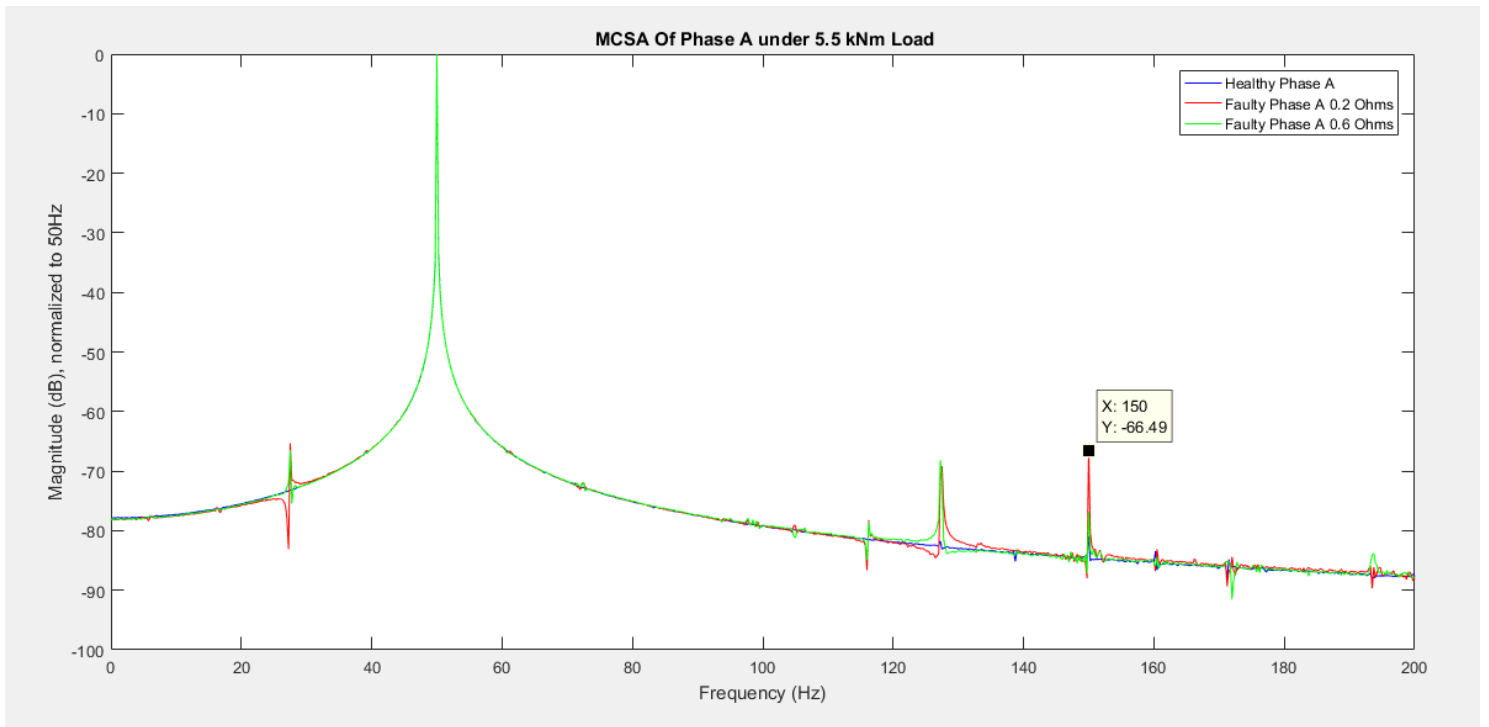


Figure 7.3 MCSA υπό Φορτίο 5.5 kNm.

Αρχικά και στις δύο περιπτώσεις φορτίου βλέπουμε πως η βασική αρμονική του φάσματος βρίσκεται στα 50 Hz. Όπως έχει εξηγηθεί στο [Κεφάλαιο 3](#) σε περίπτωση ασυμμετρίας που οφείλεται σε σφάλμα σε σφάλμα βραχυκυκλωμένων σπειρών το πλάτος της 3<sup>ης</sup> αρμονικής θα αυξηθεί ανάλογα με την σοβαρότητα του σφάλματος. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζεται η αυξομείωση του φάσματος στα 150 Hz :

Φορτίο (kNm)	Healthy(dB)	0.2 Ohms Σφάλμα Βραχυκύκλωσης(dB)	Διαφορά(+/-) σε dB	0.6 Ohms Σφάλμα Βραχυκύκλωσης(dB)	Διαφορά(+/-) σε dB
11	-77.78	-67.68	9.90	-83.17	-5.39
5.5	-80.9	-66.49	14.41	-76.84	4.06

Table 7.1 Πλάτη Τρίτης Αρμονικής ανά Περιπτώσεις

Υπό Ονομαστικό Φορτίο: Στην περίπτωση που η αντίσταση του βραχυκυκλώματος είναι 0.2 Ohm η αύξηση της αρμονικής είναι περίπου 10 dB που μας φανερώνει την ύπαρξη σφάλματος βραχυκυκλωμένων σπειρών αρκετής σοβαρότητας. Αντίθετα στην περίπτωση των 0.6 Ohms το πλάτος της τρίτης αρμονικής μειώνεται κατά 5.39 dB ενώ θα έπρεπε να παρουσιάζει αύξηση διότι υπάρχει βραχυκυκλωμένη σπείρα στην προσομοίωση του μοντέλου του κινητήρα.

Υπό Φορτίο 5.5 kNm : Σε αυτήν την περίπτωση το πλάτος της εσφαλμένης κατάστασης με σφάλμα βραχυκύκλωσης 0.2 Ohm αυξάνεται σε σχέση με το πλάτος της υγιούς κατάστασης κατά 14.41 dB που υποδηλώνει την πιθανή ύπαρξη σφάλματος βραχυκύκλωσης. Με σφάλμα βραχυκύκλωσης 0.6 Ohm το πλάτος της εσφαλμένης κατάστασης είναι αυξημένο κατά 4.06 dB.

Συμπερασματικά η μείωση του φορτίου αναβαθμίζει το αρμονικό περιεχόμενο και τονίζει τυχόν ασυμμετρίες ακόμα και με μικρότερη τιμή αντίστασης βραχυκυκλώματος, πράγμα που δεν παρατηρήθηκε στο ονομαστικό φορτίο.

Στην συνέχεια λαμβάνοντας υπόψη πως ο δρομέας έχει 70 μπάρες και σε συνδυασμό με την θεωρία του [Κεφαλαίου 3](#), εξετάζεται το πλάτος των PSH. Στις παρακάτω **εικόνες** αναλύεται το φάσμα στις κατάλληλες συχνότητες :

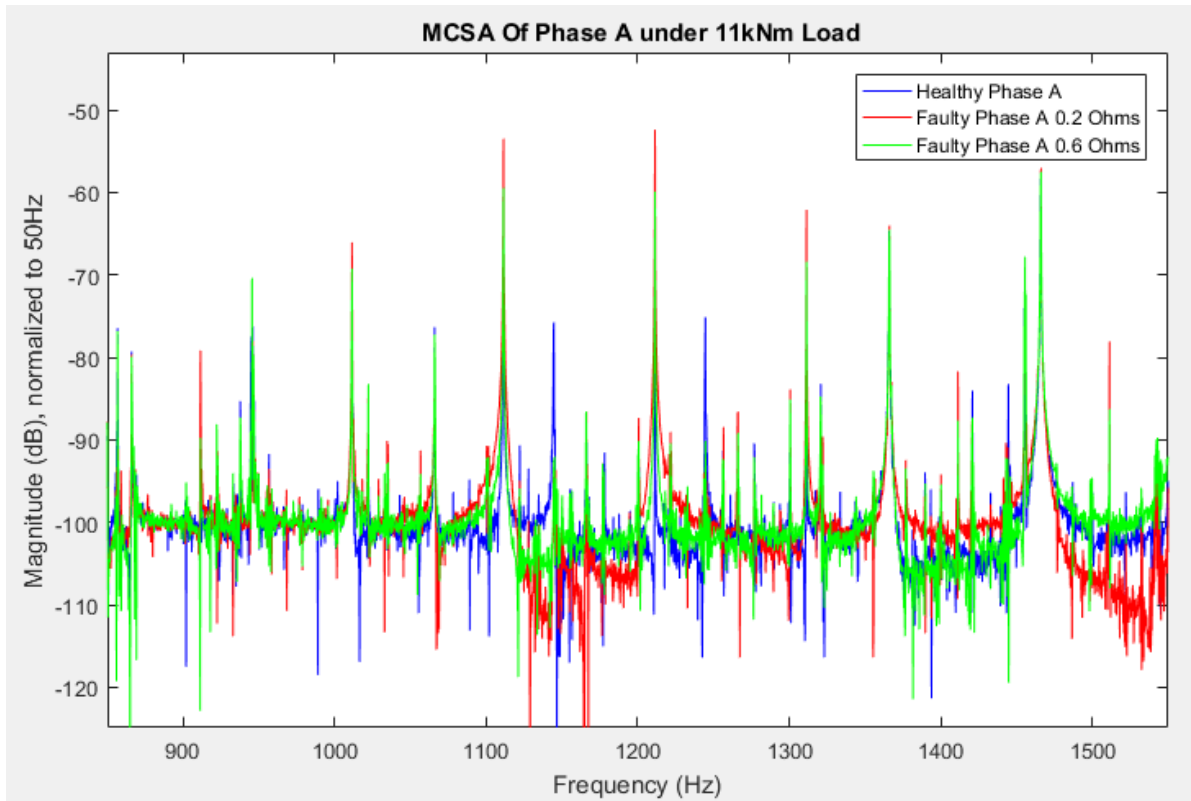


Figure 7.4 MCSA Εστιασμένο στις PSH -11 kNm.

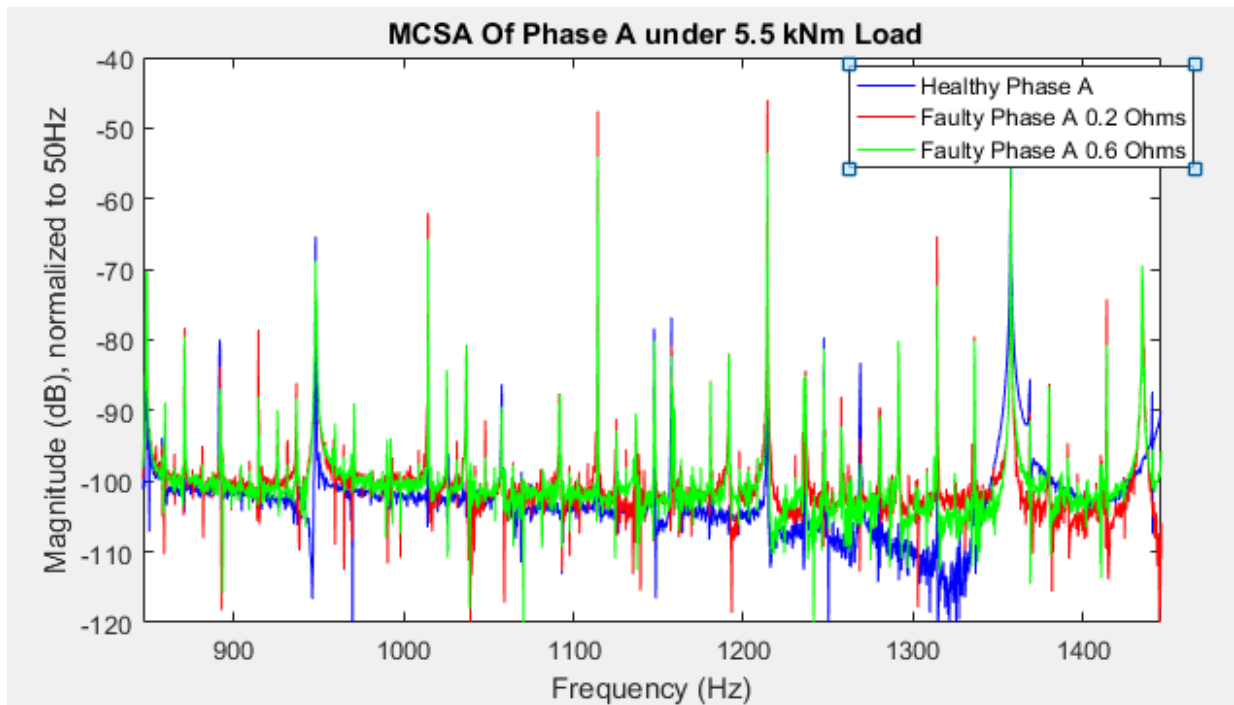


Figure 7.5 MCSA Εστιασμένο στις PSH -5.5 kNm.

Βλέπουμε και στις δύο περιπτώσεις φορτίου, στην υγιή κατάσταση το πλάτος των PSH είναι μικρό και όχι μηδενικό. Η αύξηση του πλάτους μπορεί να οδηγήσει σε συμπέρασμα ύπαρξης βραχυκυκλωμένων σπειρών. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι αλλαγές του πλάτους των PSH:

Υπό ονομαστικό φορτίο:

Τύπος	Συχνότητα (Hz)	Healthy (dB)	0.2 Ohms Σφάλμα Βραχυκύκλωσης (dB)	Διαφορά (+/-) σε dB	0.6 Ohms Σφάλμα Βραχυκύκλωσης (dB)	Διαφορά (+/-) σε dB
$\left[\frac{R}{L_p}(1 - s) - 7\right] f_s$	811	-95.97	-92.58	3.39	-94.27	1.7
$\left[\frac{R}{L_p}(1 - s) - 5\right] f_s$	911	-93.116	-79.15	14.01	-89.75	3.36
$\left[\frac{R}{L_p}(1 - s) - 3\right] f_s$	1011	-68.76	-66.03	2.73	-69.22	-1.54
$\left[\frac{R}{L_p}(1 - s) - 1\right] f_s$	1111	-61.82	-53.48	8.34	-59.44	2.38
$\left[\frac{R}{L_p}(1 - s) + 1\right] f_s$	1211	-77.59	-52.39	25.2	-59.87	17.72
$\left[\frac{R}{L_p}(1 - s) + 3\right] f_s$	1311	-77.05	-62.08	14.97	-68.38	8.67
$\left[\frac{R}{L_p}(1 - s) + 5\right] f_s$	1411	-84.89	-81.69	3.2	-87.66	-2.77
$\left[\frac{R}{L_p}(1 - s) + 7\right] f_s$	1511	-94.62	-78.07	16.55	-86.27	8.35

Table 7.2 Πλάτος PSH υπό ονομαστικό φορτίο

Για το σφάλμα βραχυκύκλωσης 0.2 Ohm παρατηρείται πως υπάρχει αύξηση κυρίως στις συχνότητες 911 Hz, 1311 Hz και 1511 Hz και η πιο σημαντική αύξηση στα 1211 Hz των 25.2 dB σε σχέση με το πλάτος της υγιούς κατάστασης, δηλαδή περίπου 1.5 τάξη μεγέθους διαφορά. Η διαφορά πλάτους στις παραπάνω συχνότητες αποτελεί έναν έμπιστο δείκτη σφάλματος βραχυκυκλωμένων σπειρών.

Με το σφάλμα βραχυκύκλωσης στα 0.6 Ohm τα πλάτη στις προαναφερθείσες συχνότητες δεν παρουσιάζουν τις ίδιες αυξήσεις σε σχέση με το σφάλμα των 0.2 Ohm αλλά μικρότερη. Στα 1211 Hz η αύξηση είναι εξίσου σημαντική της τάξης των 17.72 dB που είναι μικρότερη από την περίπτωση των 0.2 Ohm αλλά παραμένει έμπιστος δείκτης υπογραφής σφάλματος. Οι παραπάνω παρατηρήσεις μας δείχνουν πως η αύξηση της τιμής της αντίστασης του βραχυκυκλώματος επηρεάζει τα πλάτη των PSH μειώνοντας την ευαισθησία της μεθόδου.

Υπό Φορτίο 5.5 kNm :

Τύπος	Συχνότητα( Hz)	Healthy( dB)	0.2 Ohms Σφάλμα Βραχυκύκλωση ς(dB)	Διαφορά( +/-) σε dB	0.6 Ohms Σφάλμα Βραχυκύκλωση ς(dB)	Διαφορά( +/-) σε dB
$\left[\frac{R}{L_p}(1 - s) - 7\right] f_s$	814	-96.13	-89.28	6.85	-94.13	2
$\left[\frac{R}{L_p}(1 - s) - 5\right] f_s$	914	-92.35	-78.55	13.8	-88	4.35
$\left[\frac{R}{L_p}(1 - s) - 3\right] f_s$	1014	-84.66	-62.02	22.64	-65.67	18.99
$\left[\frac{R}{L_p}(1 - s) - 1\right] f_s$	1114	-70.3	-47.6	22.7	-54.04	15.99
$\left[\frac{R}{L_p}(1 - s) + 1\right] f_s$	1214	-70.59	-46.03	24.56	-53.48	17.11
$\left[\frac{R}{L_p}(1 - s) + 3\right] f_s$	1314	-91.48	-65.34	26.14	-72.28	19.2
$\left[\frac{R}{L_p}(1 - s) + 5\right] f_s$	1414	-94.38	-74.24	20.14	-80.69	13.69

Table 7.3 Πλάτος PSH υπό φορτίο 5.5 kNm

Βλέποντας τα παραπάνω για σφάλμα 0.2 Ohms όλες οι PSH παρουσιάζουν αύξηση στο πλάτος τους και ιδίως για συχνότητες μεγαλύτερες ή ίσες των 1014 Hz και η αύξηση είναι της τάξεως των 20 dB. Αυτή η μεταβολή μπορεί να οδηγήσει στην διάγνωση σφάλματος βραχυκυκλωμένων σπειρών . Βλέπουμε πως για μικρότερο φορτίο η ανίχνευση για αλλαγή στο πλάτος των PSH έχει πολύ καλή ευαισθησία.

Τώρα για σφάλμα 0.6 Ohms πάλι η αύξηση του πλάτους των PSH για συχνότητες μεγαλύτερες των 1014 Hz είναι σίγουρα πάνω από 10 dB και σε κάποιες περιπτώσεις προσεγγίζουν τα 20 dB. Οπότε και με μεγαλύτερη αντίσταση σφάλματος η μείωση φορτίου θέτει την MCSA ικανή για

την διάγνωση του εν λόγω σφάλματος, η οποία με ονομαστικό φορτίο ήταν αδύνατη καθώς όπως είδαμε το πλάτος των PSH για 0.6 Ohm όχι μόνο δεν αυξάνονταν αλλά σε κάποιες περιπτώσεις μειώνονταν καθιστώντας την εν λόγω μέθοδο ανίκανη διάγνωσης.

Στην συνέχεια πραγματοποιείται η σύγκριση του φάσματος της υγιούς κατάστασης σε σχέση με τις εσφαλμένες περιπτώσεις σε μεγαλύτερες συχνότητες ακολουθώντας την **Σχέση (3.1)** του [Κεφαλαίου 3](#). Τα φάσματα των δύο περιπτώσεων παρουσιάζονται στις

και

**Figure 7.7**

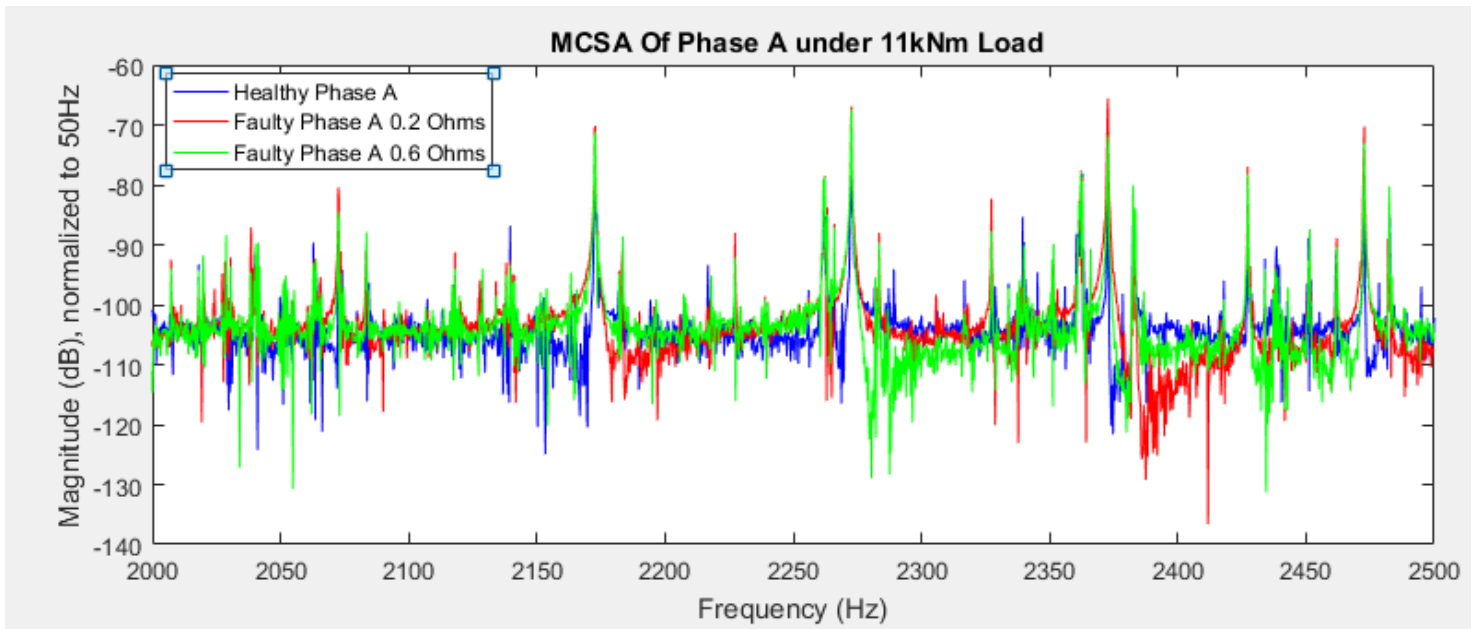


Figure 7.6 Φάσμα Ρεύματος σε υψηλές συχνότητες -11kNm.



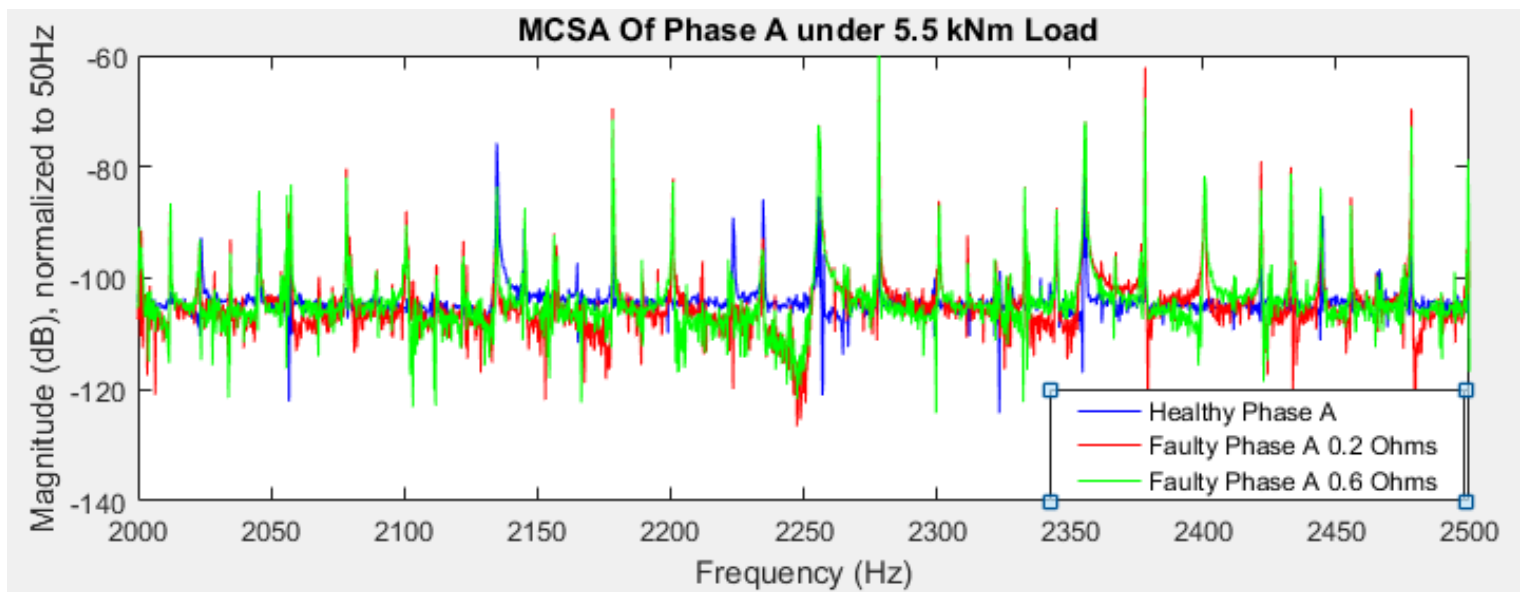


Figure 7.7 Φάσμα Ρεύματος σε υψηλές συχνότητες -5.5kNm.

Υπό ονομαστικό φορτίο:

Τύπος	Συχνότητα( Hz)	Healthy( dB)	0.2 Ohms Σφάλμα Βραχυκύκλωσης(dB)	Διαφορά( +/-) σε dB	0.6 Ohms Σφάλμα Βραχυκύκλωσης(dB)	Διαφορά( +/-) σε dB
$\left[2\frac{R}{p}(1-s) - 5\right]f_s$	2073	-93.116	-79.15	14.01	-89.75	3.36
$\left[2\frac{R}{p}(1-s) - 3\right]f_s$	2173	-68.76	-66.03	2.73	-69.22	-1.54
$\left[2\frac{R}{p}(1-s) - 1\right]f_s$	2273	-61.82	-53.48	8.34	-59.44	2.38
$\left[2\frac{R}{p}(1-s) + 1\right]f_s$	2373	-77.59	-52.39	25.2	-59.87	17.72
$\left[2\frac{R}{p}(1-s) + 3\right]f_s$	2473	-84.89	-81.69	3.2	-87.66	-2.77

**Table 7.4 Πλάτη Αρμονικών στις συχνότητες 2000-2500 Hz υπό Ονομαστικό Φορτίο**

Στην περίπτωση αντίστασης σφάλματος βραχυκύκλωσης 0.2 Ohm παρατηρείται μια μικρή αύξηση του πλάτους των αρμονικών της εσφαλμένης κατάστασης σε σχέση με την υγιή στα 2173 Hz και 2473 Hz ενώ στα 2273 Hz παρατηρείται μια ελαφρώς μεγαλύτερη αύξηση. Στις υπόλοιπες συχνότητες η αύξηση είναι αρκετά μεγαλύτερη ιδίως στην συχνότητα των 2373 Hz όπου η διαφορά του πλάτους παρουσιάζει μια αύξηση των 25.2 dB. Θα μπορούσαμε να συμπεράνουμε με βάση τις αλλαγές στις προαναφερθείσες συχνότητες πως υπάρχει σφάλμα βραχυκυκλωμένων σπειρών και γενικότερα η αξιοπιστία της μεθόδου είναι καλή.

Στην περίπτωση αντίστασης σφάλματος βραχυκύκλωσης 0.6 Ohm, σε κάποιες συχνότητες το πλάτος των αρμονικών της εσφαλμένης κατάστασης μειώνεται σε σχέση με το πλάτος του σφάλματος στην υγιή κατάσταση και πιο συγκεκριμένα στις συχνότητες 2173 Hz και 2473 Hz. Στην συχνότητα 2373 υπάρχει μια αύξηση του πλάτους περίπου στα 8.7 dB και στα 2173 Hz μια αύξηση κοντά στα 2.4 dB. Η σημαντικότερη αύξηση εμφανίζεται στα 2373 Hz με 17.72

dB διαφορά. Αυτή η αύξηση έχει την κατάλληλη ευαισθησία για την εξαγωγή συμπεράσματος εμφάνισης σφάλματος βραχυκυκλωμένης σπείρας. Μελετώντας τις συχνότητες της που προκύπτουν από την **Σχέση (3.1)** βλέπουμε πως και εδώ η αύξηση της τιμής της αντίστασης του βραχυκυκλώματος επηρεάζει το φάσμα των αρμονικών και μπορεί υπό περιπτώσεις να μειώσει την αξιοπιστία διάγνωσης της μεθόδου MCSA.

Υπό φορτίο 5.5 kNm :

Τύπος	Συχνότητα( Hz)	Healthy( dB)	0.2 Ohms Σφάλμα Βραχυκύκλωση ς(dB)	Διαφορά( +/-) σε dB	0.6 Ohms Σφάλμα Βραχυκύκλωση ς(dB)	Διαφορά( +/-) σε dB
$\left[2\frac{R}{p}(1-s) - 5\right]f_s$	2078	-101.7	-80.34	21.36	-81.91	19.79
$\left[2\frac{R}{p}(1-s) - 3\right]f_s$	2178	-92.2	-71.49	20.71	-71.49	20.71
$\left[2\frac{R}{p}(1-s) - 1\right]f_s$	2278	-86.53	-58.1	28.43	-58.55	27.98
$\left[2\frac{R}{p}(1-s) + 1\right]f_s$	2378	-84.22	-62.11	22.11	-67.7	16.52
$\left[2\frac{R}{p}(1-s) + 3\right]f_s$	2478	-91.12	-69.57	21.55	-72.68	18.44

Table 7.5 Πλάτη Αρμονικών στις συχνότητες 2000-2500 Hz υπό Φορτίο 5.5 kNm

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα για σφάλμα 0.2 Ohms σε όλες τις συχνότητες τα πλάτη των αρμονικών έχουν μια πολύ σημαντική αύξηση πάνω από 20 dB σε μια περίπτωση, η αύξηση αυτή πλησιάζει τα 30 dB. Το αρμονικό περιεχόμενο είναι ικανό για ασφαλή διάγνωση σφάλματος βραχυκυκλωμένων σπειρών και μάλιστα η MCSA έχει μεγάλη ευαισθησία που οφείλεται στην μείωση του φορτίου.

Τώρα και για σφάλμα 0.6 Ohms η αύξηση του πλάτους των εσφαλμένων αρμονικών είναι σημαντική με την μικρότερη αύξηση να είναι τα 16.5 dB και η μεγαλύτερη είναι τα 27.98 dB. Η ευαισθησία της μεθόδου έχει αυξηθεί χάρη στην μείωση του φορτίου, καθώς στην περίπτωση του ονομαστικού η διάγνωση σφάλματος δεν ήταν τόσο βέβαιη, καθώς είδαμε παραπάνω πως σε μερικές περιπτώσεις το πλάτος των αρμονικών ήταν μικρότερο σε σχέση με αυτό της υγιούς κατάστασης.

#### *Επίδραση Φορτίου στην MCSA*

Το συμπέρασμα από την παραπάνω διαδικασία είναι πως σε ονομαστικό φορτίο η MCSA είναι αρκετά ικανή για διάγνωση σφάλματος βραχυκυκλωμένης σπείρας για βραχυκύκλωμα μικρής αντίστασης. Όσο αυξάνεται η εν λόγω αντίσταση οι αλλαγές στο πλάτος των αρμονικών δεν είναι ικανές για εξαγωγή ασφαλούς συμπεράσματος, μειώνοντας έτσι την αξιοπιστία της μεθόδου.

Μειώνοντας το φορτίο στο μισό ανεξάρτητα από την τιμή της αντίστασης του βραχυκυκλώματος, το πλάτος των αρμονικών αυξάνεται σημαντικά, αναβαθμίζοντας με αυτόν τον τρόπο την ευαισθησία και την αξιοπιστία της μεθόδου MCSA. Άρα εύκολα συμπεραίνεται πως για μειωμένο φορτίο σε σχέση με το ονομαστικό τα αποτελέσματα είναι καλύτερα και η MCSA γίνεται μια στιβαρή και έμπιστη μέθοδος διάγνωσης σφαλμάτων βραχυκυκλωμένων σπειρών.

## 7.2 Παρακολούθηση Stray Flux στην Μόνιμη Κατάσταση.

### 7.2.1 Εξαγωγή Σήματος Μαγνητικής Ροής από Μόνιμη Κατάσταση

Στο μοντέλο μας έχουμε τοποθετήσει τρεις αισθητήρες ανίχνευσης μαγνητικής ροής που απέχει η κάθε μια μεταξύ τους  $40^\circ$ . Η πραγματική μαγνητική ροή που ανιχνεύουν οι αισθητήρες οφείλονται στην μαγνητική ροή που διαρρέεται από τις κεφαλές των τυλιγμάτων. Για αυτό τον λόγο αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί το σήμα της μαγνητικής ροής του αισθητήρα που βρίσκεται στον άξονα των βραχυκυκλωμένων σπειρών.

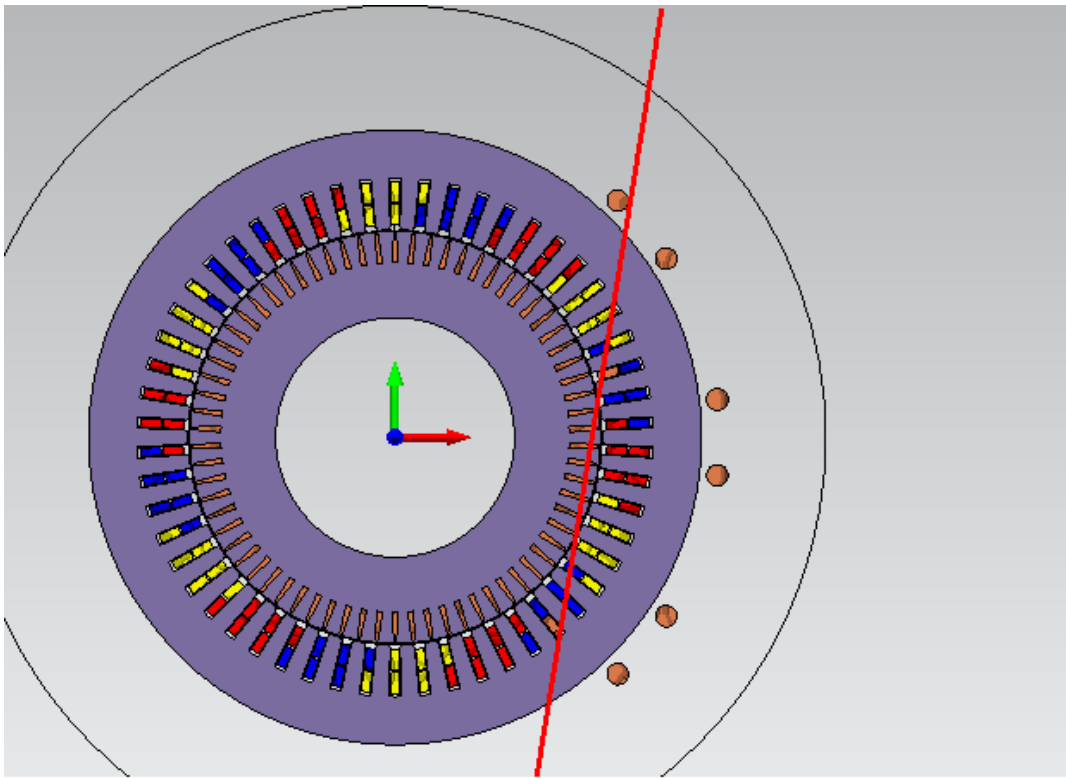


Figure 7.8 Θέση αισθητήρων σε σχέση με την βραχυκυκλωμένη σπείρα.

Όπως βλέπουμε στο Figure 7.8 ο κατάλληλος αισθητήρας για να ληφθεί υπόψη είναι αυτός που βρίσκεται πιο ψηλά στην μηχανή, ο Sensor B.

Αρχικά εξάγουμε το σήμα της μαγνητικής ροής σε υγιή και εσφαλμένες τόσο σε ονομαστικό αλλά και στο μισό του ονομαστικού φορτίου .

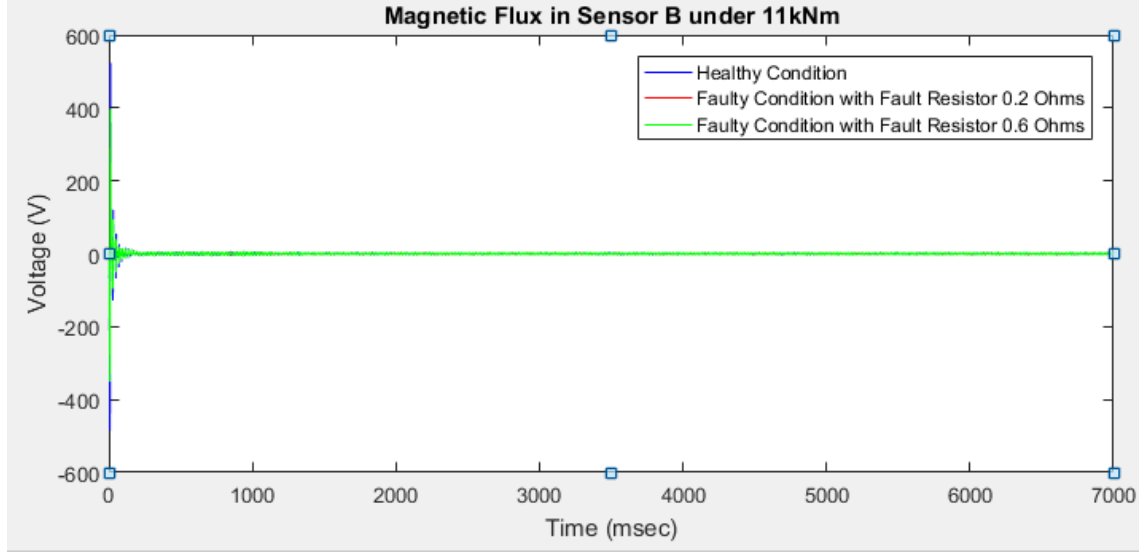


Figure 7.9 Σήμα Μαγνητικής Ροής Sensor B -11 kNm

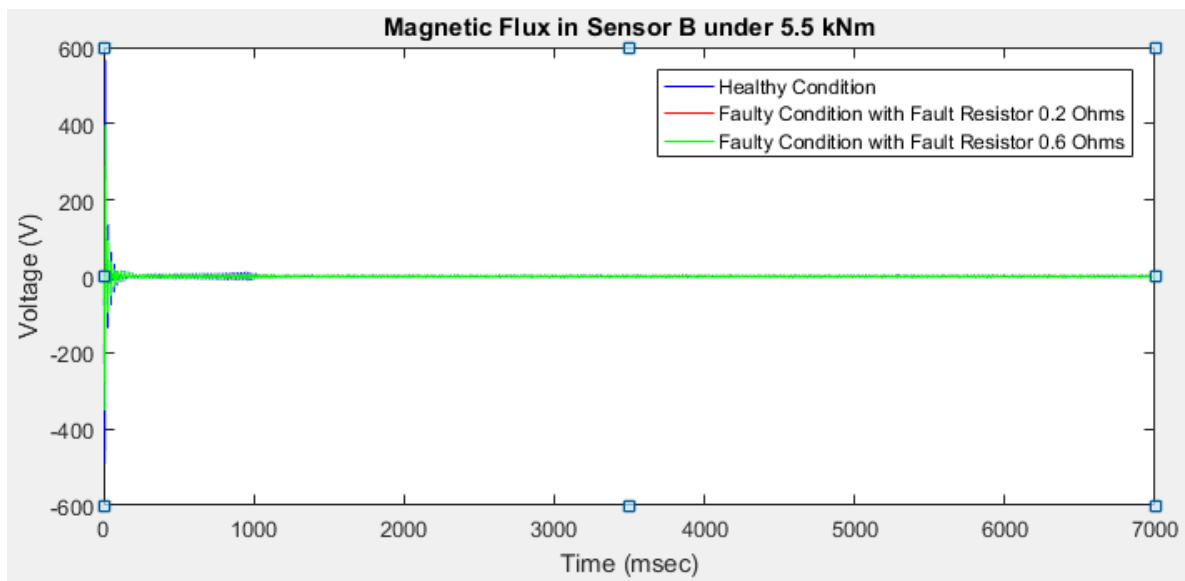


Figure 7.10 Σήμα Μαγνητικής Ροής Sensor B -5.5 kNm.

Και στις δύο περιπτώσεις κατά την εκκίνηση υπάρχει μια ραγδαία αύξηση της μαγνητικής ροής η οποία σταδιακά εξομαλύνεται στα 1.2 seconds, την στιγμή που συμπλέκεται το φορτίο. Τα πλάτη ανάμεσα σε υγιή και εσφαλμένων καταστάσεων είναι σχεδόν τα ίδια. Τα σήματα είναι περιοδικά αλλά όχι ημιτονοειδή.

Στην περίπτωση του μισού ονομαστικού φορτίου το πλάτος του σήματος είναι ελαφρώς αυξημένο. Κατά την εκκίνηση διακρίνεται μια μεγάλη κυμάτωση της μαγνητικής ροής της υγιούς κατάστασης, η οποία δεν διακρίνεται τόσο έντονα στην περίπτωση του ονομαστικού φορτίου και εξομαλύνεται στα 1.2 seconds.

### *7.2.2 Φάσμα Μαγνητικής Ροής στην Μόνιμη Κατάσταση*

Μετά την εξαγωγή του σήματος της μαγνητικής ροής, γίνεται η επεξεργασία και απεικόνιση του φάσματος του στην μόνιμη κατάσταση. Αφού τέθηκε το κατάλληλο χρονικό παράθυρο ώστε να συμπεριληφθεί μόνο η μόνιμη κατάσταση του σήματος και όχι η εκκίνηση, χρησιμοποιείται η συνάρτηση FFT του εργαλείου της MATLAB για τον μετασχηματισμό του σήματος από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας.

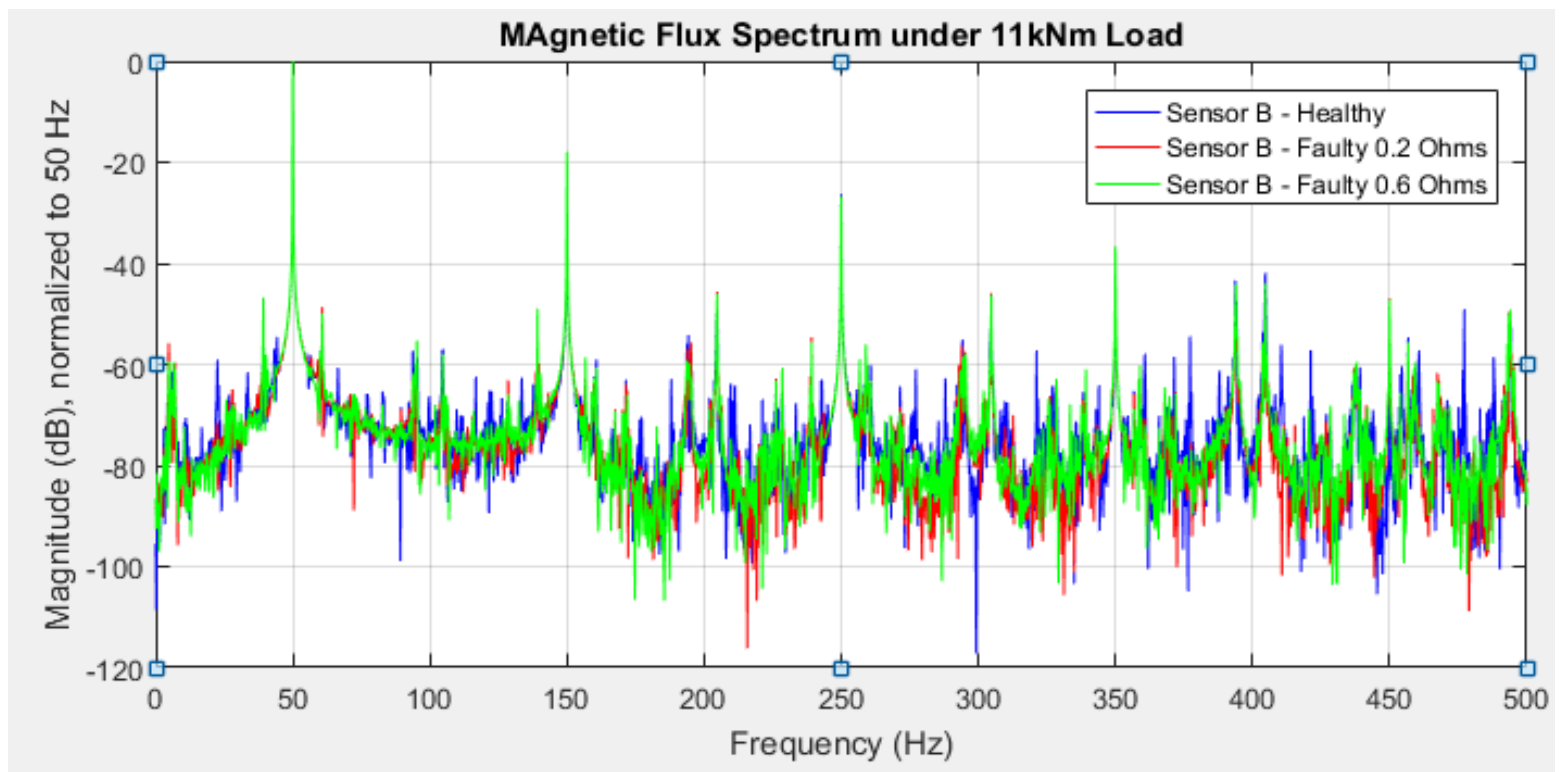


Figure 7.9 Φάσμα Μαγνητικής Ροής-11kNm.

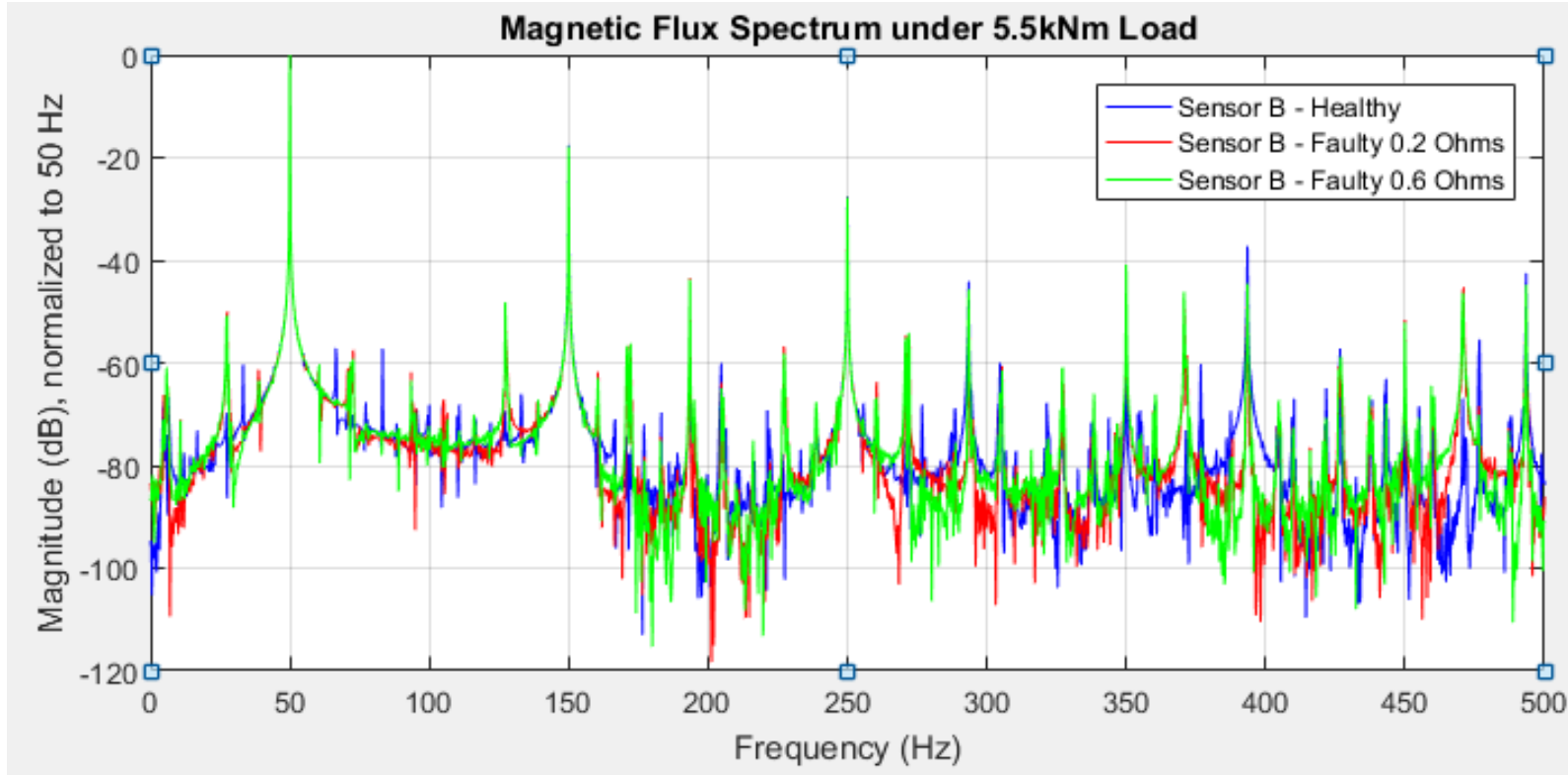


Figure 7.10 Φάσμα Μαγνητικής Ροής-5.5kNm.



Και στις δύο περιπτώσεις η βασική αρμονική παρατηρείται στα 50 Hz ενώ ισχυρή είναι ακόμη και στην υγιή κατάσταση η τρίτη αρμονική στα 150 Hz με τα αποτελέσματα να συμφωνούν με την θεωρία του [Κεφαλαίου 3](#). Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις διαφορές στην 9<sup>η</sup> αρμονική (450 Hz):

Φορτίο (kNm)	Healthy(dB)	0.2 Ohms Σφάλμα Βραχυκύκλωσης (dB)	Διαφορά(+/-) σε dB	0.6 Ohms Σφάλμα Βραχυκύκλωσης (dB)	Διαφορά(+/-) σε dB
11	-63.3	-47	16.3	-47.2	16.1
5.5	-62.39	-51.62	10.77	-52.14	10.25

Table 7.6 Συμπεριφορά 9ης Αρμονικής από την Stay Flux.

Και στις δύο περιπτώσεις φορτίου διακρίνεται πως το πλάτος της 9<sup>ης</sup> αρμονικής στις εσφαλμένες περιπτώσεις αυξάνεται σε σχέση με το πλάτος της υγιούς. Υπό ονομαστικό φορτίο η αύξηση του πλάτους είναι της ίδιας τάξης dB. Στο μισό ονομαστικό φορτίο επίσης η αύξηση του πλάτους των αρμονικών στις εσφαλμένες περιπτώσεις είναι ίδιας τάξης dB, αλλά μικρότερη σε σχέση το ονομαστικό φορτίο.

Έπειτα θα μελετηθεί το φάσμα στις συχνότητες που εμφανίζονται οι PSH.

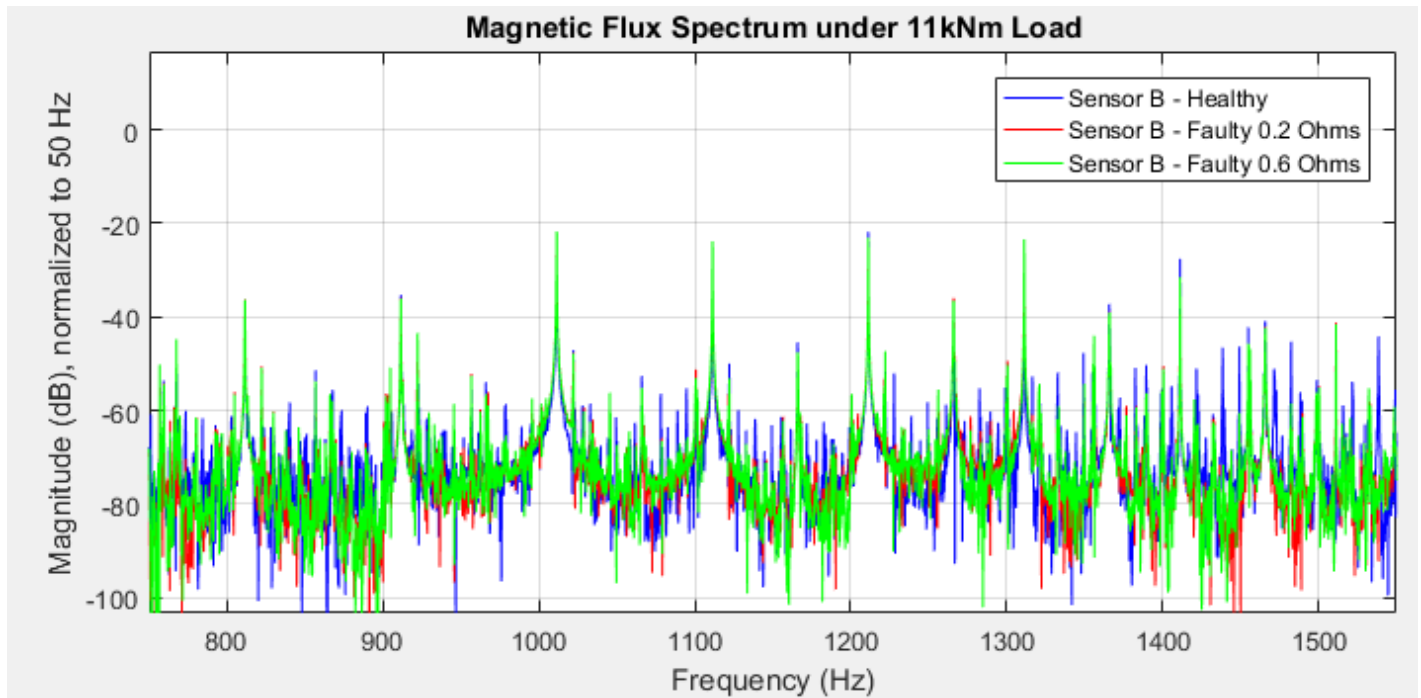


Figure 7.11 Συχνότητες εμφάνισης PSH από την Stay Flux -11kNm.

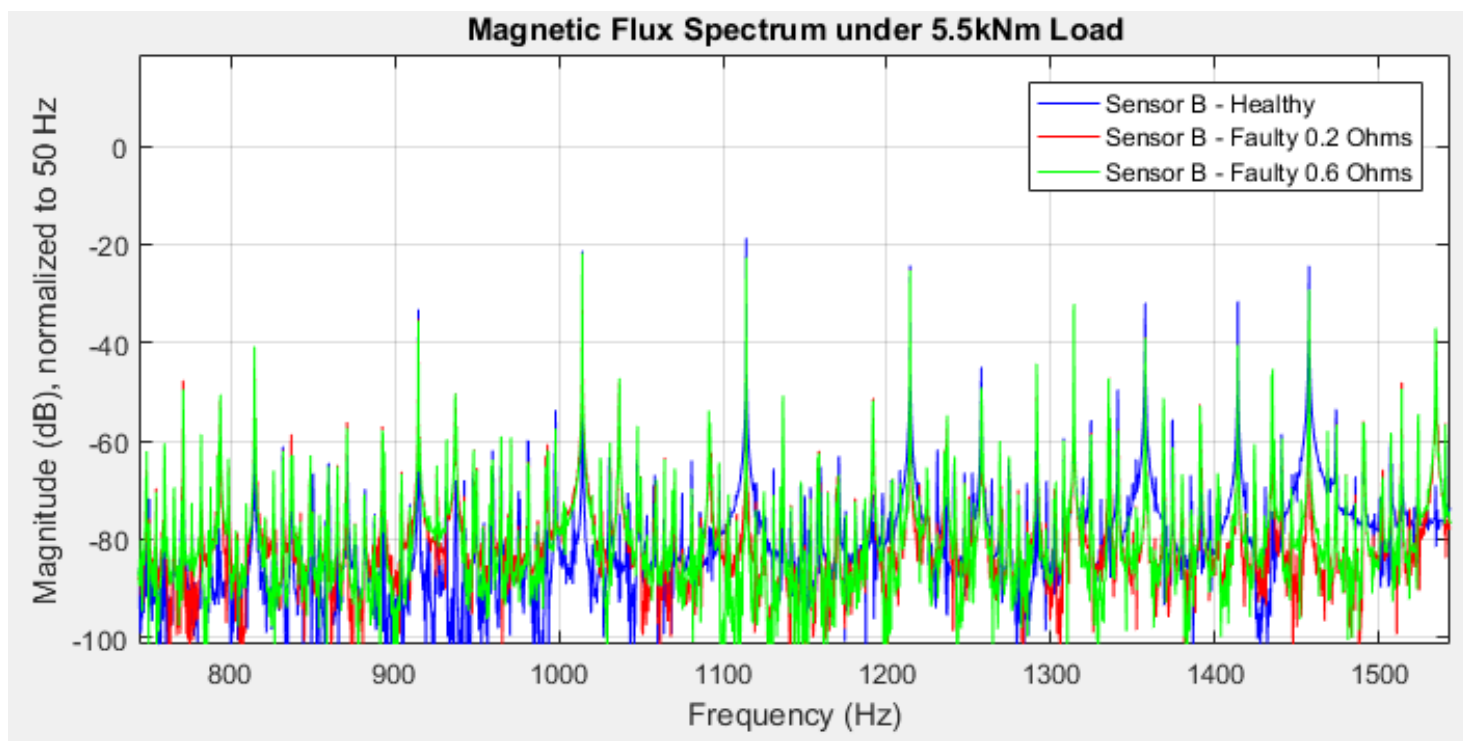


Figure 7.12 Συχνότητες εμφάνισης PSH από την Stay Flux -5.5 kNm.

Υπό ονομαστικό φορτίο:

Frequency(Hz) )	Healthy (dB)	Πλάτος Αρμονικών με 0.2 Αντίσταση (dB)	Difference(+ /-) σε dB	Πλάτος Αρμονικών με 0.6 Αντίσταση (dB)	Difference(+ /-) σε dB
811	-36.71	-36.31	0.41	-36.37	0.34
911	-35.37	-36	-0.63	-36.19	-0.82
1011	-21.91	-21.91	0	-21.73	0.18
1111	-25.23	-24.67	0.56	-23.86	1.37
1211	-21.84	-23.33	-1.49	-23.15	-1.31
1311	-25.42	-23.62	1.8	-23.44	1.98
1411	-27.6	-31.69	-4.08	-31.56	-3.96

Table 7.7 Μεταβολή Πλάτους PSH από την Stay Flux -11kNm.

Υπό φορτίο 5.5 kNm :

Frequency(Hz)	Healthy (dB)	Πλάτος Αρμονικών με 0.2 Αντίσταση (dB)	Difference( +/-) σε dB	Πλάτος Αρμονικών με 0.6 Αντίσταση (dB)	Difference( +/-) σε dB
814	-41.43	-40.86	-0.57	-40.76	0.67
914	-33.13	-35.23	-2.1	-35.33	-2.2
1014	-21.33	-21.87	0.54	-21.75	-0.42
1114	-18.67	-23.19	-4.52	-22.64	-3.97
1214	-24.29	-25.19	-0.9	-25.3	-1.01
1314	-37.34	-32.88	4.46	-32.12	5.22
1414	-31.51	-40.37	8.86	-40.37	8.86

**Table 7.8 Μεταβολή Πλάτους PSH από την Stay Flux-5.5kNm.**

Σε ονομαστικό φορτίο το πλάτος των αρμονικών με σφάλμα βραχυκύκλωσης 0.2 Ohm σε αρκετές περιπτώσεις παρουσιάζει μια πολύ μικρή αύξηση σε σχέση με την υγιή κατάσταση, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις παρατηρείται μείωση του. Τα ίδια ακριβώς ισχύουν και για σφάλμα βραχυκύκλωσης 0.6 Ohm. Συμπερασματικά το αρμονικό περιεχόμενο της μαγνητικής ροής στις συχνότητες των PSH υπό ονομαστικό φορτίο δεν μας δίνει κάποια έμπιστη υπογραφή σφάλματος.

Με μείωση του φορτίου στο μισό του ονομαστικού τα περισσότερα πλάτη των PSH παρουσιάζουν μείωση του πλάτους των αρμονικών με εξαίρεση αυτή που εμφανίζεται στα 1414 Hz της οποίας το πλάτος αυξάνεται κατά 8.8 dB. Η μείωση του φορτίου δεν συμβάλλει στην αναβάθμιση των αποτελεσμάτων. Η παρακολούθηση του φάσματος της μαγνητικής ροής στις συχνότητες που εμφανίζονται οι PSH δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως αξιόπιστη για την διάγνωση σφάλματος.

Παρατηρώντας το φάσμα δεν υπάρχει αύξηση των αρμονικών στις συχνότητες που προκύπτουν από την **σχέση (3.3)** του [Κεφαλαίου 3](#).

Αξιίζει να σημειωθεί πως παρουσιάζεται αύξηση του πλάτους αρμονικών σε συχνότητες που δεν αποτελούν σημείο εμφάνισης PSH ούτε προκύπτουν από την **σχέση (3.3)**. Οι εν λόγω αρμονικές παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Frequency(Hz)	Healthy (dB)	Πλάτος Αρμονικών με 0.2 Αντίσταση (dB)	Difference( +/-) σε dB	Πλάτος Αρμονικών με 0.6 Αντίσταση (dB)	Difference( +/-) σε dB
937	-68.04	-50.33	17.71	-50.33	17.71
970	-71.4	-59.26	12.14	-59.26	12.14
1037	-74.87	-47.21	27.6	-47.21	27.6
1070	-92.030	-72.31	19.72	-69.9	22.13
1137	-72.74	-50.75	21.99	-50.75	21.99
1170	-72.51	-67.15	5.36	-69.03	3.48
1235	-71.31	-54.74	16.57	-54.74	16.57
1270	-80.59	-61.43	19.16	-59.66	20.93
1335	-76.37	-47.19	29.18	-47.19	29.18
1370	-93.42	-51.3	42.12	-51.3	42.12
1435	-74.24	-46.15	28.09	-45.3	28.94
1470	-65.15	-59.43	5.72	-57.95	7.5
1535	-69.01	-38.18	30.83	-36.95	32.06
1570	-73.12	-64.53	8.59	-64.09	9.12
1635	-78.6	-40.01	38.59	-38.62	39.98
1670	-79.44	-72.22	7.22	-71.91	7.53

Table 7.9 Άγνωστες Αρμονικές που παρουσιάζουν αύξηση-5.5kNm

### 7.2.3 Συμπέρασμα για την μέθοδο της Παρακολούθησης της Μαγνητικής Ροής

Έχοντας αναλύσει τα παραπάνω το εύκολα μπορεί να γίνει το συμπέρασμα πως η μέθοδος παρακολούθησης της Μαγνητικής Ροής δεν είναι ικανή να ανιχνεύσει το σφάλμα βραχυκυκλωμένης σπείρας στον κινητήρα που προσομοιώθηκε. Η μόνη αξιόπιστη υπογραφή είναι αυτή της 9<sup>ης</sup> αρμονικής η οποία από μόνη της δεν μπορεί να σταθεί ως μέσο διάγνωσης

σφάλματος καθώς ούτε οι συχνότητες των PSH ούτε οι συχνότητες της **Σχέσης 3.3** δεν παρουσιάζουν την κατάλληλη αύξηση πλάτους σε σχέση με την υγιή κατάσταση. Τέλος ούτε η ελάττωση του φορτίου δεν αναβάθμισε την ποιότητα διάγνωσης για αυτήν την μέθοδο.

### 7.3 Εφαρμογή Park's Vector Approach

Για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου χρειαζόμαστε και τα τρία ρεύματα της κάθε φάσης του στάτη του κινητήρα ώστε να υπολογίσουμε τα διανύσματα  $i_d$  και  $i_q$ . Να σημειωθεί πως και αυτή η μέθοδος αφορά την μόνιμη κατάσταση του κινητήρα και για αυτόν τον λόγο τέθηκε το κατάλληλο χρονικό παράθυρο σε κάθε σήμα που χρησιμοποιήθηκε. Μετά τον υπολογισμό των διανυσμάτων μέσω του εργαλείου της MATLAB, απεικονίζεται ο γεωμετρικός τόπος κάθε περίπτωσης σε κοινό σύστημα αξόνων. Ακολουθούν τα γραφήματα για ονομαστικό και μισό ονομαστικό φορτίο

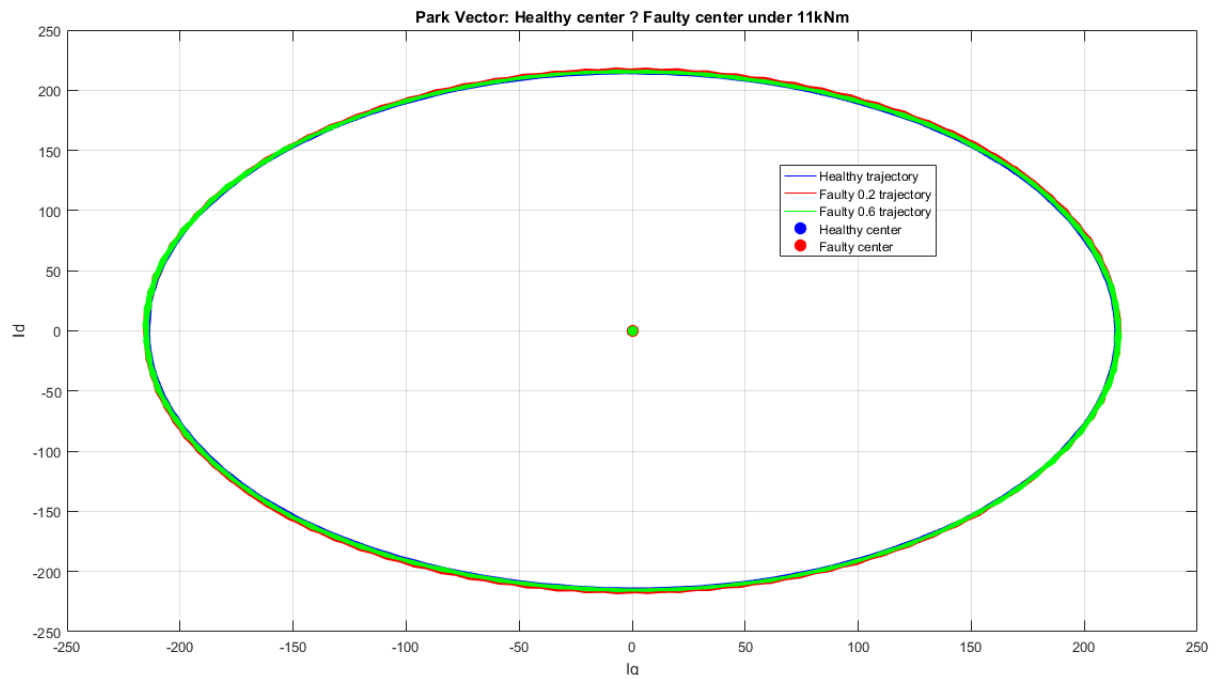


Figure 7.13 Park's Vector Approach- 11kNm.

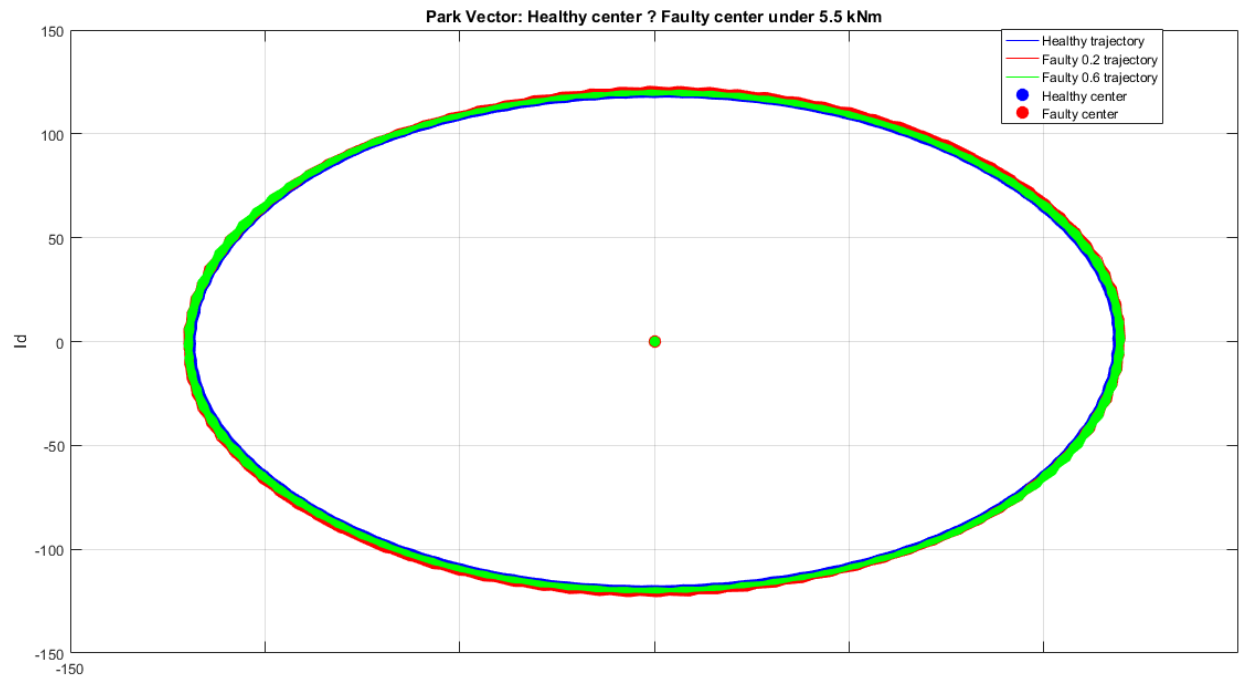


Figure 7.14 Park's Vector Approach- 5.5kNm.

Εστιάζοντας στις φωτογραφίες γίνεται αντιληπτό πως και στις δύο περιπτώσεις υπάρχει μια μετατόπιση του γεωμετρικού τόπου προς τα δεξιά σε σχέση με την υγιή κατάσταση(μπλε). Στην περίπτωση του μισού ονομαστικού φορτίου η μετατόπιση είναι πιο ξεκάθαρη. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αύξηση της αντίστασης του βραχυκυκλώματος μετατοπίζει λιγότερο τον γεωμετρικό τόπο.

Για να φανεί αυτή η μετατόπιση καλύτερα κρίθηκε απαραίτητο να δείξουμε πως μετατοπίζονται τα κέντρα των γεωμετρικών τόπων όταν υπάρχει σφάλμα βραχυκυκλωμένων σπειρών και στις περιπτώσεις φορτίου.

Η  $i_d$  και  $i_q$  είναι οι συνιστώσες του Park's Vector Approach, δηλαδή το διάνυσμα ρεύματος στον δρομέα. Οι μετρήσεις είναι διανυσματικά σημεία που προέρχονται από τη χρονική εξέλιξη (trajectory).

Το μέσο του κάθε συνόλου σημείων δίνει μια ενδεικτική "κεντρική" θέση της διαδρομής (trajectory), που μπορεί να θεωρηθεί ως χαρακτηριστικό σημείο ή "κέντρο βάρους" της κίνησης το οποίο υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{center} = (\bar{I}_q, \bar{I}_d) = \left( \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} I_{qi}, \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} I_{di} \right) \quad (7.1)$$

όπου  $N_1$  των αριθμό των μετρήσεων. Υπολογίζεται έτσι το κέντρο βάρους των σημάτων  $i_d$  και  $i_q$  τόσο για την υγιή κατάσταση, όσο και για τις δυο εσφαλμένες καταστάσεις.

Υπό ονομαστικό φορτίο:

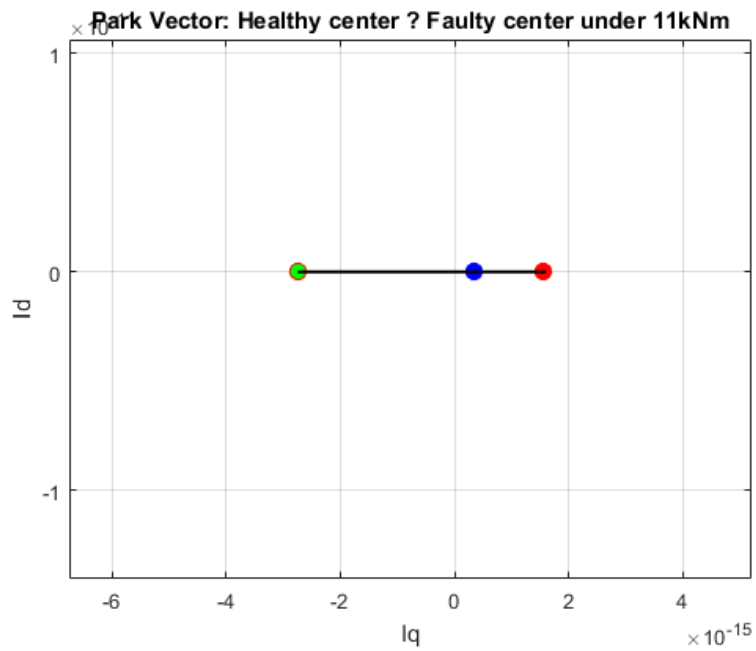


Figure 7.15 Μετατόπιση Κέντρων Ανά Περίπτωση-11kNm

Υπό φορτίο 5.5 kNm :

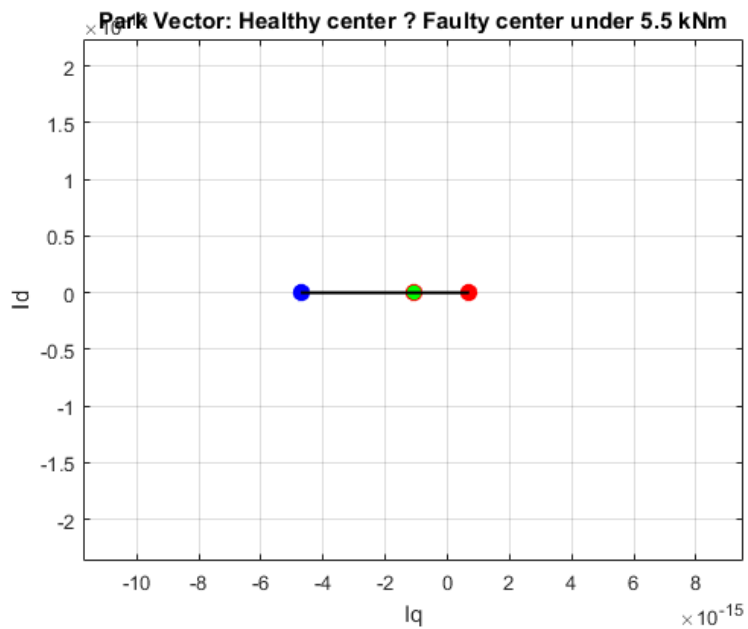


Figure 7.16 Μετατόπιση Κέντρων Ανά Περίπτωση-5.5kNm.



Στις παραπάνω περιπτώσεις με μπλε απεικονίζεται το κέντρο βάρους της υγιούς κατάστασης με κόκκινο το κέντρο βάρους της περίπτωσης μια βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση βραχυκυκλώσεως τα 0.2 Ohm και με πράσινο το κέντρο βάρους της περίπτωσης μια βραχυκυκλωμένης σπείρας με αντίσταση βραχυκυκλώσεως τα 0.6 Ohm. Έπειτα από τον υπολογισμό του κέντρου βάρους και στις δύο περιπτώσεις φαίνεται η μετατόπιση των γεωμετρικών τόπων, η οποία οφείλεται σε ασυμμετρία που έχει εξελιχθεί εξαιτίας των σφαλμάτων. Με μειωμένο φορτίο η μετατόπιση είναι λίγο περισσότερο εμφανής.

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα η συγκεκριμένη διαγνωστική μέθοδος μας φανερώνει την ύπαρξη ασυμμετριών που μπορεί να οφείλονται σε σφάλμα βραχυκυκλωμένων σπειρών, ωστόσο δεν είναι ικανή να καταδείξει την σοβαρότητα του σφάλματος.

#### 7.4 Εφαρμογή Extended Park's Vector Approach

Εφόσον χρησιμοποιήθηκε η διαγνωστική μέθοδος του Park's Vector Approach είναι εύκολο να εφαρμόσουμε και την επέκτασή της. Έχοντας υπολογίσει τις συνιστώσες των ρευμάτων  $i_d$  και  $i_q$  υπολογίζουμε με την βοήθεια του εργαλείου της MATLAB το πλάτος του  $I_{mod}$  σύμφωνα με την σχέση του [Κεφαλαίου 3](#). Έπειτα θα χρησιμοποιήσουμε πάλι την έτοιμη συνάρτηση της MATLAB FFT για τον γρήγορο μετασχηματισμό Fourier του  $I_{mod}$  και απεικονίζεται για κάθε περίπτωση στο πεδίο της συχνότητας, σε ένα κοινό σύστημα αξόνων. Ακολουθούν τα γραφήματα για ονομαστικό φορτίο και φορτίο μισό του ονομαστικού:

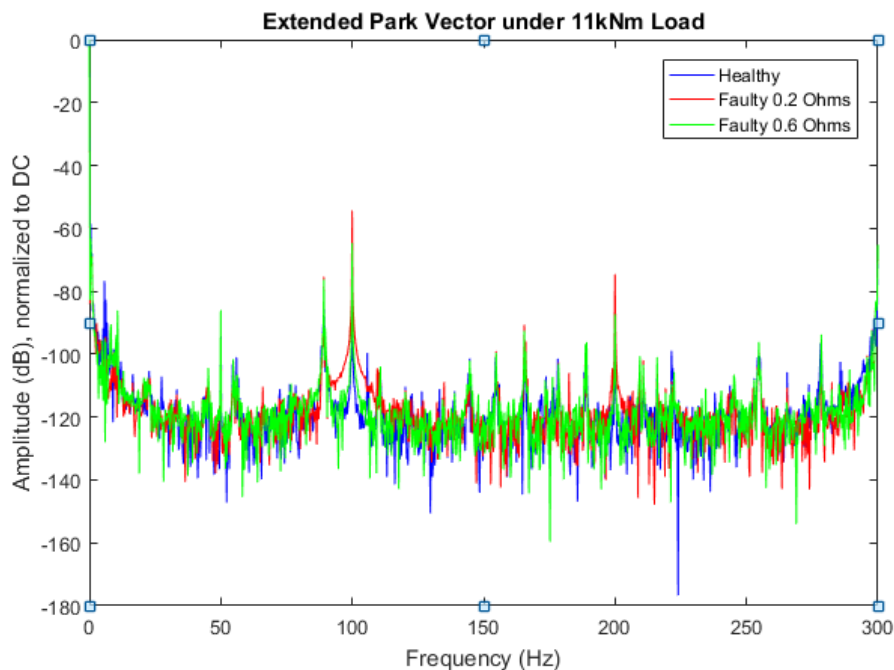


Figure 7.17 Φάσμα EPVA-11kNm.

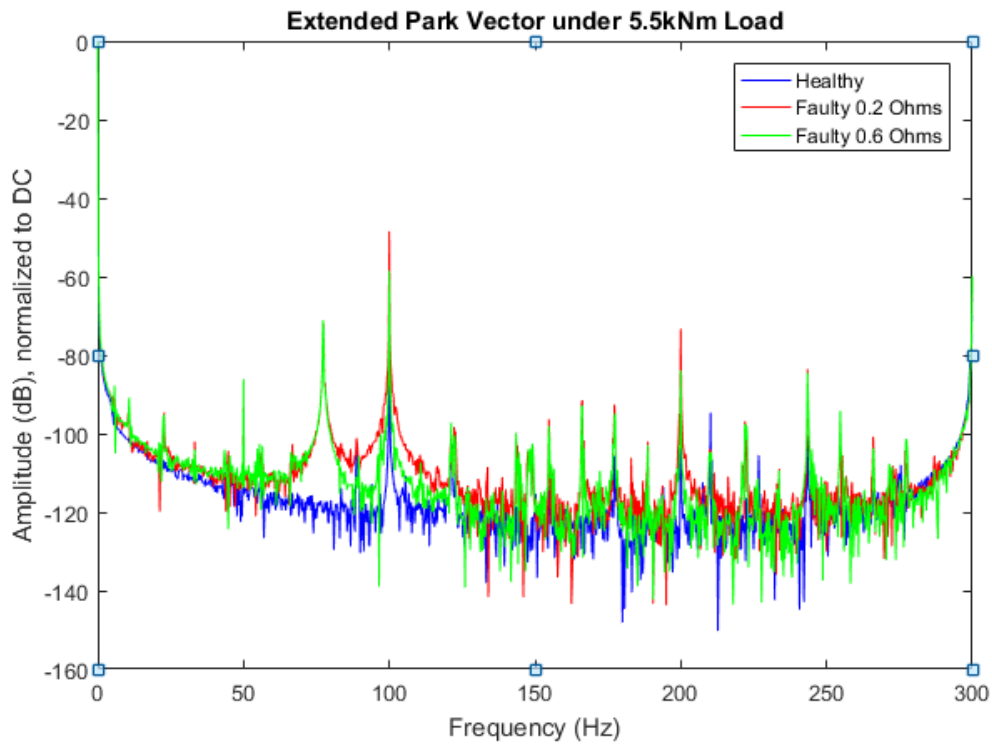


Figure 7.18 Φάσμα EPVA-5.5kNm.

Επίσης κατά την εξαγωγή του φάσματος παρατηρήθηκε αύξηση του πλάτους των αρμονικών στις συχνότητες που εμφανίζονται οι PSH αυξημένες κατά 50 Hz. Η μετατόπιση των αυτή οφείλεται στην συνεισφορά της DC συνιστώσας. Ακολουθούν τα εν λόγω γραφήματα:

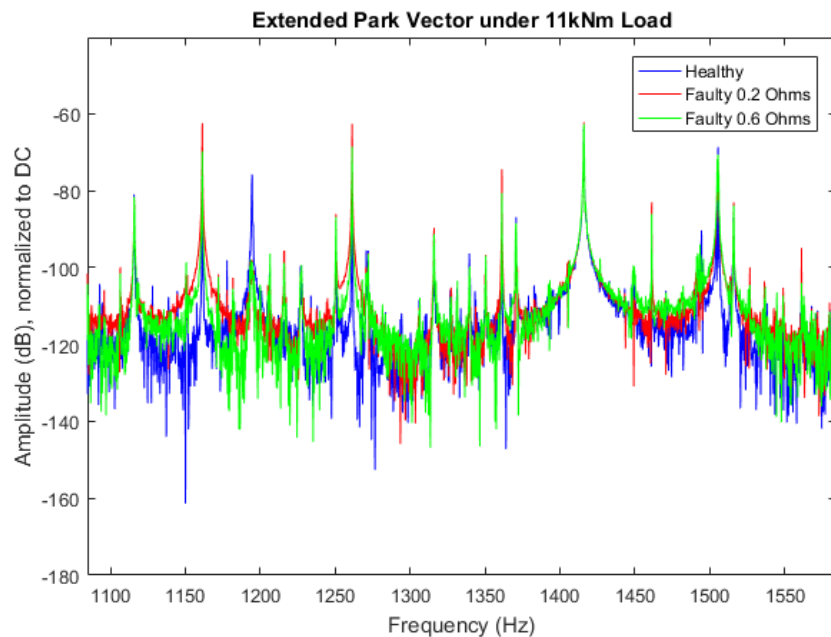


Figure 7.19 Συχνότητες εμφάνισης PSH στο EPVA-11kNm.

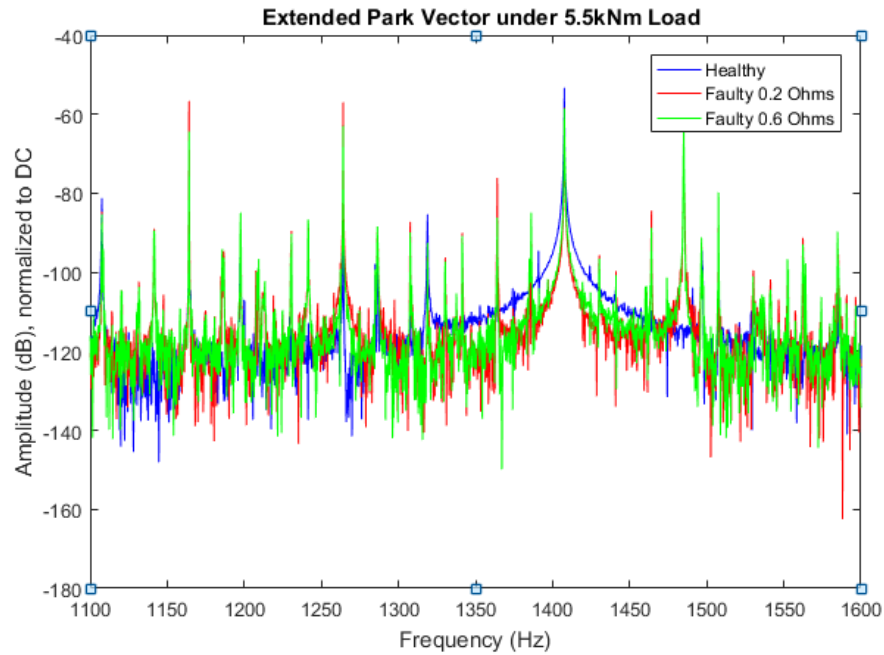


Figure 7.20 Συχνότητες εμφάνισης PSH στο EPVA-5.5kNm.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι αυξήσεις των πλατών για κάθε αρμονική σε σχέση με την υγιή κατάσταση του κινητήρα σε ονομαστικό και φορτίο μισό του ονομαστικού:

Υπό ονομαστικό φορτίο:

Frequency(Hz)	Healthy (dB)	Πλάτος Αρμονικών με 0.2 Αντίσταση (dB)	Difference(+/- ) σε dB	Πλάτος Αρμονικών με 0.6 Αντίσταση (dB)	Difference(+/- ) σε dB
100	-73.13	-54.31	18.82	-64.71	8.42
200	-89.44	-74.55	14.89	-87.29	2.15
1161	-81.29	-62.38	18.91	-69.74	11.55
1261	-80.55	-62.57	17.98	-68.54	12.01
1361	-84.99	-74.39	10.6	-80.58	4.41
1461	-88.53	-82.99	5.54	-85.98	2.55
1561	-106.4	-94.89	11.51	-104	2.4

Table 7.10 Πλάτη Αρμονικών PSH από το φάσμα της EPVA-11kNm.

Παρατηρείται και για τις δυο περιπτώσεις πως η βασική αρμονική βρίσκεται στα 0 Hz και υπάρχει αύξηση της 2<sup>ης</sup> και της 4<sup>ης</sup> αρμονικής.

Για σφάλμα βραχυκύκλωσης 0.2 Ohm υπάρχει αύξηση της 2<sup>ης</sup> αρμονικής κατά 18.82 dB και στην 4<sup>η</sup> αύξηση 14.89 dB. Τώρα για σφάλμα βραχυκύκλωσης 0.6 Ohm υπάρχει αύξηση των ίδιων αρμονικών αλλά σε μικρότερη κλίμακα dB . Έτσι η αντίσταση του βραχυκυκλώματος επηρεάζει το αρμονικό περιεχόμενο και κατ' επέκταση την ικανότητα διάγνωσης του σφάλματος των βραχυκυκλωμένων σπειρών.

Όσον αφορά της PSH η αύξηση του πλάτους των αρμονικών για σφάλμα βραχυκύκλωσης 0.2 Ohm τα πλάτη των αρμονικών παρουσιάζουν στις περισσότερες περιπτώσεις μια αύξηση πάνω από 10 dB και μπορεί να προσεγγίσει και περίπου τα 20 dB, καθιστώντας αυτές τις αρμονικές ως ένδειξη σφάλματος βραχυκυκλωμένης σπείρας.

Τώρα με βραχυκύκλωμα 0.6 Ohm η αύξηση δεν είναι τόσο μεγάλη αλλά στις αρμονικές των συχνοτήτων 1161 Hz και 1261 Hz είναι πάνω από 10 dB, όπου μπορούμε να καταλάβουμε το σφάλμα των βραχυκυκλωμένων σπειρών.

Βλέπουμε και στις δύο περιπτώσεις πως η αντίσταση βραχυκύκλωσης επηρεάζει το αρμονικό περιεχόμενο και συνεπώς την διαγνωστική ικανότητα της μεθόδου όταν ο κινητήρας λειτουργεί υπό ονομαστικό φορτίο.

Υπό φορτίο 5.5 kNm :

Frequency(Hz)	Healthy (dB)	Πλάτος Αρμονικών με 0.2 Αντίσταση (dB)	Difference(+/- ) σε dB	Πλάτος Αρμονικών με 0.6 Αντίσταση (dB)	Difference(+/- ) σε dB
100	-71.12	-48.46	22.96	-58.49	12.63
200	-96.19	-73.29	22.9	-83.86	13.03
1164	-74.22	-56.58	17.64	-64.39	9.83
1264	-81.66	-56.98	24.68	-62.93	18.73
1364	-102.5	-76.12	26.38	-86.15	16.35
1464	-115.1	-84.38	30.72	-88.71	26.39
1564	-112.3	-91.28	21.02	-97.77	14.6

Table 7.11 Πλάτη Αρμονικών PSH από το φάσμα της EPVA-5.5kNm.

Με την μείωση του φορτίου βλέπουμε στις συχνότητες που είναι άρτια πολλαπλάσια της βασικής συχνότητας ότι η αύξηση του πλάτους των αρμονικών είναι μεγαλύτερο σε σχέση με την περίπτωση του ονομαστικού φορτίου

Πιο συγκεκριμένα για αντίσταση βραχυκύκλωσης 0.2 Ohm το πλάτος των αρμονικών παρουσιάζει αύξηση μεγαλύτερη των 20 dB, ενώ και για αντίσταση βραχυκύκλωσης 0.6 Ohm η αύξηση του πλάτους είναι αξιοσημείωτη και πάνω από 10 dB

Όσον αφορά τις συχνότητες που εμφανίζονται οι PSH στις περισσότερες περιπτώσεις το πλάτος των αρμονικών παρουσιάζει αύξηση πάνω από 20 dB ενώ στα 1464 Hz η αύξηση αυτή είναι της τάξης των 30 dB για αντίσταση βραχυκύκλωσης 0.2 Ohm. Τώρα για σφάλμα βραχυκύκλωσης 0.6 Ohm εκεί η αύξηση του πλάτους των αρμονικών προσεγγίζει τα 20 dB και 1464 Hz είναι πάνω από 20 dB και προσεγγίζει τα 30 dB.

Συμπερασματικά βλέπουμε πως η μείωση του φορτίου επιδρά ευεργετικά και σε αυτή την διαγνωστική μέθοδο αυξάνοντας την ευαισθησία τους για σφάλματα βραχυκυκλωμένων σπειρών.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί πως για το φορτίο των 5.5 kNm εμφανίζεται μια αρμονική στα 77.24 Hz που δεν εμφανίστηκε στο ονομαστικό φορτίο. Η αρμονική αυτή αφορά τον δρομέα και την ασυμμετρία ρεύματος που αντιμετωπίζει κατά την περιφορά του εξαιτίας του σφάλματος βραχυκύκλωσης.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω η EPVA αποτελεί μια αξιόπιστη μέθοδο διάγνωσης σφαλμάτων βραχυκυκλωμένων σπειρών και η μείωση του φορτίου ενισχύει την ευαισθησία της.

## 7.5 Παρακολούθηση Ροπής ως Διαγνωστική Μέθοδος

### 7.5.1 Εξαγωγή Σημάτων Ηλεκτρομαγνητικής Ροπής στον Χρόνο

Μέσω του εργαλείου SimCenter Magnet δίνεται η δυνατότητα να εξάγουμε το σήμα της ηλεκτρομαγνητικής ροπής εύκολα, χωρίς να χρειάζεται να ο υπολογισμός τάσεων και ρευμάτων για την εκτίμηση της ροπής.

Αρχικά γίνεται η εξαγωγή του σήματος για τις τρεις περιπτώσεις (υγιής κατάσταση, μια βραχυκυκλωμένη σπείρα με αντίσταση βραχυκύκλωσης 0.2 Ohm και μια βραχυκυκλωμένη σπείρα με αντίσταση βραχυκύκλωσης 0.6 Ohm) για τις περιπτώσεις του ονομαστικού και φορτίου 5.5 kNm. Παρακάτω παρουσιάζονται τα εν λόγω σήματα:

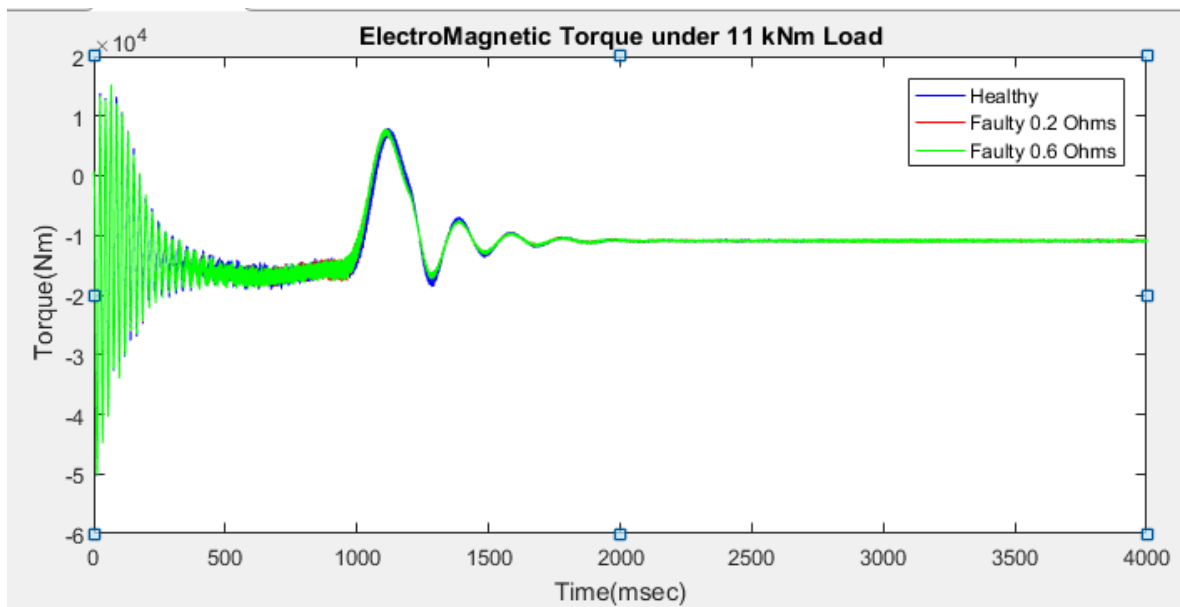


Figure 7.21 Σήμα Ροπής στον χρόνο - 11kNm

Παρατηρούνται ελάχιστες αλλαγές ανάμεσα στην υγιή και στις εσφαλμένες καταστάσεις. Κατά την εκκίνηση του κινητήρα η ροπή ταλαντώνεται και φτάνει σε υψηλές τιμές όμοια με το σήμα του ρεύματος. Μόλις συμπλεχθεί το φορτίο η ροπή στις εσφαλμένες περιπτώσεις κάνει ελαφρώς μεγαλύτερη ταλάντωση πριν φτάσει ο κινητήρας στην μόνιμη κατάσταση του.

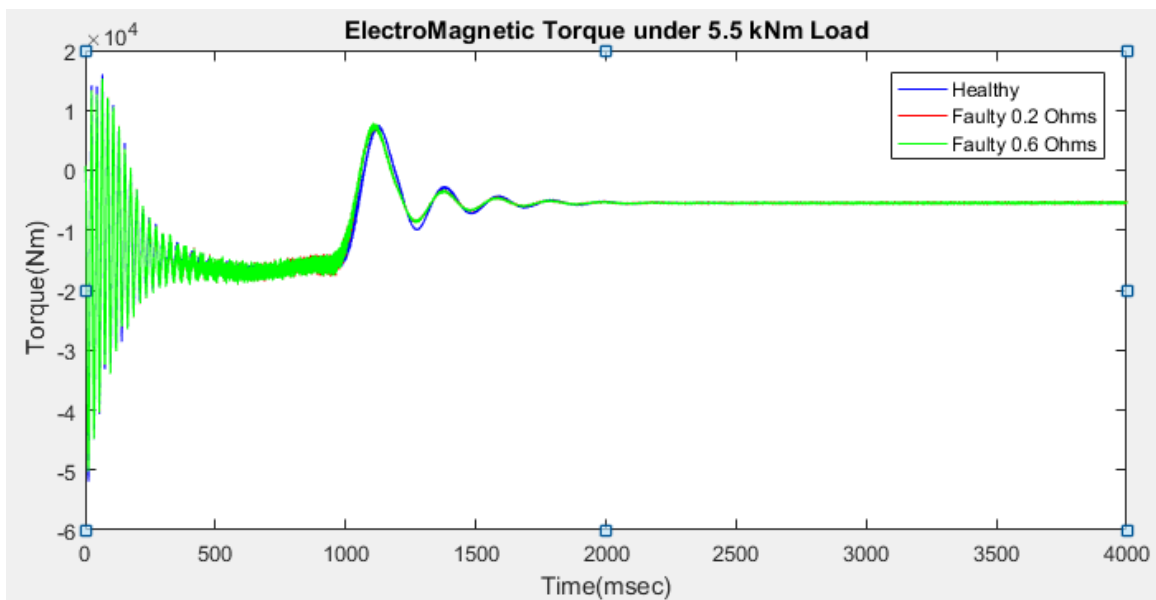


Figure 7.22 Σήμα Ροπής στον χρόνο - 5.5kNm

Και εδώ δεν παρατηρούνται ακραίες αλλαγές ανάμεσα σε υγιή και εσφαλμένες καταστάσεις. Πάλι παρατηρείται μια μεγαλύτερη ταλάντωση της ροπής μέχρι ο κινητήρας να εισέλθει στην μόνιμη λειτουργία του.

### 7.5.3 Εξαγωγή Φάσματος Ηλεκτρομαγνητικής Ροπής στο Πεδίο της Συχνότητας

Τώρα χρειάζεται να γίνει η επεξεργασία των σημάτων που εξήχθησαν. Αρχικά τέθηκε το κατάλληλο χρονικό παράθυρο ώστε να ληφθεί μόνο η μόνιμη κατάσταση υπόψη. Έπειτα εφαρμόζεται η συνάρτηση της MATLAB FFT για γρήγορο μετασχηματισμό Fourier για να προκύψει το φάσμα των σημάτων στο πεδίο της συχνότητας. Ακολουθούν τα εν λόγω σήματα:

Υπό ονομαστικό φορτίο:

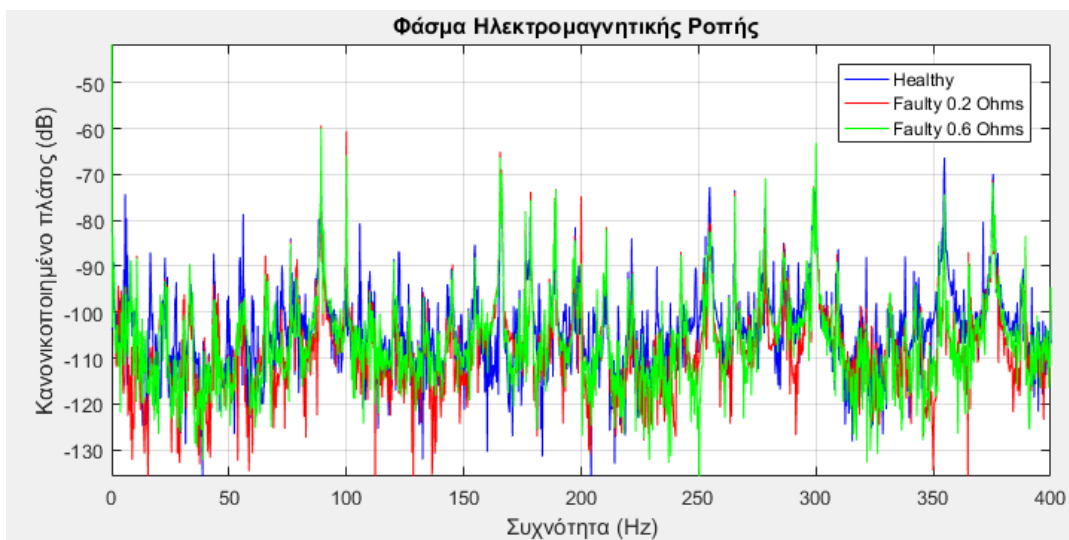


Figure 7.23 Φάσμα Ηλεκτρομαγνητικής Ροπής υπό Ονομαστικό Φορτίο

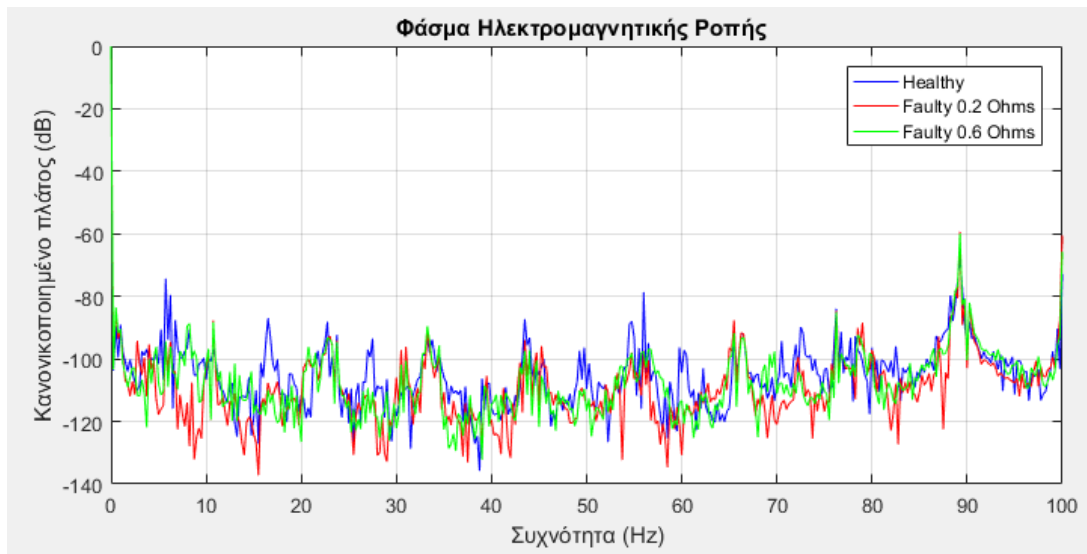


Figure 7.24 Φάσμα Ηλεκτρομαγνητικής Ροπής υπό Ονομαστικό Φορτίο 0-100 Hz-11kNm

Από τα παραπάνω φάσματα δεν παρουσιάζεται κάποια αύξηση φάσματος που να σχετίζεται με υπογραφές σφάλματος στάτη. Επίσης δεν παρουσιάζεται κάποια αξιοσημείωτη ασυμμετρία.

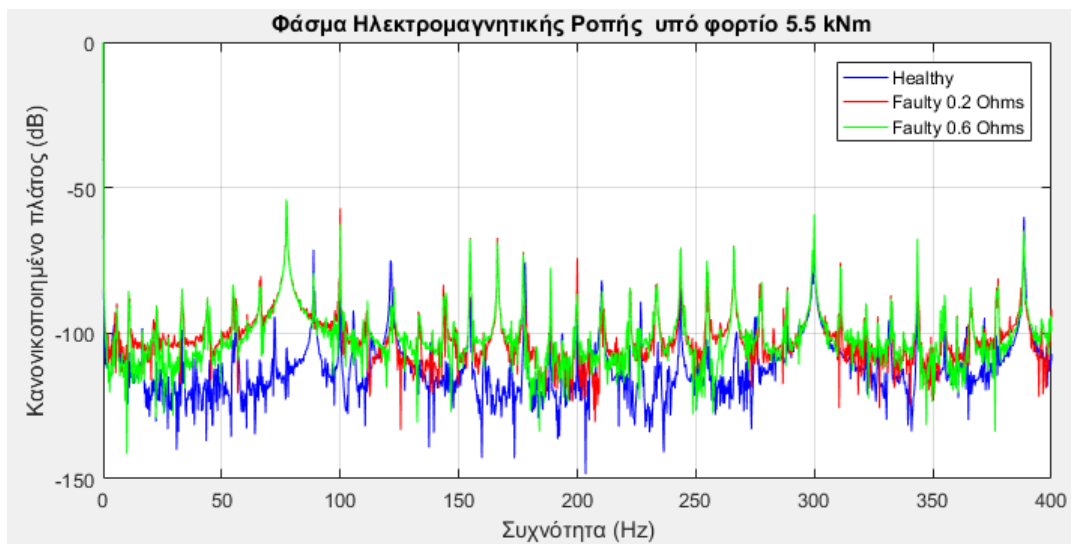


Figure 7.25 Φάσμα Ηλεκτρομαγνητικής Ροπής υπό 5.5 kNm Φορτίο



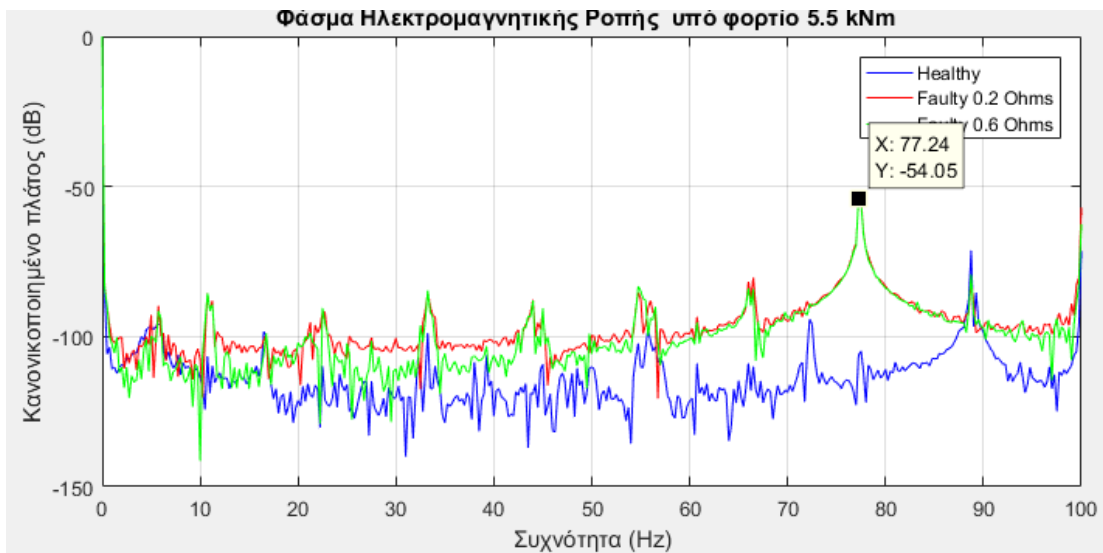


Figure 7.26 Φάσμα Ηλεκτρομαγνητικής Ροπής 0-100 Hz-5.5kNm

Στην περίπτωση του μισού ονομαστικού φορτίου παρουσιάζονται μεγαλύτερες αυξήσεις πλάτους των αρμονικών των εσφαλμένων καταστάσεων σε σχέση με την αρμονική της υγιούς κατάστασης. Παρατηρώντας το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ροπής μπορούν να διακριθούν ασυμμετρίες στην λειτουργία του κινητήρα, ωστόσο δεν μπορούν να αποδοθούν σε σφάλμα βραχυκυκλωμένων σπειρών. Επίσης στην συχνότητα των 77.24 Hz οι αρμονικές των εσφαλμένων καταστάσεων παρουσιάζουν μια αξιοσημείωτη αύξηση στο πλάτος τους σε σχέση με το πλάτος της αρμονικής της υγιούς κατάστασης. Η μεταβολή αυτή οφείλεται σε ασυμμετρία που αντιμετωπίζει ο δρομέας κατά την περιφορά και η συχνότητα που εμφανίζεται είναι ίδια και με την μέθοδο EPVA.

## Κεφάλαιο 8. Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα

### 8.1 Συμπεράσματα

Η μέθοδος MCSA αποτελεί μια αξιόπιστη μέθοδο για διάγνωση σφαλμάτων βραχυκυκλωμένων σπειρών για τον κινητήρα που μοντελοποιήθηκε. Οι υπογραφές σφάλματος στην τρίτη αρμονική, οι συχνότητες των PSH και αυτές που προκύπτουν από την **Σχέση (3.1)** παρέχουν αρμονικό περιεχόμενο το οποίο με ασφάλεια μας οδηγεί στο συμπέρασμα ύπαρξης βραχυκυκλωμένης σπείρας. Ιδίως όταν το φορτίο του κινητήρα μειώνεται σε σχέση με το ονομαστικό η ποιότητα του αρμονικού περιεχομένου αναβαθμίζεται και η ευαισθησία της μεθόδου στην ανίχνευση του σφάλματος βραχυκυκλωμένης σπείρας αυξάνεται σημαντικά. Δεδομένου ότι η υλοποίηση της μεθόδου προϋποθέτει έναν αισθητήρα ρεύματος στην φάση που εξελίσσεται το σφάλμα και ότι δεν χρειάζεται η διακοπή της λειτουργίας του κινητήρα, η MCSA είναι μια καλή και αξιόπιστη λύση για ανίχνευση τέτοιου είδους σφαλμάτων.

Η παρακολούθηση της Stray Flux δεν παρείχε αποτελεσματικότητα στην διάγνωση του λάθους που μελετάται σε αυτήν την εργασία, καθώς οι αρμονικές που εμφανίζονται στις συχνότητες που έχουν συζητηθεί στο [Κεφάλαιο 3](#) δεν παρουσιάζουν μια ικανή αύξηση πλάτους για να εξαχθεί το συμπέρασμα σφάλματος βραχυκυκλωμένης σπείρας, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις το πλάτος των εν λόγω αρμονικών μειωνόταν κάνοντας την μέθοδο αναξιόπιστη. Επίσης η ελάττωση του φορτίου δεν βελτίωσε τα αποτελέσματα της μεθόδου, ενώ εμφάνισε σε κάποιες συχνότητες αρμονικές που δεν αναμενόταν από την βιβλιογραφία και την θεωρία.

Η μέθοδος του Park's Vector Approach παρείχε αποδεκτά αποτελέσματα σαν μέθοδος. Η μετατόπιση των εσφαλμένων καταστάσεων σε περίπτωση ονομαστικού φορτίου είναι μικρότερη σε σχέση με την περίπτωση φορτίου των 5.5 kNm. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την επίδραση του φορτίου και σε αυτήν την μέθοδο. Οι δύο αυτές μετατοπίσεις είναι πιο εύκολα ευδιάκριτες με τον υπολογισμό του κέντρου βάρους του γεωμετρικού τόπου που προκύπτει. Η εν λόγω μέθοδος δεν έχει ικανοποιητική ευαισθησία στο σφάλμα βραχυκυκλωμένης σπείρας καθώς μετατόπιση μπορεί να προκύψει και από ασυμμετρία τροφοδοσίας του κινητήρα. Έτσι η βέλτιστη χρήση του Park's Vector Approach θα μπορούσε να είναι ένα προκαταρκτικό στάδιο ανίχνευσης ασυμμετρίας και σε συνδυασμό με κάποια άλλη μέθοδο να επιτευχθεί η διάγνωση του σφάλματος που ασχολείται η παρούσα διπλωματική αλλά για την υλοποίηση της χρειάζονται τρεις αισθητήρες, ένα για κάθε φάση του κινητήρα .

Η μέθοδος Extended Park's Vector Approach είναι αξιόπιστη και παρέχει αποτελέσματα υψηλής ποιότητας. Παρατηρείται ευδιάκριτα η αύξηση του πλάτους των αρμονικών που βρίσκονται σε άρτια πολλαπλάσια της βασικής συχνότητας  $f_s$  και σε συχνότητες των PSH, ακόμα και με το ονομαστικό φορτίο. Η ελάττωση του φορτίου αυξάνει κι άλλο την ευαισθησία της μεθόδου. Έτσι η μέθοδος Extended Park's Vector Approach μπορεί να διαγνώσει με

ακρίβεια και έγκυρα το σφάλμα της βραχυκυκλωμένης σπείρας αλλά είναι απαραίτητοι τρεις αισθητήρες, ένας για κάθε φάση του κινητήρα και μαθηματικοί υπολογισμοί του πλάτους των ρευμάτων  $I_d$  και  $I_q$ .

Τέλος για την παρακολούθηση της ροπής εκτός του ότι η θεωρία δεν μας παρέχει εξισώσεις οι οποίες εκφράζουν συχνότητες που εμφανίζονται ενισχυμένες αρμονικές που σχετίζονται με το σφάλμα βραχυκυκλωμένων σπειρών, οι ασυμμετρίες στο φάσμα δεν είναι τόσο εμφανείς ώστε να εξάγουμε ασφαλές συμπέρασμα για την ύπαρξη ή μη του εν λόγω σφάλματος. Η μέθοδος της παρακολούθησης της ροπής είναι συμπερασματικά μια αναξιόπιστη μέθοδος διάγνωσης σφαλμάτων βραχυκυκλωμένων σπειρών.

## 8.2 Μελλοντική Έρευνα

Θα μπορούσαμε να εφαρμόσουμε το ίδιο σφάλμα σε άλλου τύπου κινητήρες και εφαρμόζοντας τις ίδιες μεθόδους να γενικευτούν τα αποτελέσματα. Επίσης θα μπορούσε να γίνει η διερεύνηση των αρμονικών που εμφανίστηκαν υπό μισό ονομαστικό φορτίο στην παρακολούθηση της μαγνητικής ροής του κινητήρα. Τέλος η μοντελοποίηση του και προσομοίωση του κινητήρα σε τριδιάστατο επίπεδο θα μπορούσε να μας προσφέρει αποτελέσματα πιο ακριβή και αναβαθμισμένα.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] M. Ahmadi, J. Poshtan, and M. Poshtan. “Modelling squirrel cage induction motors using finite element method,” in *2012 IEEE International Conference on Intelligent Control, Automatic Detection and High-End Equipment*, Beijing, China: IEEE, Jul. 2012, pp. 186–191. doi:[10.1109/ICADE.2012.6330124](https://doi.org/10.1109/ICADE.2012.6330124).
- [2] S. S. Bhavikatti. *Finite element analysis*. New Delhi: New Age International (P) Ltd., Publishers, 2005.
- [3] Simcenter Magnet Introduction to Magnetostatic 2D Modeling Software Version 2022.1 April 2022
- [4] K. Gyftakis. “Ηλεκτρομαγνητική ανάλυση σφαλμάτων σε επαγωγικούς κινητήρες και ανάπτυξη νέων μεθόδων διάγνωσης αυτών,” Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Πολυτεχνική, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, 2015. doi: [10.12681/cadd/43373](https://doi.org/10.12681/cadd/43373).
- [5] K. Gyftakis, J. Kappatou, and A. Safacas. “FEM study of asynchronous cage motors combining NEMA’s classes A and D slot geometry,” in *The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010*, Rome, Italy: IEEE, Sep. 2010, pp. 1–6. doi:[10.1109/ICELMACH.2010.5607691](https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2010.5607691). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5607691&isnumber=5607489>
- [6] [Engineering ToolBox](https://www.engineeringtoolbox.com/nema-a-b-c-d-design-d_650.html) - Resources, Tools and Basic Information for Engineering and Design of Technical Applications. URL: [https://www.engineeringtoolbox.com/nema-a-b-c-d-design-d\\_650.html](https://www.engineeringtoolbox.com/nema-a-b-c-d-design-d_650.html)
- [7] [https://www.nema.org/docs/default-source/motor-and-generator-guides-and-resources-library/6-electric-motor-terminology-and-performance-characteristics-v2.pdf?sfvrsn=62ad61a9\\_2](https://www.nema.org/docs/default-source/motor-and-generator-guides-and-resources-library/6-electric-motor-terminology-and-performance-characteristics-v2.pdf?sfvrsn=62ad61a9_2)
- [8] A. Lordoglu, M. O. Gulbahce, and D. A. Kocabas. “A Comprehensive Disturbing Effect Analysis of Multi-Sectional Rotor Slot Geometry for Induction Machines in Electrical Vehicles,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 49590–49600, 2021, doi:[10.1109/ACCESS.2021.3068821](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3068821).
- [9] T. R. Gaerke and A. C. Soellner. “Understanding of above NEMA specification options,” in *2017 Annual Pulp, Paper And Forest Industries Technical Conference (PPFIC)*, Tacoma, WA, USA: IEEE, Jun. 2017, pp. 1–7. doi:[10.1109/PPIC.2017.8003866](https://doi.org/10.1109/PPIC.2017.8003866). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8003866&isnumber=8003842>

- [10] H.-J. Park, H.-B. Hong, and K.-D. Lee. “A Study on a Design Considering the Transient State of a Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor Satisfying the Requirements of the IE4 Efficiency Class,” *Energies*, vol. 15, no. 24, p. 9644, Dec. 2022, doi:[10.3390/en15249644](https://doi.org/10.3390/en15249644).
- [11] <https://www.alamy.com/squirrel-cage-rotor-exploded-view-3d-rendering-isolated-on-white-background-image470552745.html?imageid=1E479DAD-0039-4C16-A714-FFCBCE7F1A02&p=1897635&pn=1&searchId=30a62a97366b733fee15848cd5827de1&searcharchtype=0>
- [12] S. Singhal, K. V. Singh, and A. Hyder. “Effect of laminated core on rotor mode shape of large high speed induction motor,” in *2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Niagara Falls, ON, Canada: IEEE, May 2011, pp. 1557–1562. doi:[10.1109/IEMDC.2011.5994842](https://doi.org/10.1109/IEMDC.2011.5994842). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5994842&isnumber=5993850>
- [13] <https://www.emobility-engineering.com/motor-laminations/>
- [14] <https://howelectrical.com/3-phase-induction-motor/>
- [15] <https://www.mangoengineer.in/2024/03/induction-motor-equivalent-circuit.html>
- [16] Y. R. Konda *et al.* “Thermal Analysis and Cooling Strategies of High-Efficiency Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors—A Review,” *Computation*, vol. 12, no. 1, p. 6, Jan. 2024, doi: [10.3390/computation12010006](https://doi.org/10.3390/computation12010006).
- [17] <https://electricalacademia.com/induction-motor/torque-speed-characteristics-induction-motor/>
- [18] M. Averbukh and E. Lockshin. “Estimation of the Equivalent Circuit Parameters of Induction Motors by Laboratory Test,” *Machines*, vol. 9, no. 12, p. 340, Dec. 2021, doi:[10.3390/machines9120340](https://doi.org/10.3390/machines9120340).
- [19] <https://electricala2z.com/ac-machines/three-phase-induction-motor-torque-speed-characteristics/>
- [20] S. Jadhav. “Impact of faults on the efficiency of squirrel cage induction motor,” in *2017 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*, Vashi, Navi Mumbai, India: IEEE, Jan. 2017, pp. 1–6. doi:[10.1109/ICNTE.2017.7947971](https://doi.org/10.1109/ICNTE.2017.7947971). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7947971&isnumber=7947877>
- [21] K. N. Gyftakis, D. V. Spyropoulos, J. C. Kappatou, and E. D. Mitronikas. “A Novel Approach for Broken Bar Fault Diagnosis in Induction Motors Through Torque Monitoring,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 2, pp. 267–277, Jun. 2013,

doi:[10.1109/TEC.2013.2240683](https://doi.org/10.1109/TEC.2013.2240683).URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6458995&isnumber=6516600>

[22]. Yun and S. B. Lee. “Influence of Aluminum Die-Cast Rotor Porosity on the Efficiency of Induction Machines,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, no. 11, pp. 1–5, Nov. 2018, doi:[10.1109/TMAG.2018.2841912](https://doi.org/10.1109/TMAG.2018.2841912).URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8388748&isnumber=8495102>

[23] S. Nandi, H. A. Toliyat, and X. Li. “Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors—A Review,” *IEEE Trans. On Energy Conversion*, vol. 20, no. 4, pp. 719–729, Dec. 2005, doi:[10.1109/TEC.2005.847955](https://doi.org/10.1109/TEC.2005.847955).URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1546063&isnumber=32995>

[24] A. Polat, Y. D. Ertugrul, and L. T. Ergene. “Analysis of static eccentricity in squirrel cage induction motors,” in *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Istanbul, Turkey: IEEE, May 2013, pp. 1504–1508. doi:[10.1109/PowerEng.2013.6635838](https://doi.org/10.1109/PowerEng.2013.6635838).URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6635838&isnumber=6635569>

[25] C. Gerada, M. Galea, P. Giangrande, and C. Sciascera. “Lifetime Consumption and Degradation Analysis of the Winding Insulation of Electrical Machines,” in *8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016)*, Glasgow, UK: Institution of Engineering and Technology, 2016, p. 5.-5. doi:[10.1049/cp.2016.0231](https://doi.org/10.1049/cp.2016.0231).URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7739419&isnumber=7475410>

[26] C. Terron-Santiago, J. Martinez-Roman, R. Puche-Panadero, and A. Sapena-Bano. “A Review of Techniques Used for Induction Machine Fault Modelling,” *Sensors*, vol. 21, no. 14, p. 4855, Jul. 2021, doi: [10.3390/s21144855](https://doi.org/10.3390/s21144855).

[27] U. V. Dongare, B. S. Umre, and M. S. Ballal. “Mathematical Modeling and Simulation of an Induction Motor with Stator Inter-Turn Faults,” in *2020 IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC)*, Nagpur, India: IEEE, Sep. 2020, pp. 1–6. doi:[10.1109/STPEC49749.2020.9297711](https://doi.org/10.1109/STPEC49749.2020.9297711).URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9297711&isnumber=9297661>

[28] S. D. Chennouju, B. S. Umre, and U. V. Dongare. “Simulation of a Three-Phase Induction Motor with Stator Inter-Turn Short-Circuit Fault,” in *2023 IEEE Renewable Energy and Sustainable E-Mobility Conference (RESEM)*, Bhopal, India: IEEE, May 2023, pp. 1–6. doi:[10.1109/RESEM57584.2023.10236313](https://doi.org/10.1109/RESEM57584.2023.10236313).URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10236313&isnumber=10235986>

- [29] P. C. P and J. G. “Inter-Turn Fault Analysis of Three Phase Induction Motor,” in *2020 IEEE 9th Power India International Conference (PIICON)*, Sonapat, India: IEEE, Feb. 2020, pp. 1–6.  
doi:[10.1109/PIICON49524.2020.9112890](https://doi.org/10.1109/PIICON49524.2020.9112890).URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9112890&isnumber=9112866>
- [30][https://www.researchgate.net/publication/366904282\\_SYSTEMATIZATION\\_AND\\_SELECTION\\_OF\\_DIAGNOSING\\_METHODS\\_FOR\\_THE\\_STATOR\\_WINDINGS\\_INSULATION\\_OF\\_INDUCION\\_MOTORS](https://www.researchgate.net/publication/366904282_SYSTEMATIZATION_AND_SELECTION_OF_DIAGNOSING_METHODS_FOR_THE_STATOR_WINDINGS_INSULATION_OF_INDUCION_MOTORS)
- [31] G. Dhakal, A. Bhattarai, and B. Silwal. “Current-Based Fault Index for Induction Motor Inter-Turn Short Circuit Fault Analysis,” in *2024 IEEE International Conference on Power System Technology (PowerCon)*, Kathmandu, Nepal: IEEE, Nov. 2024, pp. 1–4.  
doi:[10.1109/PowerCon60995.2024.10870563](https://doi.org/10.1109/PowerCon60995.2024.10870563).URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10870563&isnumber=10870519>
- [32] A. Sharma, S. Chatterji and L. Mathew. "A Novel Park's Vector Approach for Investigation of Incipient Stator Fault Using MCSA in Three-Phase Induction Motors," *2017 International Conference on Innovations in Control, Communication and Information Systems (ICICCI)*, Greater Noida, India, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICICCIS.2017.8660892. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8660892&isnumber=8660752>
- [33] K. N. Gyftakis and A. J. Marques-Cardoso. “Reliable Detection of Very Low Severity Level Stator Inter-Turn Faults in Induction Motors,” in *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Lisbon, Portugal: IEEE, Oct. 2019, pp. 1290–1295.doi:[10.1109/IECON.2019.8926928](https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8926928).URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8926928&isnumber=8926608>
- [34] Y. Park *et al.* “Stray Flux Monitoring for Reliable Detection of Rotor Faults Under the Influence of Rotor Axial Air Ducts,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 10, pp. 7561–7570, Oct. 2019,  
doi:[10.1109/TIE.2018.2880670](https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2880670).URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8541132&isnumber=8728044>
- [35] T. G. Vilhekar and M. S. Ballal. “Detection of Stator and Rotor Winding Faults by Monitoring Air-Gap Flux Spectrum of Slip-Ring Induction Motor,” in *2024 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Mangalore, India: IEEE, Dec. 2024, pp. 1–6.  
doi:[10.1109/PEDES61459.2024.10961189](https://doi.org/10.1109/PEDES61459.2024.10961189).URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10961189&isnumber=10960787>
- [36] Διάλεξη “Ηλεκτρικά Σφάλματα Στάτη” Μαθήματος “Ειδικά Κεφάλαια Ηλεκτρικών Μηχανών”, Κωνσταντίνου Γυφτάκη.



- [37] R. Kumar and R. Anand. “Application of Park’s Vector and Current Envelope Method for Diagnosis of Stator Winding Inter Turn Fault of Induction Motors,” in *2023 7th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA)*, Singapore, Singapore: IEEE, Mar. 2023, pp. 168–174.  
doi:[10.1109/ICGEA57077.2023.10125848](https://doi.org/10.1109/ICGEA57077.2023.10125848).URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10125848&isnumber=10125594>
- [38] A. Paz Parra, M. C. Amaya Enciso, J. Olaya Ochoa, and J. A. Palacios Penaranda. “Stator fault diagnosis on squirrel cage induction motors by ESA and EPVA,” in *2013 Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, Bogota DC, Colombia: IEEE, Jul. 2013, pp. 1–6.  
doi:[10.1109/PEPQA.2013.6614937](https://doi.org/10.1109/PEPQA.2013.6614937).URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6614937&isnumber=6614936>
- [39] M. Carbonieri, N. Bianchi, and L. Alberti. “Induction Motor Analysis Using Magnetostatic Finite Element Simulations Considering Skewing,” in *2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, San Diego, CA, USA: IEEE, May 2019, pp. 147–153.  
doi:[10.1109/IEMDC.2019.8785381](https://doi.org/10.1109/IEMDC.2019.8785381).URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8785381&isnumber=8785065>
- [40] <https://www.semiconductorforu.com/types-of-rotor-in-induction-motor/>
- [41] <https://www.pumpsandsystems.com/how-does-induction-motor-work>
- [42] J. Bonet-Jara, J. Pons-Llinares, and K. N. Gyftakis. “Comprehensive Analysis of Principal Slot Harmonics as Reliable Indicators for Early Detection of Interturn Faults in Induction Motors of Deep-Well Submersible Pumps,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 70, no. 11, pp. 11692–11702, Nov. 2023, doi: [10.1109/TIE.2022.3231333](https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3231333).
- [43] M. Houili, M. Sahraoui, K. Laadjal, A. J. Marques Cardoso, and A. Alloui. “A Comparative Study of MCSA and ZSV-Based Methods for Diagnosing Inter-Turn Short-Circuit Faults in Induction Motors,” in *2024 IEEE International Conference on Artificial Intelligence & Green Energy (ICAIGE)*, Yasmine Hammamet, Tunisia: IEEE, Oct. 2024, pp.1–5.  
doi:[10.1109/ICAIGE62696.2024.10776654](https://doi.org/10.1109/ICAIGE62696.2024.10776654).URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10776654&isnumber=10776599>
- [44] Διάρλεξη “Εισαγωγή στη Διαγνωστική” Μαθήματος “Ειδικά Κεφάλαια Ηλεκτρικών Μηχανών”, Κωνσταντίνου Γυφτάκη.
- [45] N. Bhole and S. Ghodke. “Motor Current Signature Analysis for Fault Detection of Induction Machine—A Review,” in *2021 4th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*, NaviMumbai, India: IEEE, Jan. 2021, pp. 1–6. doi:



[10.1109/ICNTE51185.2021.9487715.URL: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9487715&isnumber=9487569](https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9487715&isnumber=9487569)

[46] Stephen J. Chapman. “Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC”, Εκδόσεις Τζιόλα. ISBN: 978-960-418-741-6.

[47] Διάλεξη “Ασύγχρονες Μηχανές” Μαθήματος “Ηλεκτρικές Μηχανές”, Κωνσταντίνου Γυφτάκη.