

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ /
TECHNICAL
UNIVERSITY
OF CRETE**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ ΛΙΟΤΣΗ

Διερεύνηση της συμπεριφοράς των αρμονικών των ηλεκτρομαγνητικών μεγεθών επαγωγικών κινητήρων υπό σφάλματα δρομέα.

Investigation on the electromagnetic variables' harmonic behaviour of induction motors under rotor faults.

Εξεταστική Επιτροπή:

1. Κωνσταντίνος Γυφτάκης (επιβλέπων)
2. Ευτύχιος Κουτρούλης
3. Παναγιώτης Παναγιώτου (University of Sheffield, UK)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην ανάλυση των αρμονικών του ρεύματος, της μαγνητικής ροής και της ροπής ενός επαγωγικού κινητήρα 4kW, βραχυκυκλωμένου κλωβού, όταν αυτός λειτουργεί με πλήρες φορτίο και υπό την παρουσία διαφόρων επιπέδων σφάλματος σπασμένης μπάρας δρομέα.

Πρώτον, δίνεται μια εισαγωγή στους επαγωγικούς κινητήρες, στα είδη σφαλμάτων που εμφανίζουν καθώς και στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την διάγνωση τους. Ακολούθως αναλύεται βαθύτερα το σφάλμα σπασμένης μπάρας δρομέα και οι διαγνωστικές μέθοδοι που επιλέγονται για την καταπολέμηση του. Στην συνέχεια γίνεται αναφορά στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων πάνω στην οποία βασίζεται η προσομοίωση του κινητήρα ενώ παρουσιάζονται και τα χαρακτηριστικά αυτού, όπως μοντελοποιούνται στο περιβάλλον του SimCenter Magnet.

Στο βασικό μέρος της διπλωματικής παραθέτεται η ηλεκτρομαγνητική ανάλυση της μηχανής, σε υγιή και εσφαλμένη κατάσταση, και κυριότερα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα χρήσης κάθε μεθόδου διάγνωσης, βασισμένα στην παρακολούθηση, του ρεύματος, της μαγνητικής ροής και της ροπής, της μηχανής είτε στην μόνιμη κατάσταση είτε κατά την εκκίνηση της.

Εν κατακλείδι, μέσα από τα παραπάνω εξάγεται η αποτελεσματικότητα των μεθόδων διάγνωσης, ανά επίπεδο του σφάλματος, ώστε αυτές να χρησιμοποιούνται στοχευμένα και να προλαμβάνεται έγκαιρα η καταστροφική όξυνση του.

ABSTRACT

The present thesis aims at analysing the current, stray flux and torque harmonics of a 4kW squirrel cage induction motor when operating on full load and under various levels of broken rotor bar faults.

Firstly there's an introduction to the induction motors, the different kinds of fault they can present as well as the various methods used to diagnose them. Following that, a deeper analysis is made on the broken rotor bar fault coupled with the diagnostic methods commonly used to tackle it. Next there's a mention of the finite element method, on which the motor's simulation is based on, in addition to the presentation of the motor's characteristics in the way they are modelled using SimCenter Magnet.

On the main part of the thesis, an electromagnetic analysis of the machine, both in a healthy and faulty state is displayed, as well as most importantly the presentation of the results of the use of diagnostic methods, which are based on the monitoring of the motors' current, stray flux and torque, both in the steady state and startup.

In closing, with all of the above, a conclusion is drawn on the effectiveness of each diagnostic method, per fault level, so they can be used accordingly and a fatal escalation of the fault to be prevented.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρωταρχικά, θα ήθελα να ευχαριστώ τους γονείς μου, για την υποστήριξη και τις θυσίες τους όλα αυτά τα χρόνια που χωρίς αυτά θα ήταν αδύνατο να πραγματοποιήσω και να ολοκληρώσω τις σπουδές μου. Ακόμη για την παρούσα διπλωματική εργασία, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα, Κωνσταντίνο Γυφτάκη, για την πολύτιμη καθοδήγηση του και την άψογη συνεργασία μας όλη αυτή την περίοδο εκπόνησης της, καθώς και σε όσους συναδέλφους, συμφοιτητές μου έβαλαν το λιθαράκι τους απαντώντας σε απορίες μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ	7
1.1 Εισαγωγή	7
1.2 Κατασκευαστική Δομή Ασύγχρονης Μηχανής	8
1.3 Αρχή Λειτουργίας Επαγωγικού Κινητήρα	9
1.4 Ισοδύναμο Κύκλωμα Επαγωγικού Κινητήρα	11
1.5 Ροπή και Ρεύμα Επαγωγικού Κινητήρα	13
1.6 Ροή Ισχύος Επαγωγικού Κινητήρα	15
2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΕΙΔΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ	17
2.1 Αιτίες Εμφάνισης Σφαλμάτων	17
2.2 Σφάλματα Δρομέα	18
2.3 Σφάλματα Στάτη	19
3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ	21
3.1 Motor Current Signature Analysis	21
3.2 Flux Monitoring	22
3.3 Vibration Monitoring	23
4. ΤΟ ΣΦΑΛΜΑ ΤΗΣ ΣΠΑΣΜΕΝΗΣ ΜΠΑΡΑΣ ΔΡΟΜΕΑ	24
4.1 Κατασκευαστικοί Λόγοι Εμφάνισης Σφάλματος	24
4.2 Παράγοντες Γήρανσης Κινητήρα	26
4.3 Επιπτώσεις Σφάλματος Σπασμένης Μπάρας	29
5. ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΣΠΑΣΜΕΝΗΣ ΜΠΑΡΑΣ ΔΡΟΜΕΑ	31
5.1 Motor Current Signature Analysis	31
5.2 Vibration Monitoring	34
5.3 Torque Monitoring	34
5.4 Flux Monitoring	36
5.5 Παρακολούθηση Μεγεθών κατά την εκκίνηση	38
6. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	41
7. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	45
7.1 Βασικά Χαρακτηριστικά	45
7.2 Στάτης	45
7.3 Δρομέας	48
7.4 Διάκενο, Αισθητήρες, Οριακές Συνθήκες	50
7.5 Βασικά Χαρακτηριστικά Υλικών	52
8. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΕ ΥΓΙΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΜΕ ΣΦΑΛΜΑ ΣΠΑΣΜΕΝΗΣ ΜΠΑΡΑΣ	54
8.1 Μοντελοποίηση Σφάλματος	54

8.2 Βασικά Μεγέθη	54
8.3 Μαγνητική Ροή Υγιούς Μηχανής	55
8.4 Πυκνότητα Ρεύματος Υγιούς Μηχανής	57
8.5 Μαγνητική Ροή Μηχανής με Σπασμένη Μπάρα	59
8.6 Πυκνότητα Ρεύματος Μηχανής με Σπασμένη Μπάρα	61
9. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΝΑ ΜΕΘΟΔΟ	63
9.1 Εισαγωγή	63
9.2 Παρακολούθηση Ρεύματος Στάτη στην Μόνιμη Κατάσταση (MCSA)	64
9.3 Παρακολούθηση Stray Flux στην Μόνιμη Κατάσταση	79
9.4 Παρακολούθηση Ροπής στην Μόνιμη Κατάσταση	87
9.5 Παρακολούθηση Ρεύματος στην Εκκίνηση	90
9.6 Παρακολούθηση Stray Flux στην Εκκίνηση	96
9.7 Παρακολούθηση Ροπής στην Εκκίνηση	100
10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	102
10.1 Συμπεράσματα	102
10.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	103
11. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	104

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

1.1 Εισαγωγή [43]

Οι ηλεκτρικές μηχανές χωρίζονται ως προς το είδος λειτουργίας τους σε γεννήτριες και κινητήρες.

Η βάση της λειτουργίας και των δύο στηρίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Στις γεννήτριες μέσω κατάλληλης κίνησης ενός αγωγού μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, επάγεται τάση στα άκρα του και έτσι η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Για τους κινητήρες αντίστοιχα όταν ένας αγωγός που διαρρέεται με ρεύμα βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο τότε σε αυτόν ασκείται δύναμη που τείνει να τον κινήσει με αποτέλεσμα την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική.

Στην εποχή μας ο πιο διαδεδομένος τύπος ηλεκτρικής μηχανής είναι η ασύγχρονη ηλεκτρική μηχανή. Αν και οι επαγωγικές γεννήτριες βρίσκουν εφαρμογή σε αιολικά συστήματα. Στην πλειοψηφία των εφαρμογών τους, οι ασύγχρονες μηχανές χρησιμοποιούνται ως κινητήρες. Η αρχή λειτουργίας των επαγωγικών κινητήρων αναλύεται παρακάτω.

Οι ασύγχρονοι κινητήρες είναι απλοί στην σχεδίαση και την λειτουργία τους, είναι φθηνότεροι, ενώ παράλληλα είναι αξιόπιστοι και στιβαροί πράμα που ελαχιστοποιεί τις απαιτήσεις συντήρησης τους. Ανάλογα την σχεδίαση τους, παρουσιάζονται σε διάφορα μεγέθη ισχύος, από Watt έως MegaWatt. Αυτή η ευελιξία τους, μαζί με τα υπόλοιπα πλεονεκτήματά τους κάνουν τους επαγωγικούς κινητήρες είναι ευρέως διαδεδομένους στην βιομηχανία και αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των μηχανών που χρησιμοποιούνται σε μια μονάδα.

Εκεί χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές μεταξύ των οποίων οι παρακάτω:

- Συστήματα Ψύξης και Εξαερισμού (ανεμιστήρες).
- Αντλίες και Συμπιεστές
- Μεταφορά Υλικών (μετακομιστές, ιμάντες)
- Μηχανήματα Παραγωγής (πρέσες, τροχαλίες, ψαλίδια)
- Βαριά Μηχανήματα Εδάφους (εκσκαφείς, τρυπάνια)

Οι κινητήρες, στην μονοφασική τους μορφή, εμφανίζονται και σε πληθώρα οικιακών εφαρμογών χαμηλότερης ισχύος, όπως τα πλυντήρια ρούχων, ψυγεία, ηλεκτρικοί ανεμιστήρες, ηλεκτρικά εργαλεία (τρυπάνια χειρός), κ.α.

1.2 Κατασκευαστική Δομή Ασύγχρονης Μηχανής [44]

Οι ασύγχρονες τριφασικές μηχανές αποτελούνται από δύο βασικά μέρη, το σταθερό μέρος που ονομάζεται στάτης και το στρεφόμενο μέρος, τον δρομέα. Τα δύο αυτά μέρη χωρίζονται μεταξύ τους από το διάκενο αέρα.

Ο στάτης είναι το μέρος της μηχανής που είναι υπεύθυνο για την παραγωγή του μαγνητικού πεδίου. Αποτελείται από τον σωληνοειδή πυρήνα με αυλακώσεις, που είναι κατασκευασμένος από σιδηρομαγνητικό υλικό (σίδηρο ή αλουμίνιο), είτε συμπαγές, είτε υπό την μορφή ελασμάτων μονωμένων μεταξύ τους (για τον περιορισμό των απωλειών λόγω των δινορρευσμάτων), το ατσάλινο κέλυφος που προσδίδει προστασία και το συμμετρικό τριφασικό τύλιγμα.

Τα τρία τυλίγματα αποτελούνται από πηνία τοποθετημένα στα αυλάκια του στάτη με 120 μοίρες ηλεκτρική διαφορά φάσης στο χώρο μεταξύ τους. Τα τύλιγμα διακρίνονται σε συγκεντρωμένα και διανεμημένα ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής τους.

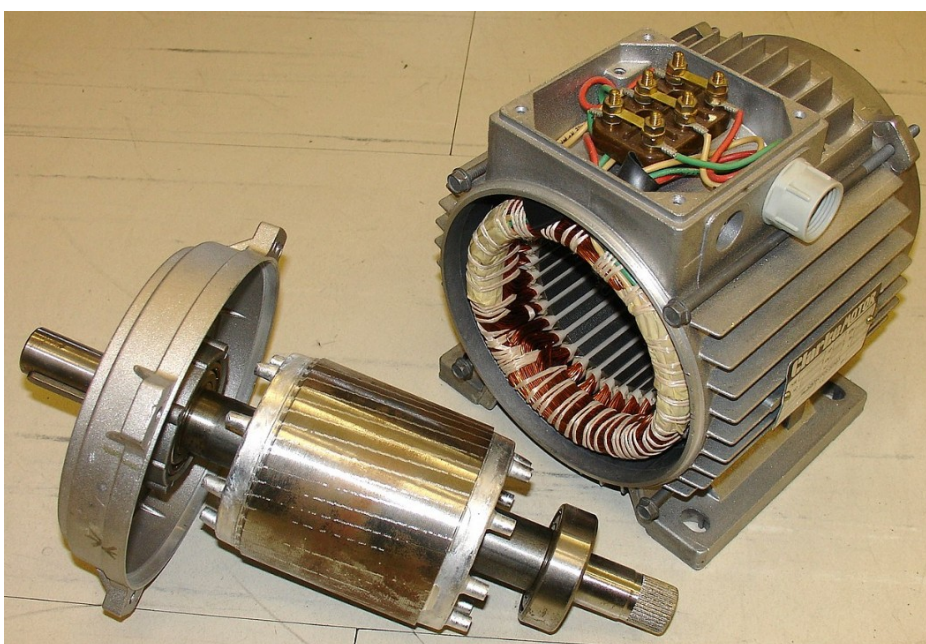
Ο δρομέας αποτελείται από τον άξονα και από πάνω του τον κυλινδρικό πυρήνα.

Οι δρομείς χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Βραχυκυκλωμένου κλωβού
2. Δακτυλιοφόρου δρομέα
3. Συμπαγούς φερρομαγνητικού δρομέα

Ο πιο διαδεδομένος τύπος αυτός του βραχυκυκλωμένου κλωβού.

Συγκεκριμένα στον βραχυκυκλωμένο κλωβό έχουμε είτε χυτευμένο αλουμίνιο στα αυλάκια του σιδήρου, βραχυκυκλωμένα περιμετρικά στα δύο άκρα μέσω αλουμινένιων δαχτυλιδιών, είτε μπάρες από χαλκό, μεγαλύτερη αγωγιμότητας από το αλουμίνιο και άρα ιδανικότερα για εφαρμογές υψηλότερης ισχύος.



Εικόνα 1.1 Δρομέας βραχυκυκλωμένου δρομέα και στάτης τριφασικού ασύγχρονου κινητήρα.

Στον δακτυλιοφόρο δρομέα αντί για μπάρες έχουμε στα αυλάκια τρία τυλίγματα τα οποία στην μία μεριά τους ενώνονται σε συνδεσμολογία αστέρα η άλλη ενώνεται με τρεις δακτυλίους ολισθήσεως.



Εικόνα 1.2 Δακτυλιοφόρος δρομέας [15].

Στους δρομείς συμπαγούς φερρομαγνητικού δρομέα απουσιάζουν αυλακώσεις και τυλίγματα κάνοντας τον ιδανικό για εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων λόγω της ανθεκτικότητας του σε φυγόκεντρες δυνάμεις.

1.3 Αρχή Λειτουργίας Επαγωγικού Κινητήρα [43]

Όταν τροφοδοτήσουμε τα τυλίγματα του στάτη με εναλλασσόμενη, τριφασική, συμμετρική τάση και τα διαπεράσει έτσι τριφασικό εναλλασσόμενο ρεύμα, δημιουργείται περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, σταθερού μέτρου. Αυτό συμβαίνει διότι όταν αγωγοί διαρρέονται από ρεύμα δημιουργούν γύρω τους μαγνητικό πεδίο, όμως τα ρεύματα που διαρρέουν τα τυλίγματα κάθε φάσης ξεχωριστά είναι εναλλασσόμενα με διαφορά φάσης 120 μοίρες μεταξύ τους. Με αυτό τον τρόπο το μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το τύλιγμα κάθε φάσης βρίσκεται σε διαφορετική διεύθυνση στο χώρο αλλά το μέτρο της συνιστώσας τους παραμένει σταθερό.

Λόγω της περιστροφής του μαγνητικού πεδίου, εντός της μηχανής έχουμε μεταβολή της μαγνητικής ροής. Εκεί βρίσκεται ο δρομέας στον οποίο σύμφωνα με τον νόμο του Faraday, επάγεται ηλεκτρεγερτική δύναμη (EMF). Η εξ' επαγωγής αυτή τάση δημιουργεί ρεύματα που διαρρέουν τον κλωβό. Έτσι η παρουσία ενός κλειστού κυκλώματος (δρομέας) που διαρρέεται από ρεύμα μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο, έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία δυνάμεων με βάση τον νόμο του Lorentz. Οι δυνάμεις αυτές εφαρμόζονται στις μπάρες του δρομέα, οι οποίες είναι τοποθετημένες συμμετρικά και ανά αντικριστά ζεύγη στην περιφέρεια του πυρήνα του δρομέα, επιτυγχάνοντας ροπή που περιστρέφει τον δρομέα.

Η ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη ονομάζεται σύγχρονη και δίνεται από τον τύπο:

$$n_s = \frac{60 * f_s}{p} \quad (1.1)$$

Όπου :

- f_s η συχνότητα των πηγών (Hz)
- p ο αριθμός ζευγών πόλων του στάτη

Αν η σχετική ταχύτητα του δρομέα είναι ίση με αυτή του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου του στάτη τότε δεν υπάρχει μεταβολή της μαγνητικής ροής στον δρομέα οπότε δεν έχουμε τάση εξ' επαγωγής.

$$EMF = -\frac{d\Phi}{dt} = 0 \quad (1.2)$$

Εφόσον δεν έχουμε τάση δεν έχουμε προφανώς και ρεύμα οπότε δεν εμφανίζονται δυνάμεις Lorentz στις μπάρες του δρομέα και δεν παράγεται ροπή οπότε και ο δρομέας σταδιακά θα επιβραδύνει έως ότου έχουμε ξανά σχετική κίνηση που σημαίνει μεταβολή στην μαγνητική ροή άρα τάση και ρεύμα εξ' επαγωγής και τελικά ροπή.

Στην πραγματικότητα βέβαια ο κινητήρας θα έχει πάντα ένα μικρό φορτίο λόγω της τριβής στα ρουλεμάν και λόγω του συστήματος ψύξης του, οπότε εν τέλει ο δρομέας της μηχανής περιστρέφεται με ταχύτητα κοντινή αλλά μικρότερη της σύγχρονης και έτσι μπορούμε να ορίσουμε ένα από τα σημαντικότερα μεγέθη στην ανάλυση των επαγωγικών μηχανών, την ολίσθηση.

Η ολίσθηση αντιπροσωπεύει την σχετική διαφορά μεταξύ της ταχύτητας του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από τον στάτη και της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα.

Συμβολίζεται με s και δίνεται από τον τύπο:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1.3)$$

Όπου :

- n_s η σύγχρονη ταχύτητα (rpm)
- n η ταχύτητα του δρομέα (rpm)

Μπορούμε να θεωρήσουμε ως ταχύτητα του δρομέα το μέγεθος $n_r = n_s - n$ και έτσι σε συνδυασμό με την παραπάνω εξίσωση η συχνότητα του δρομέα f_r είναι δυνατό να γραφεί ως:

$$f_r = s \cdot f_s \quad (1.4)$$

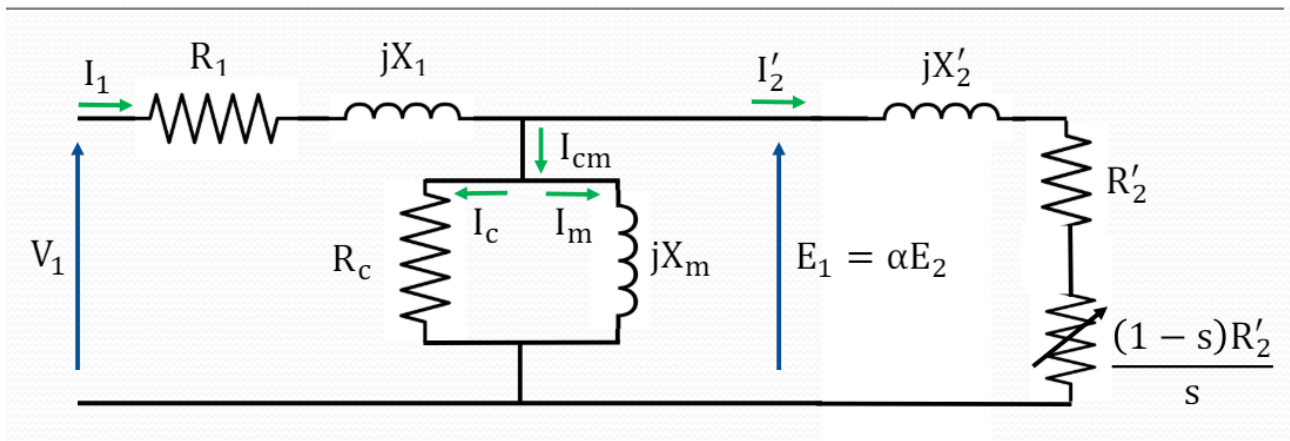
Το μέγεθος αυτό καθορίζει και την συχνότητα των μεγεθών που επάγονται στον δρομέα, δηλαδή την τάση και το ρεύμα εξ' επαγωγής.

1.4 Ισοδύναμο Κύκλωμα Επαγωγικού Κινητήρα [43]

Η συμμετρία του κινητήρα ως προς τις τρεις φάσεις μας επιτρέπει να τον μελετήσουμε σχεδιάζοντας το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα του. Οι επαγωγικοί κινητήρες χαρακτηρίζονται και ως στρεφόμενοι μετασχηματιστές λόγω της όμοιας λειτουργίας τους όσον αφορά την εξ' επαγωγής παραγόμενη τάση. Στην πραγματικότητα δεν έχουμε γαλβανική ζεύξη μεταξύ στάτη και δρομέα αλλά για λόγους απλούστευσης παρουσιάζονται και τα δύο σε ένα κοινό κύκλωμα.

Όπως βλέπουμε στην εικόνα στο κύκλωμα εμφανίζονται διάφορα στοιχεία όλα με την δική τους σημασία. Συγκεκριμένα:

- Με R_1 έχουμε την ωμική αντίσταση του τυλίγματος του στάτη από την οποία προκύπτουν οι απώλειες Joule του.
- Με X_1 έχουμε την αντίδραση σκέδασης του στάτη.
- Με R_c έχουμε την ωμική αντίσταση που συμβολίζει τις απώλειες σιδήρου της μηχανής.
- Με X_m είναι η αντίδραση μαγνήτισης που συμβολίζει το ωφέλιμο μαγνητικό πεδίο.
- Με R_2' έχουμε την ωμική αντίσταση του δρομέα από την οποία προκύπτουν οι απώλειες Joule του.
- Με X_2' έχουμε την αντίδραση σκέδασης του δρομέα.
- Ο λόγος $\frac{(1-s)R_2'}{s}$ θεωρείται πρακτικά η έξοδος του κυκλώματος και είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ηλεκτρομαγνητική ισχύ του κινητήρα.



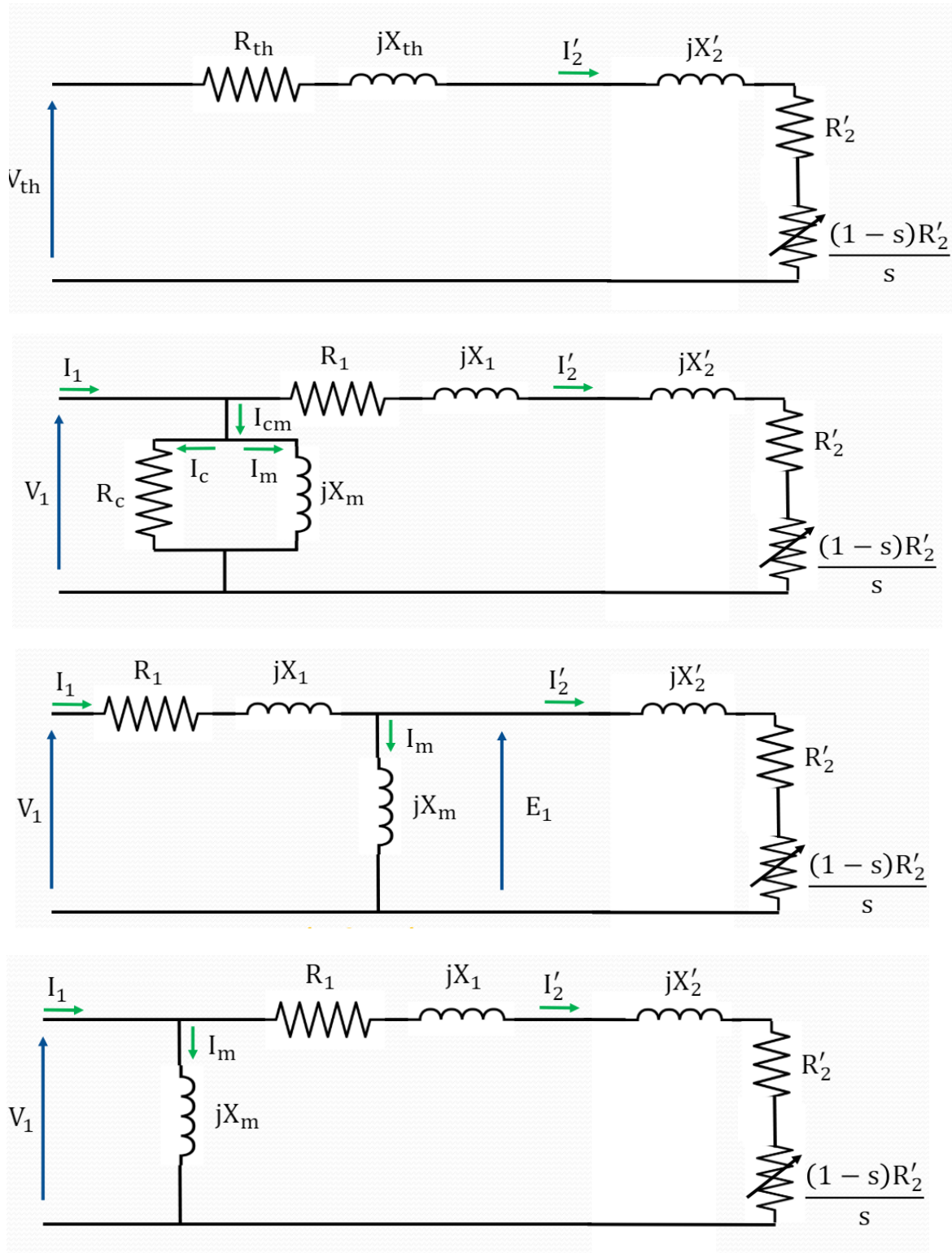
Εικόνα 1.3 Πλήρες μονοφασικό ισοδύναμο ασύγχρονης μηχανής.

Πάνω στο πραγματικό ισοδύναμο κύκλωμα μπορούν να εφαρμοστούν περαιτέρω απλουστεύσεις, με κάποιους περιορισμούς, όπως:

1. Εφαρμογή του ισοδύναμου Thevenin.
2. Μεταφορά του παράλληλου κλάδου στην αρχή του κυκλώματος, εφόσον η πτώση τάσης στην σύνθετη αντίσταση του στάτη είναι μικρή.
3. Εξαίρεση της αντίστασης R_c αν θεωρήσουμε πως, με τροφοδοσία σταθερής τάσης και συχνότητας, οι απώλειες σιδήρου του στάτη είναι δεδομένα σταθερές ενώ αυτές

του δρομέα είναι αμελητέες όσο αυξάνεται η ταχύτητα του και παράλληλα οι μηχανικές απώλειες μειώνονται όσο αυτή ελαττώνεται. Έτσι το άθροισμα αυτών των απωλειών είναι κατά προσέγγιση σταθερό σε όλη την διάρκεια λειτουργίας της μηχανής και λογίζεται ως απώλειες περιστροφής.

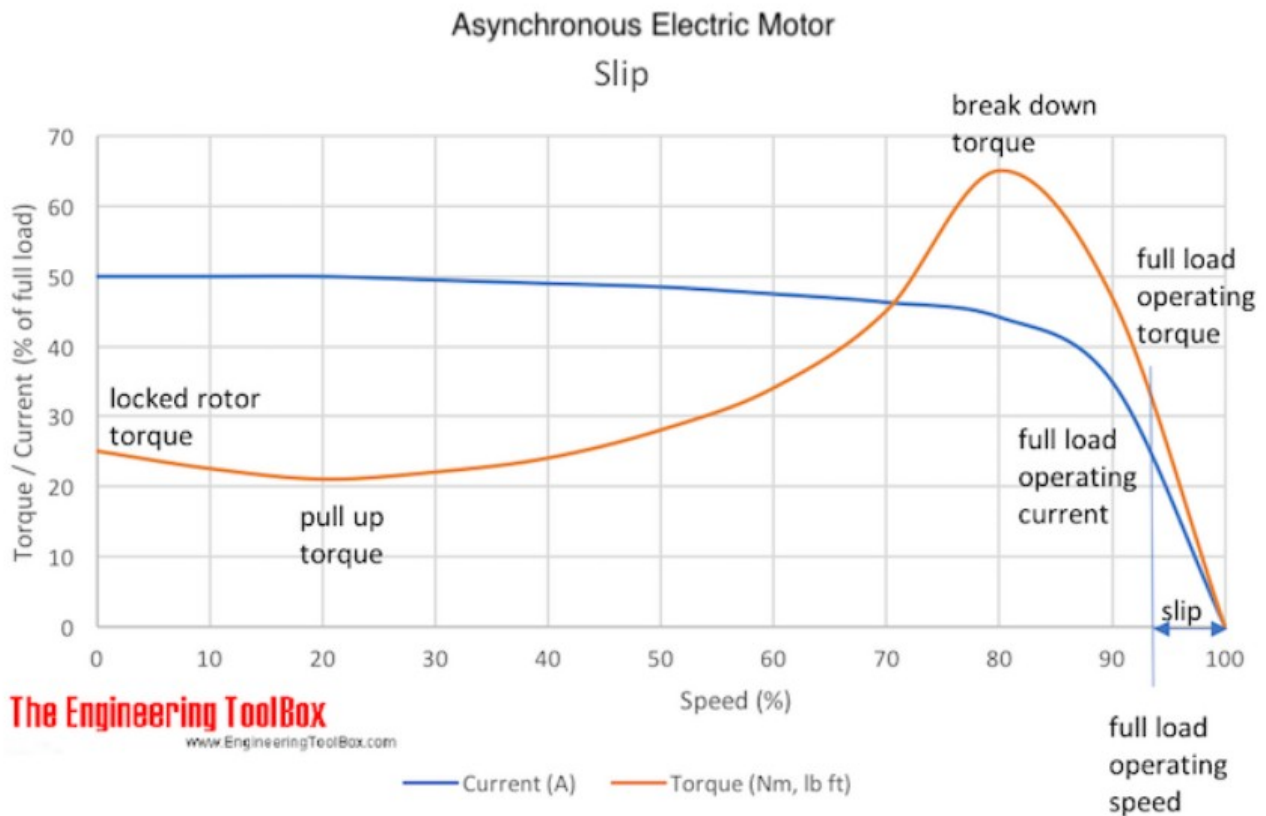
4. Συνδυασμός των (3), (4).



Εικόνα 1.4 Απλοποιημένα ισοδύναμα κυκλώματα.

1.5 Ροπή και Ρεύμα Επαγωγικού Κινητήρα [45]

Βασικά μεγέθη που μας απασχολούν στην ανάλυση των ασύγχρονων κινητήρων είναι το ρεύμα και η ροπή. Η συμπεριφορά τους παρατίθεται μέσα από το διάγραμμα ροπής/ρεύματος-στροφών.



Εικόνα 1.5 Διάγραμμα Ροπής-Στροφών και Ρεύματος-Στροφών [16].

Για να εξάγουμε την εξίσωση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής T_{em} χρησιμοποιούμε το απλουστευμένο ισοδύναμο κατά Thevenin.

Η εξίσωση ροπής που προκύπτει είναι:

$$T_{em} = \frac{1}{\omega_s} \frac{V_{TH}^2}{\left(R_{TH} + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{TH} + X_2')^2} \cdot \left(\frac{R_2'}{s}\right) \quad (1.5)$$

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

Παρατηρείται ότι η ροπή είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης εισόδου και εξαρτώμενη από την ολίσθηση.

Η χαρακτηριστική της ροπής χωρίζεται σε δύο περιοχές, την περιοχή αστάθειας και την περιοχή ευστάθειας, διαχωριζόμενες από το σημείο της ροπής ανατροπής (breakdown torque).

Χρήσιμες τιμές που μας απασχολούν στο διάγραμμα είναι η τιμές της ροπής εκκίνησης και ανατροπής. Η ροπή εκκίνησης είναι υπολογίζοντας θέτοντας στην εξίσωση ροπής την ολίσθηση s ίση με 1. Έτσι προκύπτει:

$$T_{em} = \frac{1}{\omega_s} \frac{V_{TH}^2}{(R_{TH} + R_2')^2 + (X_{TH} + X_2')^2} \cdot R_2' \quad (1.6)$$

Παρατηρούμε πως η ροπή εκκίνησης είναι ανάλογη της αντίστασης του δρομέα.

Για την ροπή ανατροπής παίρνουμε την παράγωγο της ροπής ως προς την ολίσθηση και την θέτουμε ίση με μηδέν. Από την επίλυση της προκύπτει:

$$s_{maxT} = \pm \frac{R_2}{\sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2')^2}} \quad (1.7)$$

Από τις δύο τιμές που προκύπτουν, μία για την περίπτωση κινητήρα (+) και μία για την περίπτωση γεννήτριας (-) αντικαθιστώντας τις στην εξίσωση (νούμερο), παίρνουμε την ροπή ανατροπής. Για κινητήρα:

$$T_{emMAX} = \frac{1}{2 \cdot \omega_s} \frac{V_{TH}^2}{R_{TH} + \sqrt{R_{TH}^2 + (X_{TH} + X_2')^2}} \quad (1.8)$$

Βλέπουμε πως η μέγιστη ροπή είναι αντιστρόφως ανάλογη του αθροίσματος αντιδράσεων σκέδασης δρομέα στάτη.

Τυπικά το σημείο λειτουργίας του κινητήρα είναι λίγο μετά την ροπή ανατροπής εντός της ευσταθούς περιοχής. Κάθε αύξηση του φορτίου θα προκαλέσει μείωση των στροφών και αύξηση της ροπής με αποτέλεσμα την επαναφορά του συστήματος στο αρχικό σημείο λειτουργίας. Αντίθετα κάθε μείωση του φορτίου προκαλεί αύξηση των στροφών, μείωση της ροπής με αποτέλεσμα πάλι την επαναφορά του συστήματος στο αρχικό σημείο λειτουργίας. Αν η ροπή του φορτίου αυξηθεί πέρα από την ροπή ανατροπής τότε η ροπή του κινητήρα μειώνεται και αναπόφευκτα αυτός σταματάει.

Για το ρεύμα, παρατηρώντας το πλήρες ισοδύναμο βλέπουμε πως για ταχύτητα ίση με την σύγχρονη η ολίσθηση είναι ίση με μηδέν οπότε ο όρος $\frac{(1-s)R_2'}{s}$ απειρίζεται. Έτσι το ρεύμα του δρομέα είναι μηδενικό και το ρεύμα στάτη είναι ίσο με του παράλληλου κλάδου $I_1 = I_{CM}$.

Όσο μειώνεται η ταχύτητα τόσο αυξάνεται το s και τα συνέπεια το ρεύμα στον δρομέα πράγμα που αυξάνει παράλληλα το ρεύμα στο στάτη $I_1 = I_{CM} + I_2'$. Επομένως η μέγιστη τιμή του ρεύματος επιτυγχάνεται στην εκκίνηση της μηχανής με τιμή που μπορεί να φτάνει και 8 φορές αυτή της ονομαστικής.

1.6 Ροή Ισχύος Επαγωγικού Κινητήρα [44]

Κατά την λειτουργία της μια μηχανή εμφανίζει απώλειες ενέργειας. Αυτές είναι οι απώλειες Joule στα τυλίγματα του στάτη και στον δρομέα, οι απώλειες σιδήρου του στάτη και του δρομέα και οι μηχανικές απώλειες λόγω τριβών και εξαερισμού.

Οι απώλειες Joule ανά φάση έχουν μοντελοποιηθεί στο κύκλωμα, όπως έχει προαναφερθεί, με τις αντιστάσεις R_1, R_2' και μπορούν να υπολογιστούν με τους τύπους $P_{R1} = I_1^2 \cdot R_1$ και $P_{R2} = I_2'^2 \cdot R_2'$ για στάτη και δρομέα αντίστοιχα.

Οι απώλειες σιδήρου αποτελούν το άθροισμα των απωλειών υστέρησης και δινορρευμάτων στον στάτη και τον δρομέα. Αυτές υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους:

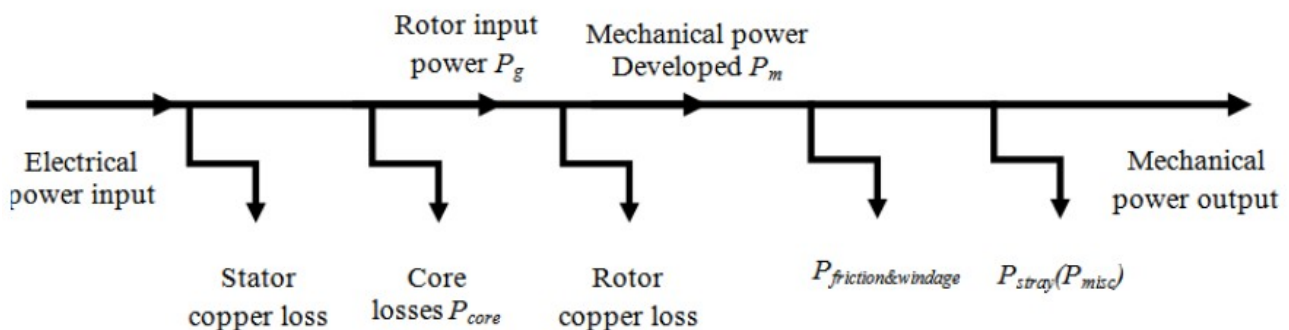
$$P_h = K_h \cdot B_{max}^n \cdot f \quad \text{και} \quad P_e = K_e \cdot B_{max}^2 \cdot f^2 \quad \text{αντίστοιχα όπου,}$$

- K_h, K_e σταθερές υλικού.
- B_{max} μέγιστο μαγνητικής επαγωγής.
- n σταθερά που εξαρτάται από το υλικό.
- f η συχνότητα.

Έχουμε δείξει προηγουμένως ότι η συχνότητα των μεγεθών του δρομέα εξαρτάται από την ολίσθηση. Οπότε μπορούμε να θεωρήσουμε τις απώλειες σιδήρου του δρομέα αμελητέες διότι στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας η ολίσθηση είναι πολύ μικρή και συνεπώς παράλληλα και η συχνότητα μαγνητικού πεδίου του δρομέα.

Οι μηχανικές απώλειες εξαρτιούνται άμεσα από την ταχύτητα περιστροφής του άξονα και μπορούν να υπολογιστούν από την σχέση: $P_{fw} = C_{fw} \cdot n^2$ όπου C_{fw} σταθερά μηχανικών απωλειών και n η ταχύτητα του άξονα.

Το συνολικό διάγραμμα ροής ισχύος ενός επαγωγικού κινητήρα παραθέτεται στην εικόνα από κάτω.



Εικόνα 1.6 Διάγραμμα Ροής Ισχύος Επαγωγικού Κινητήρα [17].

Για τον υπολογισμό της ισχύς εισόδου έχουμε:

$$P_{el}=3 \cdot V_s \cdot I_1 \cdot \cos\varphi \quad (1.9)$$

όπου:

- V_s φασική τάση εισόδου.
- I_1 φασικό ρεύμα εισόδου.
- φ η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος.

Στο διάγραμμα παρουσιάζεται και ένα άλλο μέγεθος, η ισχύς διακένου. Η ισχύς διακένου είναι στην ουσία η ισχύς εισόδου το δρομέα και προκύπτει αν από την ισχύ εισόδου της μηχανής αφαιρεθούν οι απώλειες χαλκού και σιδήρου του στάτη.

$$P_G = P_{el} - P_{CUs} - P_{core} = \frac{3 \cdot I_2'^2 \cdot R_2'}{s} \quad (1.10)$$

Η ηλεκτρομαγνητική ισχύς εξόδου είναι η παραγόμενη μηχανική ισχύς λόγω του ηλεκτρομαγνητικού φαινομένου υπολογίζεται ως εξής:

$$P_m = P_G - P_{CUr} = (1-s) \cdot P_G \quad (1.11)$$

Από την ηλεκτρομαγνητική ισχύ αφαιρώντας τις απώλειες λόγω τριβής και ψύξης παίρνουμε την τελική, μηχανική ισχύ εξόδου.

$$P_{mech} = P_m - P_{fw}$$

Έχοντας ηλεκτρομαγνητική και μηχανική ισχύ μπορούμε να υπολογίσουμε τις αντίστοιχες ροπές διαιρώντας με την γωνιακή ταχύτητα του δρομέα.

$$T_{em} = \frac{P_m}{\omega}, T_{mech} = \frac{P_{mech}}{\omega} \quad (1.12)$$

Εναλλακτικά η ηλεκτρομαγνητική ροπή μπορεί να εξαχθεί από από την ισχύ διακένου διαιρώντας αυτή την φορά με την σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα.

$$T_{em} = \frac{P_{AG}}{\omega_s} \quad (1.13)$$

Τέλος ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα βρίσκεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{mech}}{P_{el}} = \frac{P_{mech}}{P_{mech} + P_{losses}} = \frac{P_{el} - P_{losses}}{P_{in}} \quad (1.14)$$

όπου P_{losses} το άθροισμα των απωλειών.

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΕΙΔΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

2.1 Αιτίες Εμφάνισης Σφαλμάτων [46]

Όπως κάθε πράγμα φτιαγμένο από το ανθρώπινο χέρι και έτσι και οι ηλεκτρικές μηχανές αργά ή γρήγορα εμφανίζουν σφάλματα. Αυτά τα σφάλματα άλλοτε απλώς δυσχεραίνουν την λειτουργία της μηχανής όμως κάποιες φορές μπορούν να αποβούν καταστροφικά.

Στην πραγματικότητα μπορούμε να διακρίνουμε τους λόγους εμφάνισης των σφαλμάτων σε τρεις κατηγορίες:

1. Ανθρώπινος Παράγοντας.
2. Γήρανση.
3. Κατασκευαστικές Ατέλειες.

1)

Σε αυτή την κατηγορία περιέχονται αιτίες που προέρχονται από ανθρώπινο λάθος. Για παράδειγμα μπορεί να έχουμε λάθος επιλογή μηχανής για την εφαρμογή μας είτε ως προς τον τύπο είτε ως προς το μέγεθος της. Επίσης στην ίδια κατηγορία συντάσσεται η αμελής ή και κακή συντήρηση της μηχανής, μακριά από τα στάνταρ που ορίζει ο κατασκευαστής. Ακόμη έχουμε την λανθασμένη λειτουργία της μηχανής που περιέχει περιπτώσεις λειτουργίας της μηχανής υπό λάθος τάση, συχνότητα, συγχρονισμό, κα. Τέλος μπορούμε να προσθέσουμε τις περιπτώσεις ψευδούς αρνητικής διάγνωσης όπου ένα προϋπάρχων σφάλμα δεν αναγνωρίζεται. Όλες οι παραπάνω αστοχίες οδηγούν σε ταχύτερη καταπόνηση της μηχανής και άρα συχνότερη εμφάνιση νέων σφαλμάτων ή διαιώνιση και όξυνση των ήδη υπαρχόντων.

2)

Οι ηλεκτρικές μηχανές καθώς λειτουργούν υποβάλλονται σε διάφορες καταπονήσεις. Αυτές οι καταπονήσεις είναι γνωστές και από το αρκτικόλεξο TEAM (Thermal Electrical Ambient Mechanical) [33].

- Thermal εννοούμε τις θερμικές καταπονήσεις που δέχεται η μηχανή, πχ. λόγω της θερμότητας που εκπέμπουν οι αγωγοί κατά την ηλεκτροδότηση τους.
- Electrical περιλαμβάνει συνολικά το ηλεκτρικό στρες που δέχονται τμήματα της μηχανής.
- Mechanical αφορούν τις μηχανικές καταπονήσεις όπως δονήσεις και ταλαντώσεις.
- Ambient συμπεριλαμβάνουν τα υπόλοιπα που δεν καλύπτονται από τα παραπάνω.

Βασικό παράδειγμα γήρανσης αποτελεί η φθορά στην μόνωση που προκαλείται από χρόνια θερμική και μηχανική καταπόνηση και μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικά σφάλματα.

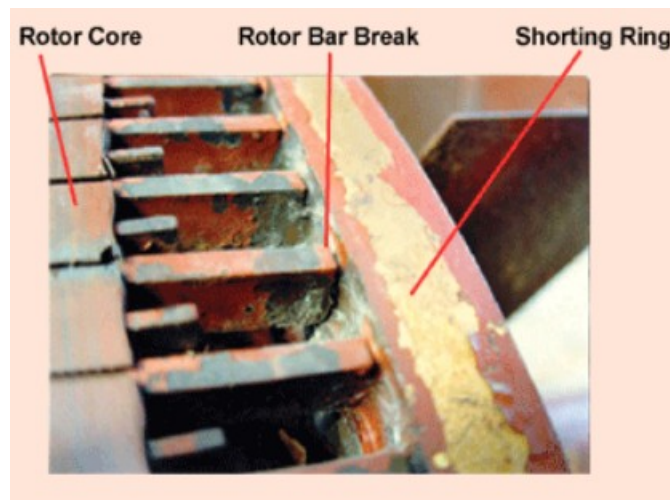
3)

Όταν γίνεται η κατασκευή των μηχανών είναι αναπόφευκτη η δημιουργία ασυμμετριών. Στο πέρας του χρόνου αυτές οι ασυμμετρίες, οδηγούν σε μεγαλύτερη καταπόνηση της μηχανής και κατά συνέπεια σε σφάλματα. Αφού αυτές οι ασυμμετρίες δεν μπορούν να αποφευχθούν ορίζονται επιτρεπόμενα όρια στα οποία θεωρούμε πως η λειτουργία της μηχανής εξελίσσεται ομαλά.

Μπορούμε να χωρίσουμε τα σφάλματα ενός κινητήρα κλωβού σε σφάλματα δρομέα και σφάλματα στάτη .

2.2 Σφάλματα Δρομέα

Συγκεκριμένα στον δρομέα μπορούν να εμφανιστούν ανοιχτοκυκλώματα που προκαλούνται από το σπάσιμο είτε κάποιας εκ των μπαρών του κλωβού είτε του δακτυλίου που τις ενώνει. Το σφάλμα σπασμένης μπάρας μελετείται διεξοδικά σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.



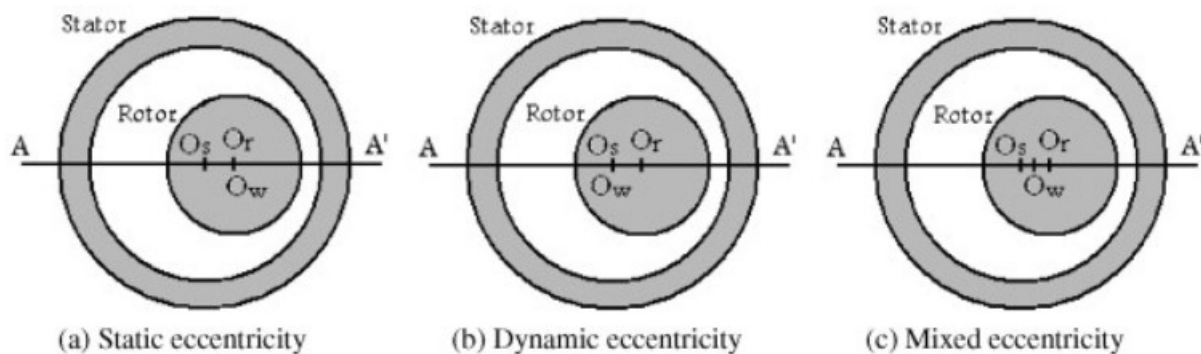
Εικόνα 2.1 Παράδειγμα σπασμένης μπάρας σε μηχανή [12].

Σφάλματα μπορούν να εμφανιστούν και στον σίδηρο του δρομέα και αφορούν είτε την αλλαγή της γεωμετρίας του σιδήρου είτε στην περίπτωση του φαινομένου της μαγνητικής ανισοτροπίας λόγω κάποιας κατασκευαστικής ατέλειας στην δημιουργία των ελασμάτων του δρομέα.

Ένα ακόμη σφάλμα δρομέα, που όμως προέρχεται από την κατασκευή της μηχανής, είναι αυτό της στατικής εκκεντρότητας [13]. Σε αυτό λόγω της λανθασμένης ευθυγράμμισης του δρομέα κατά την συναρμολόγηση του στην μηχανή προκαλείται διαφορά μεταξύ του γεωμετρικού του κέντρου σε σχέση με αυτό του στάτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή του διακένου στο χώρο προκαλώντας δυσλειτουργία στον κινητήρα. Στην πραγματικότητα περίπτωση στατικής εκκεντρότητας αποτελεί και το *onality*, όταν δηλαδή η εξωτερική επιφάνεια του δρομέα, ή και η εσωτερική του στάτη, έχουν ελλειπτική αντί για κυκλική μορφή.

Αν στην διαφορά μεταξύ του γεωμετρικού του κέντρου δρομέα και στάτη προστεθεί και διαφορά ως προς το γεωμετρικό κέντρο περιστροφής τότε παίρνουμε το σφάλμα της δυναμικής εκκεντρότητας όπου το διάκενο μεταβάλλεται στον χώρο και στον χρόνο. Σε αντίθεση με την στατική η δυναμική εκκεντρότητα δεν αποτελεί κατασκευαστικό σφάλμα και στην πορεία του χρόνου οξύνεται λόγω της εξτρά καταπόνησης των ρουλεμάν.

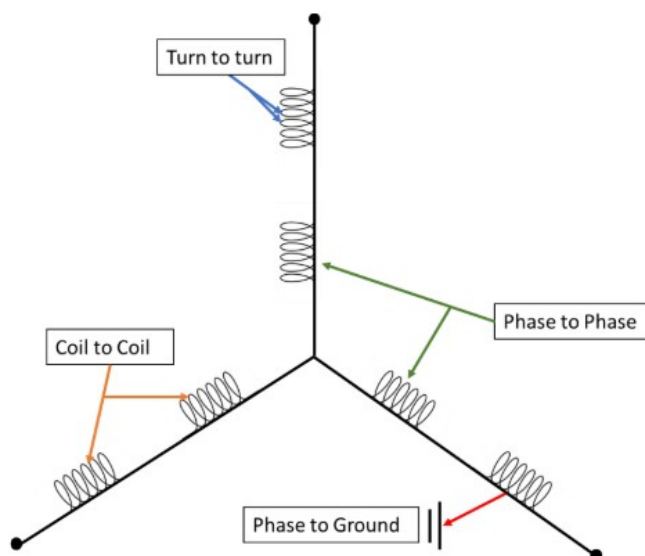
Η ταυτόχρονη παρουσία των δύο παραπάνω ονομάζεται μεικτή εκκεντρότητα. Το σφάλμα της εκκεντρότητας έστω και σε μικρό βαθμό είναι αναπόφευκτο και έχει θεσπιστεί όριο μεικτής εκκεντρότητας το 10%.



Εικόνα 2.2 Κάθετη τομή ηλεκτρικής μηχανής σε κατάσταση στατικής, δυναμικής, και μεικτής εκκεντρότητας [13].

2.3 Σφάλματα Στάτη

Για τον στάτη αντίστοιχα έχουμε ηλεκτρικά σφάλματα, ανοιχτοκυκλώματα και βραχυκυκλώματα, που εμφανίζονται στο τύλιγμα του. Τα βραχυκυκλώματα [34], είναι τριών ειδών, εσωτερικό βραχυκύκλωμα, βραχυκύκλωμα φάσης με φάσης και βραχυκύκλωμα φάσης με γη. Τα δύο τελευταία όταν συμβούν είναι ακαριαία καταστροφικά ενώ το πρώτο εξελίσσεται σε μέγεθος με την πάροδο του χρόνου οπότε έχει και την μεγαλύτερη διαγνωστική αξία.



Εικόνα 2.3 Ηλεκτρικά σφάλματα βραχυκυκλωμάτων του τυλίγματος του στάτη [14].

Όμοια με τον δρομέα, αλλαγή της γεωμετρίας του σιδήρου του στάτη (iron core deformation) οδηγεί σε παραμόρφωση του μαγνητικού του πεδίου και δυσλειτουργία της μηχανής.

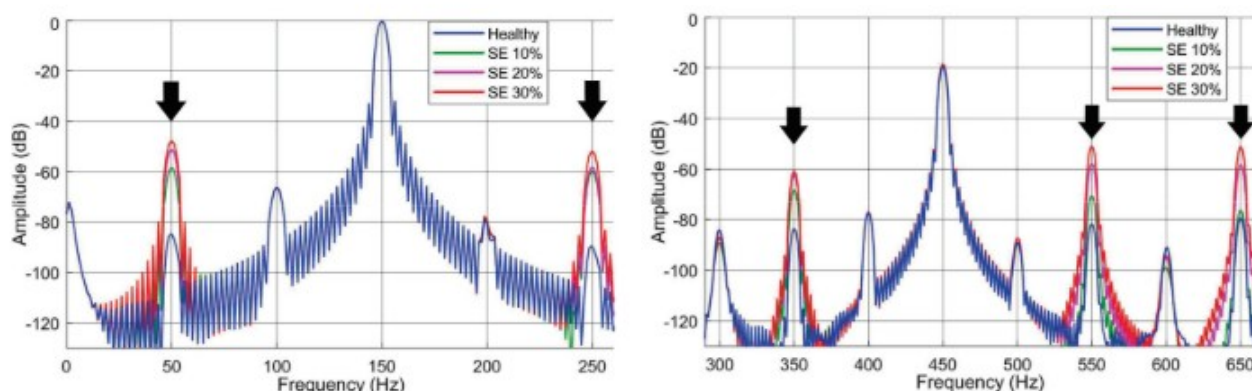
3. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ

Μέσα από την διαγνωστική στοχεύουμε στην εύρεση σφαλμάτων, όταν αυτά βρίσκονται σε πρώιμη κατάσταση και είναι χαμηλής σοβαρότητας, ώστε να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα και να αποφευχθεί η ολοκληρωτική καταστροφή της μηχανής.

Τα σφάλματα στο σύνολο τους έχουν ως κοινή συνέπεια την δημιουργία ασυμμετρίας στο μαγνητικό πεδίο. Αυτή η παραμόρφωση του μαγνητικού πεδίου κληρονομείται στα ηλεκτρικά, μαγνητικά και μηχανικά μεγέθη την μηχανής. Πάνω σε αυτό πατάνε οι περισσότερες διαγνωστικές μέθοδοι, αναζητώντας υπογραφές αρμονικών, στα φάσματα των μεγεθών, που προδίδουν την ύπαρξη συγκεκριμένου σφάλματος και οδηγούν στην ταυτοποίησή του.

3.1 Motor Current Signature Analysis

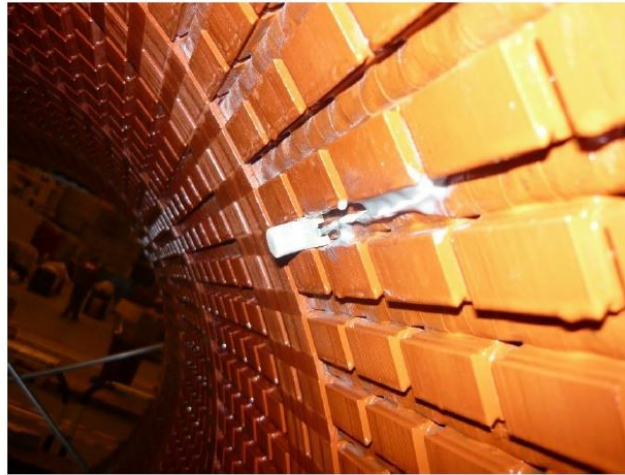
Βασική μέθοδο εύρεση σφαλμάτων αποτελεί η παρακολούθηση του ρεύματος του στάτη MCSA. Η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή σε σφάλματα δρομέα [36] και στάτη [35]. Η εφαρμογή της είναι πολύ απλή διότι έχουμε πάντα πρόσβαση στις γραμμές μεταξύ της πηγής και του κινητήρα και έχει μικρό κόστος διότι το μόνο που απαιτείται είναι καταγραφή του σήματος του ρεύματος χρησιμοποιώντας απλά όργανα (αμπεροτσιμπίδα). Στην συνέχεια το σήμα αναλύεται κατάλληλα στην μόνιμη κατάσταση και εξάγεται το φάσμα του (Fast Fourier Transform). Σε αυτό αναζητώντας υπογραφές σε συγκεκριμένες συχνότητες μπορεί να αναγνωριστεί η ύπαρξη και ο τύπος σφάλματος. Παρομοίως το σήμα μπορεί να αναλυθεί στην δυναμική του κατάσταση (Short Time Fourier Transform) όταν η εφαρμογή της μηχανής που εξετάζεται δεν επιτρέπει συνεχή λειτουργία στην μόνιμη κατάσταση. Το φασματογράφημα που προκύπτει μπορεί πάλι να υποδηλώσει σφάλματα.



Εικόνα 3.1 Διάγνωση στατικής εκκεντρότητας με την χρήση MCSA σε χαμηλές και ψηλές συχνότητες, για διάφορα μεγέθη σφάλματος [7].

3.2 Flux Monitoring

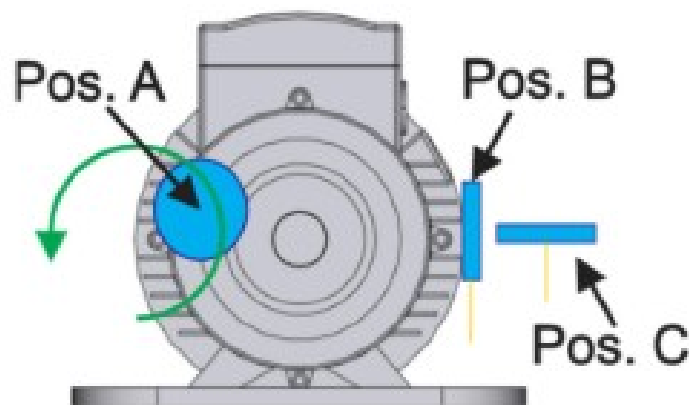
Ακολουθώντας την ίδια ανάλυση, διάγνωση σφαλμάτων πραγματοποιείται με την παρακολούθηση της μαγνητικής ροής. Συγκεκριμένα στην πράξη μπορούμε να μετρήσουμε δύο ειδών μαγνητικές ροές. Η μία είναι η ροή διακένου που εφαρμόζεται στις μεγάλες μηχανές και απαιτεί την τοποθέτηση αισθητήρα στο διάκενο εντός της μηχανής γεγονός που προσδίδει στην μέθοδο μεγάλη ευαισθησία στον εντοπισμό σφαλμάτων, τεράστια αξιοπιστία αλλά απαιτεί την αποσυναρμολόγηση της πράγμα που αυξάνει το κόστος.



Flux Sensor Glued on the Wedge

Εικόνα 3.2 Αισθητήρας Μαγνητικής Ροής στο εσωτερικό του διακένου [8].

Συνηθέστερα μετράται και αναλύεται η λεγόμενη stray flux με την χρήση αισθητήρων πάνω και εξωτερικά της μηχανής. Ανάλογα με τον προσανατολισμό του αισθητήρα κατά την τοποθέτηση του μπορούμε να μετρήσουμε, την αξονική μαγνητική ροή, την ακτινική μαγνητική ροή ή και τα δύο.

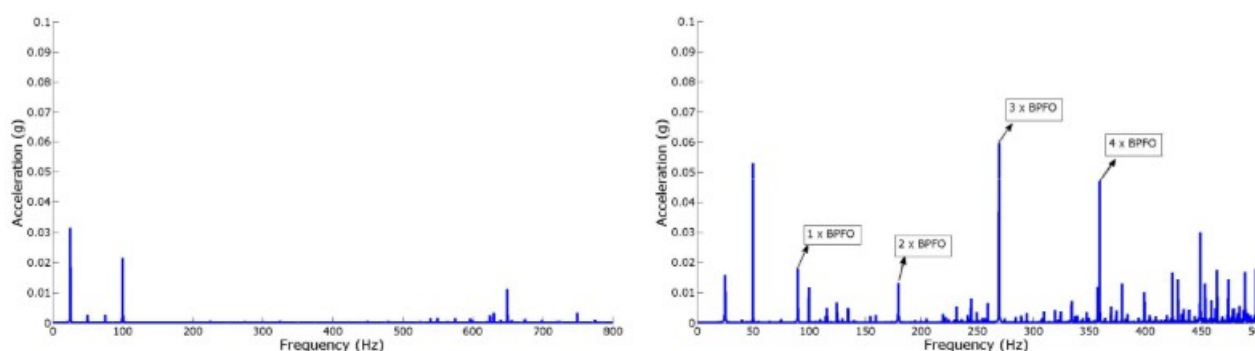


Εικόνα 3.3 Τοποθέτηση αισθητήρων μαγνητικής ροής. Με την θέση A μετράται η αξονική stray flux, με τη C η ακτινική και με B και οι δύο μαζί [9].

Οι αισθητήρες δεν έχουν μεγάλο κόστος καθιστώντας την μέθοδο συνολικά φτηνή ενώ ακόμη, κρίνεται πιο αξιόπιστη του ρεύματος καθώς είναι ανθεκτικότερη του σε καταστάσεις που μπορεί να οδηγήσουν σε εσφαλμένη διάγνωση [10].

3.3 Vibration Monitoring

Για την ανίχνευση μηχανικών σφαλμάτων προκρίνεται η παρακολούθηση και ανάλυση των δονήσεων της μηχανής [11]. Όμοια με τα παραπάνω τοποθετούνται πάνω στην μηχανή αισθητήρες και το σήμα που αντλείται αναλύεται ως προς το φάσμα του. Εκεί αναζητούνται πάλι αρμονικές σε συγκεκριμένες συχνότητες που υποδηλώνουν μηχανικό σφάλμα (πχ. ρουλεμάν υπό κλίση).



Εικόνα 3.4 Φάσμα δονήσεων για υγιή μηχανή και μηχανή με σφάλμα ρουλεμάν [11].

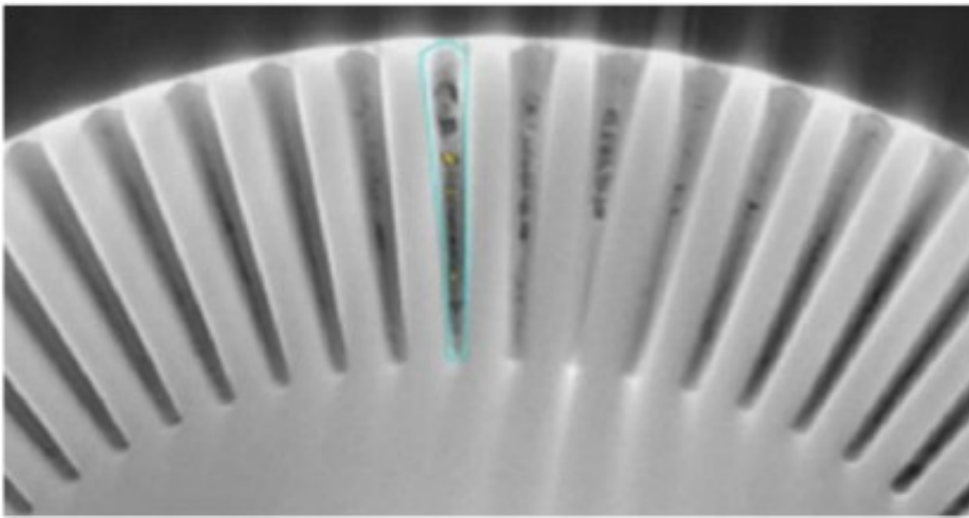
Άλλες μέθοδοι που δεν βρίσκουν τόσο χρήση είναι επιγραμματικά οι παρακάτω:

1. Παρακολούθηση Ροπής [6]. Βρίσκει εφαρμογή μόνο πειραματικά διότι στην πράξη δεν μπορείς να μετρήσεις την ροπή παρά μόνο να την εκτιμήσεις.
2. Παρακολούθηση Ισχύος [37].
3. Παρακολούθηση Ταχύτητας [38].
4. Παρακολούθηση Ακουστικού Θορύβου [39]. Αξιόπιστη μονάχα σε περιπτώσεις που η μηχανή βρίσκεται σε περιβάλλον χωρίς άλλους έντονους εξωγενείς θορύβους.
5. Παρακολούθηση Θερμοκρασίας [40]. Συμπληρωματική μέθοδος με χαμηλή ευαισθησία και χρήσιμη μόνο ενάντια στα μηχανικά σφάλματα.

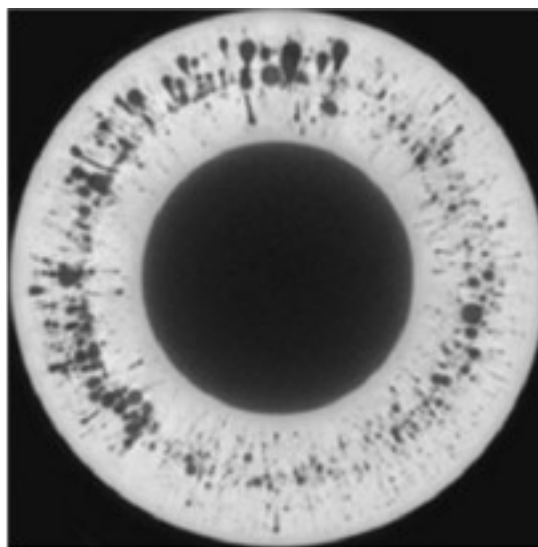
4. ΤΟ ΣΦΑΛΜΑ ΤΗΣ ΣΠΑΣΜΕΝΗΣ ΜΠΑΡΑΣ ΔΡΟΜΕΑ

4.1 Κατασκευαστικοί Λόγοι Εμφάνισης Σφάλματος

Στις μηχανές επαγωγικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου κλωβού με μπάρες αλουμινίου, οι μπάρες κατασκευάζονται με χύτευση αλουμινίου στις αυλακώσεις του δρομέα. Κατά την χύτευση του αλουμινίου δημιουργούνται φυσαλίδες αέρα φαινόμενο που ονομάζεται πορότητα. Η πορότητα συμβαίνει συνήθως λόγω της συρρίκνωσης του αλουμινίου κατά την σκλήρυνση του αλλά μπορεί να εμφανιστεί και σε περιπτώσεις, όπου έχουμε ανεπαρκή όγκο αλουμινίου, ή ένα μέρος του χαθεί, κατά την διαδικασία της χύτευσης. Μπορεί να κάνει την εμφάνιση της είτε στις μπάρες του δρομέα είτε στα δαχτυλίδια που τις συνενώνουν.



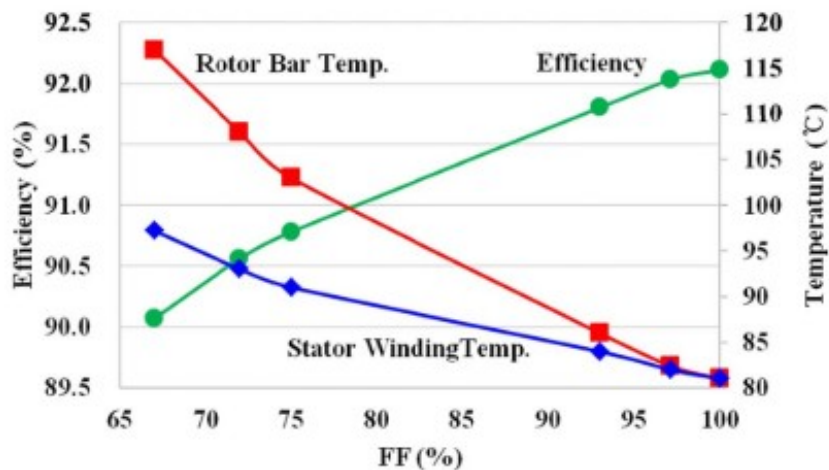
Εικόνα 4.1 Ακτινογραφία μπαρών δρομέα στην αξονική κατεύθυνση [3].



Εικόνα 4.2 Ακτινογραφία δαχτυλιδιού κοντά στον σιδηροπυρήνα του δρομέα [3].

Η πορότητα [4] έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης στο σημείο εκείνο γεγονός το οποίο θα οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας σε αυτό. Στο πέρας του χρόνου αυτή η τοπική αύξηση της θερμοκρασίας ενδέχεται να οδηγήσει σε σπάσιμο της μπάρας. Μία ακόμη παρενέργεια της πορότητας είναι πως δημιουργεί άγνωστη ηλεκτρική ασυμμετρία των φάσεων του κυκλώματος του δρομέα. Αφού δυστυχώς η πορότητα δεν μπορεί να αποφευχθεί έχει θεσπιστεί αποδεκτό επίπεδο πορότητας (fill factor), με βάση την πληρότητα σε όγκο του αλουμινίου στις αύλακες του σιδηροπυρήνα του δρομέα, το 95%. Έρευνα έχει δείξει πως πτώση του fill factor συνεπάγεται με πτώση της ταχύτητας που σημαίνει μεγαλύτερα ρεύματα σε στάτη και δρομέα που με τη σειρά τους οδηγούν αυξημένες απώλειες Joule άρα συνολικά μειωμένη απόδοση της μηχανής. Παράλληλα παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας στις μπάρες του δρομέα αλλά και στο τύλιγμα του στάτη που επιταχύνει την γήρανση αυτών των τμημάτων του κινητήρα.

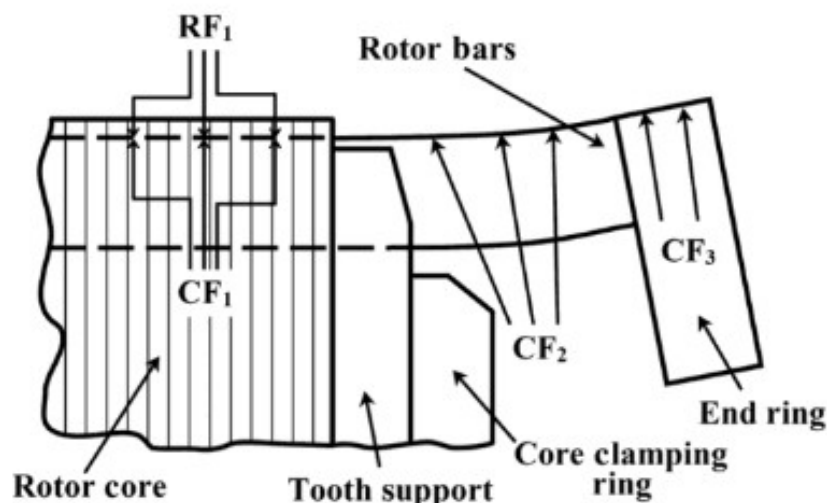
FF (%)		67	72	75	93	97	100
Speed (rpm)		866.8	871.0	873.4	881.5	882.8	883.2
Current (A)		28.42	28.37	28.18	27.96	27.68	27.65
Loss (kW)	Stator	0.762	0.749	0.736	0.710	0.692	0.688
	Rotor	0.577	0.505	0.454	0.317	0.294	0.287
Efficiency (%)		90.07	90.56	90.78	91.80	92.03	92.11
Temp. (°C)	Stator	97	93	91	84	82	81
	Rotor	117	108	103	86	82	81



Εικόνα 4.3 Σχέση μεταξύ Fill Factor και διαφόρων μεγεθών του κινητήρα [4].

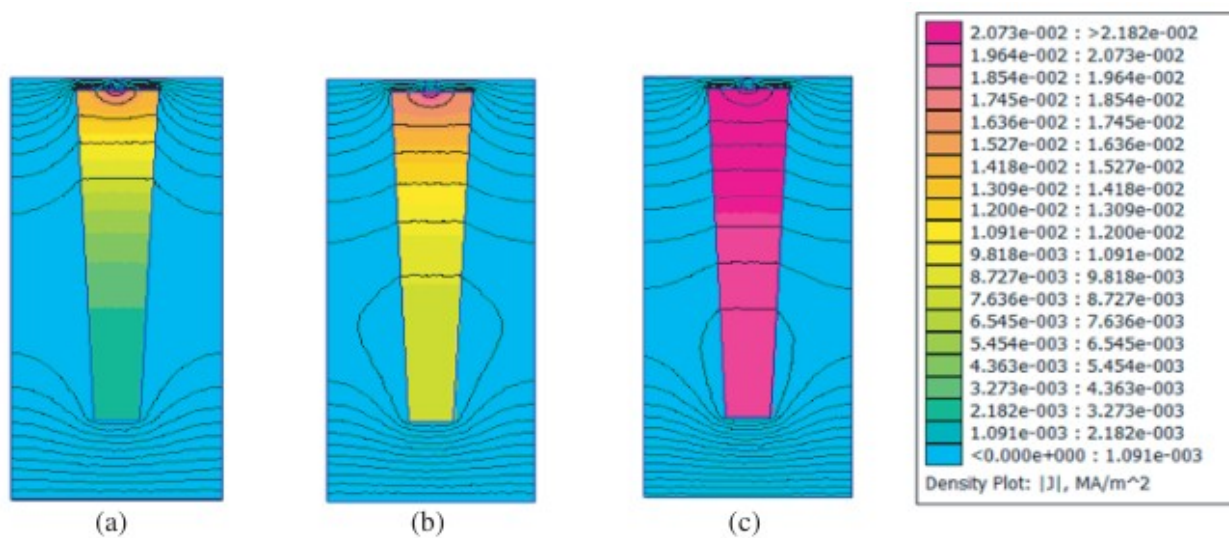
4.2 Παράγοντες Γήρανσης Κινητήρα

Οι δρομέας όπως και κάθε κινούμενο σύστημα υποβάλλεται σε μηχανικές καταπονήσεις [32]. Συγκεκριμένα, στις μπάρες και τα δαχτυλίδια του δρομέα ασκούνται φυγόκεντρες δυνάμεις καθώς και δυνάμεις από κομμάτια του σιδηροπυρήνα του δρομέα πάνω από τις μπάρες. Οι τελευταίες, σύμφωνα με τον 3ο νόμο του Νεύτωνα είναι δυνάμεις αντίδρασης και κρατούν τις μπάρες στην θέση τους μέσα στις αυλακώσεις. Για τις φυγόκεντρες δυνάμεις ισχύει ο τύπος: $F_c = m \cdot \omega^2 \cdot r$ όπου m η μάζα του σώματος, r η ακτίνα του και ω η γωνιακή του ταχύτητα. Γίνεται επομένως αντιληπτό πως αυτές οι δυνάμεις είναι ανάλογες του τετραγώνου της ταχύτητας του δρομέα επομένως φτάνουν στο μέγιστο τους όταν ο κινητήρας βρίσκεται στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Ακόμη έχουν μεγαλύτερο μέγεθος για μηχανές με χαλκόμπαρας, σε σχέση με αυτές του αλουμινίου, αφού ο χαλκός έχει μεγαλύτερη μάζα. Η καταπόνηση από τις φυγόκεντρες δυνάμεις είναι μεγαλύτερη στα κομμάτια των μπαρών (αν αυτά υπάρχουν) εξωτερικά του πυρήνα καθώς και στα δαχτυλίδια καθώς αυτά τα μέρη δεν συγκρατούνται από αυτόν.

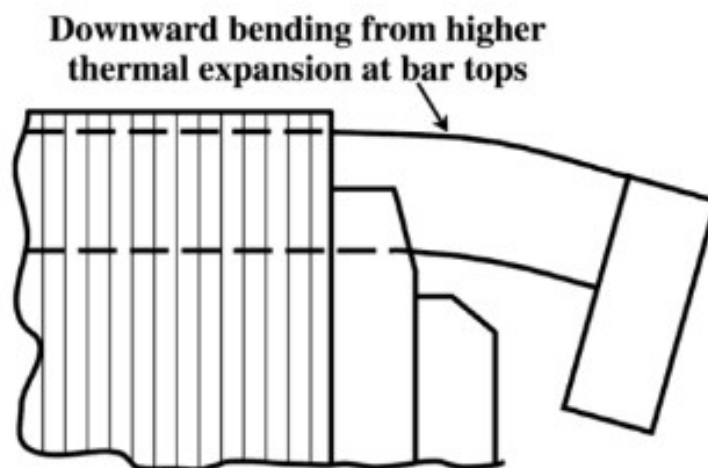


Εικόνα 4.4 Δυνάμεις που ασκούνται σε δρομέα κλωβού, όπου CF οι φυγόκεντρες δυνάμεις και RF δυνάμεις αντίδρασης. Στους κινητήρες με κατασκευή μπαρών μέσω χύτευσης η CF_2 παραλείπεται καθώς οι μπάρες δεν προεξέχουν του σώματος του πυρήνα [32].

Στον δρομέα του επαγωγικού κινητήρα επικρατούν παράλληλα και θερμικές καταπονήσεις [32]. Το ρεύμα του κατά την εκκίνηση μπορεί να προσεγγίσει μέχρι και 5 φορές το μέτρο του ρεύματος μόνιμης κατάστασης προκαλώντας αύξηση της θερμοκρασίας στο σύνολο της μηχανής. Έτσι όσο περισσότερο χρόνο απαιτεί για να φτάσει σε κατάσταση μη μόνιμης λειτουργίας τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμική καταπόνηση του. Επειδή στον δρομέα ρέει εναλλασσόμενο ρεύμα, στις μπάρες του κάνει την εμφάνιση του το επιδερμικό φαινόμενο. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα κατανέμεται ανομοιόμορφα εντός των μπαρών, με τρόπο που μεγιστοποιεί την πυκνότητα ρεύματος στην επιφάνεια τους αλλά την μειώνει στο βάθος του. Ως αποτέλεσμα, στην επιφάνεια της μπάρας θα έχουμε μεγαλύτερη ωμική αντίσταση άρα και θερμική καταπόνηση.

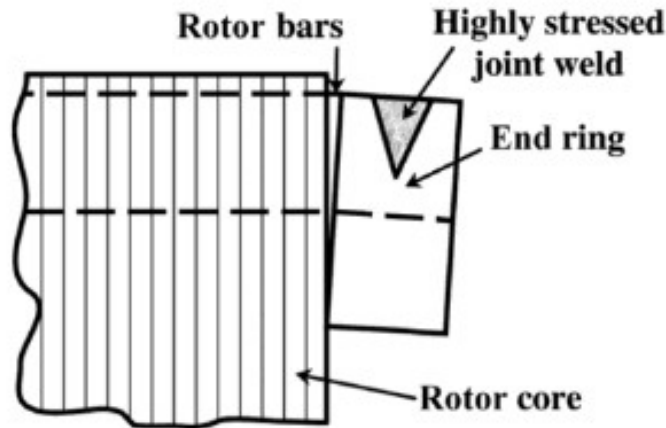


Εικόνα 4.5 Πυκνότητα ρεύματος και γραμμές μαγνητικού πεδίου για συχνότητα 50, 20, 5 Hz αντίστοιχα [5].



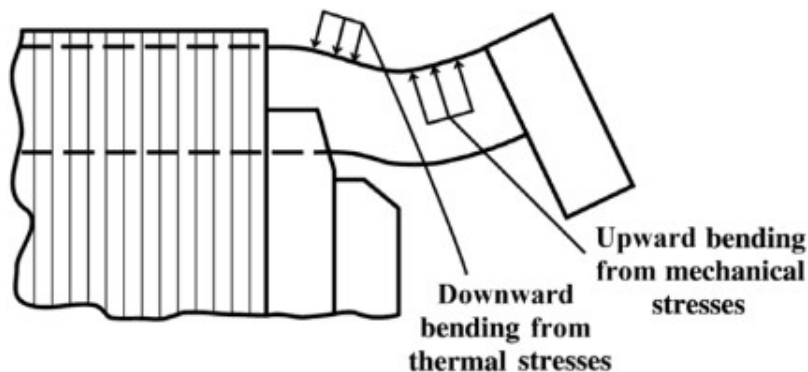
Εικόνα 4.6 Θερμική παραμόρφωση χαλκόμπαρας [32].

Φυσικά στην πραγματικότητα οι μηχανικές και θερμικές καταπονήσεις συνυπάρχουν. Ιδιαίτερα για την περίπτωση των κινητήρων βραχυκυκλωμένου κλωβού με μπάρες αλουμινίου, η ανομοιόμορφη κατανομή του ρεύματος ενδέχεται να δημιουργήσει παραμόρφωση του ανώτερου μέρους της μπάρας πράγμα που εντείνει την πίεση στην διασύνδεση της με τον δακτύλιο και την κάνει επιρρεπή σε σπασίματα.



Εικόνα 4.7 Παραμόρφωση μπάρας αλουμινίου λόγω θερμικής καταπόνησης του επιδερμικού φαινομένου [32].

Οι θερμικές-μηχανικές καταπονήσεις γίνονται ακόμη πιο επικίνδυνες για την υγεία της μηχανής όταν αυτή λειτουργεί με πολλές εκκινήσεις χωρίς ενδιάμεσα από αυτές να δίνεται ο απαραίτητος χρόνος για την ψύξη της.



Εικόνα 4.8 Παραμόρφωση μπάρας χαλκού λόγω θερμικής και μηχανικής καταπόνησης της [32].

Κατά την εκκίνηση του κινητήρα απαιτείται άεργος ισχύς η οποία παρέχεται από το δίκτυο πράγμα που οδηγεί σε πτώση τάσης του δικτύου. Αυτή η πτώση τάσης επηρεάζει άμεσα την ροπή, η οποία είναι ανάλογη του τετραγώνου της και έτσι καθυστερεί το ramp up του κινητήρα. Ως συνέπεια αυτός μένει περισσότερο χρόνο σε περιοχή λειτουργίας με υψηλό ρεύμα, πράγμα που σημαίνει έξτρα καταπόνηση και ταχύτερη γήρανση. Ίδιο αποτέλεσμα έχουμε και όταν το φορτίο της μηχανής είναι υψηλής αδράνειας. Τα παραπάνω γίνονται αντιληπτά από τις εξισώσεις:

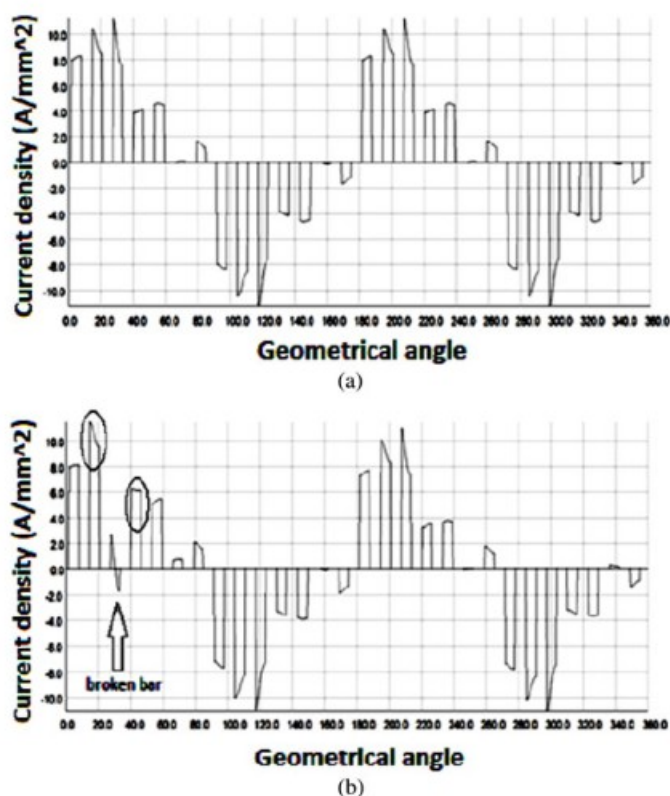
$$T_M = T_L + \frac{J \cdot d_\omega}{d_t} \quad (4.1) \quad T_A = T_M - T_L \quad ,$$

με T_A ροπή επιτάχυνσης, T_L ροπή φορτίου, T_M ροπή μηχανής, J αδράνεια.

Επιπλέον παράγοντες που μπορεί να συμβάλλουν στην γήρανση του δρομέα της μηχανής είναι οι ατελώς στερεωμένες μπάρες στα αυλάκια, η γεωμετρία των μπαρών και δακτυλίων καθώς και η παρουσία ταλαντωμένων μηχανικών φορτίων.

4.3 Επιπτώσεις Σφάλματος Σπασμένης Μπάρας

Οι επιπτώσεις που προκαλεί μια σπασμένη μπάρα σχετίζεται άμεσα από το μέγεθος της μηχανής. Όσο περισσότερες μπάρες δρομέα έχει ένας κινητήρας τόσο μικρότερος θα είναι ο αντίκτυπος άμα μία από αυτές σπάσει. Γενικότερα το συγκεκριμένο σφάλμα δεν επιφέρει ραγδαία γήρανση της μηχανής και αυτή μπορεί να συνεχίσει την λειτουργία της απρόσκοπτα χωρίς αυτό να γίνει αντιληπτό. Σε σπάνιες περιπτώσεις το σπάσιμο μιας μπάρας οδηγεί σε ακαριαία καταστροφή του κινητήρα, όταν αυτή κόψει τα τυλίγματα του στάτη. Όταν σπάσει μια μπάρα, οι γειτονικές της μπάρες εμφανίζουν μεγαλύτερη πυκνότητα ρεύματος. Αυτή η επιφόρτιση τους με επιπλέον ρεύμα αυξάνει την καταπόνηση τους και τις κατατάσσει υποψήφιες για να είναι οι επόμενες που θα σπάσουν διογκώνοντας το μέγεθος του σφάλματος [6].



Εικόνα 4.9 Κατανομή πυκνότητας ρεύματος πριν και μετά το σπάσιμο μπάρας [6].

Έχουμε αναφέρει ότι το σύνολο των σφαλμάτων δημιουργούν ασυμμετρίες στο μαγνητικό πεδίο της μηχανής. Αυτό φυσικά και ισχύει και για το σφάλμα σπασμένης μπάρας δρομέα. Υπό συνθήκες υγιούς λειτουργίας της μηχανής, έχουμε το μαγνητικό πεδίο του στάτη που περιστρέφεται με συχνότητα f_s και αυτό του δρομέα που περιστρέφεται με συχνότητα $f_r = sf_s$, ως προς τον εαυτό του. Όταν σπάσει μία μπάρα δημιουργείται ένα μαγνητικό

πεδίο ίδιο με αυτό του δρομέα και παράλληλα ένα πεδίο ίδιου μέτρου άλλα αντίθετης φοράς με αυτό $-sf_s$ [20]. Αυτό το αντίθετης φοράς πεδίο μεταφέρεται από τον άξονα που περιστρέφεται με συχνότητα $f_{mech}=(1-s)\cdot f_s$. (2.2)

Σαν αποτέλεσμα το μαγνητικό πεδίο σπασμένης μπάρας περιστρέφεται, ως προς έναν ακίνητο παρατηρητή (στάτη), με συχνότητα $f_{bb}=(1-2s)f_s$ (2.3). Έτσι το τύλιγμα του στάτη δεν μένει ανεπηρέαστο και δέχεται μια τάση εξ' επαγωγής συχνότητας f_{bb} . Η επαγομένη τάση θα παράξει ρεύμα ίσο με: $I_{bb}=I\cdot\cos[(1-2s)\cdot\omega_s\cdot t+\varphi_{Ibb}]$ (2.4). Αυτό το ρεύμα αλληλεπιδράει με το μαγνητικό πεδίο του στάτη, και ως αποτέλεσμα παράγεται μια ταλάντωση στην ροπή και στην ταχύτητα συχνότητας $2\cdot s\cdot fs$.

Έτσι η νέα συχνότητα περιστροφής του δρομέα είναι: $f_{mech}=(1-s)\cdot f_s+2\cdot s\cdot fs=(1+s)\cdot f_s$ (2.5). Αυτή η νέα συνιστώσα της ταχύτητας κουβαλάει το μαγνητικό πεδίο του δρομέα που ως προς ακίνητο παρατηρητή (στάτη) κινείται πλέον με συχνότητα: $f_r=s\cdot f_s+(1+s)\cdot f_s=(1+2\cdot s)\cdot f_s$.(2.6)

Αυτό το πεδίο επάγει εκ νέου τάση αυτής της συχνότητας στα τυλίγματα του στάτη. (Το φαινόμενο λόγω της ταλάντωσης των στροφών του δρομέα όπως περιγράφηκε παραπάνω επαναλαμβάνεται και επάγονται στον στάτη τάσεις συχνότητας που γενικεύεται ως $f_{bb}=(1+2\cdot k\cdot s)\cdot f_s$ (2.7).)

Οπότε καταλήγουμε με ένα ζευγάρι συχνοτήτων στο ρεύμα τους στάτη όπου η $(1-2\cdot s)\cdot f_s$ προκύπτει απευθείας από το σφάλμα ενώ η $(1+2\cdot s)\cdot f_s$ δευτερευόντως ως αποτέλεσμα της ταλάντωσης της ταχύτητας μηχανής (speed ripple effect), πράγμα που κάνει την καθιστά αναξιόπιστη διότι ο αντίκτυπος της επηρεάζεται από την αδράνεια του συστήματος.

5. ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΣΠΑΣΜΕΝΗΣ ΜΠΑΡΑΣ ΔΡΟΜΕΑ

Η αργή εξέλιξη, ως επί των πλείστων, των ηλεκτρικών σφαλμάτων δρομέα μας δίνουν την δυνατότητα να τα εντοπίσουμε πριν αυτά αποβούν καταστροφικά. Μετά από χρόνια έρευνας και ανάλυσης έχουν βρεθεί μερικοί κατάλληλοι μέθοδοι που εφαρμόζοντας τους με προσοχή μας επιτρέπουν να ανιχνεύσουμε έγκαιρα το σφάλμα, να προβούμε στις απαραίτητες ενέργειες για την αποκατάσταση του και να επαναφέρουμε την μηχανή σε υγιή κατάσταση.

5.1 Motor Current Signature Analysis

Βασικό εργαλείο στην αναζήτηση σφαλμάτων σπασμένης μπάρας δρομέα αποτελεί η μέθοδος μέτρησης και ανάλυσης του ρεύματος στάτη, Motor Current Signature Analysis (MCSA). Η MCSA είναι απλή και φτηνή στην εφαρμογή της αφού το μόνο που απαιτεί είναι η καταγραφή του ρεύματος με αμπεροτσιμπίδες, πραγματοποιείται χωρίς να διαταραχθεί η λειτουργία της μηχανής και αν αυτό απαιτείται ακόμη και χωρίς να έχουμε πρόσβαση σε αυτή [42].

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην καταγραφή του ρεύματος του στάτη και την ανάλυση του στην μόνιμη κατάσταση εφαρμόζοντας Fast Fourier Transform (FFT) και αντλώντας το φάσμα του, πάνω στο οποίο αναζητούνται και ταυτοποιούνται υπογραφές σε συγκεκριμένες συχνότητες που υποδηλώνουν την ύπαρξη σφάλματος.

Οι κύριες αυτές συχνότητες προκύπτουν γενικεύοντας την ηλεκτρομαγνητική ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου [19]. Συγκεκριμένα:

$$f_{bb} = (1 \pm 2 \cdot s \cdot k) \cdot f_s \quad (5.1).$$

όπου:

- s η ολίσθηση του κινητήρα,
- f_s η βασική συχνότητα του στάτη (1η αρμονική),
- k φυσικός αριθμός

Όπως έχει προαναφερθεί οι υπογραφές αριστερά της βασικής αρμονικής προκύπτουν άμεσα ως αποτέλεσμα του σφάλματος και είναι πιο ενδεικτικές ως προς την ύπαρξη του, σε αντίθεση με τις υπογραφές δεξιά της πρώτης αρμονικής που είναι αποτέλεσμα του speed ripple effect και του μέγεθος τους επηρεάζεται από την αδράνεια του συστήματος. Έχει αποδειχθεί εμπειρικά και έχει καθιερωθεί ότι το πλάτος των υπογραφών, κανονικοποιημένο ως προς το πλάτος της βασικής αρμονικής του ρεύματος, υποδηλώνει σφάλμα για τιμές μεγαλύτερες του -42db [41].

Συμπληρωματικά ο παρακάτω τύπος [18] χρησιμοποιείται στην εύρεση συχνοτήτων-υπογραφών γύρω από την 5η, 7η, 11η, κ.ο.κ, αρμονική του ρεύματος: $f_{bb2} = [6 \cdot (k \pm 1) \pm 2 \cdot m \cdot s] \cdot f_s$ (5.2).

Όταν έχουμε συνδεσμολογία τριγώνου και οι αρμονικές πολλαπλάσια της τρίτης δεν απαλείφονται ο τύπος παραπάνω γενικεύεται σε $f_{bb3} = [4 \cdot (k \pm 1) \pm 2 \cdot m \cdot s] \cdot f_s$ (5.3).

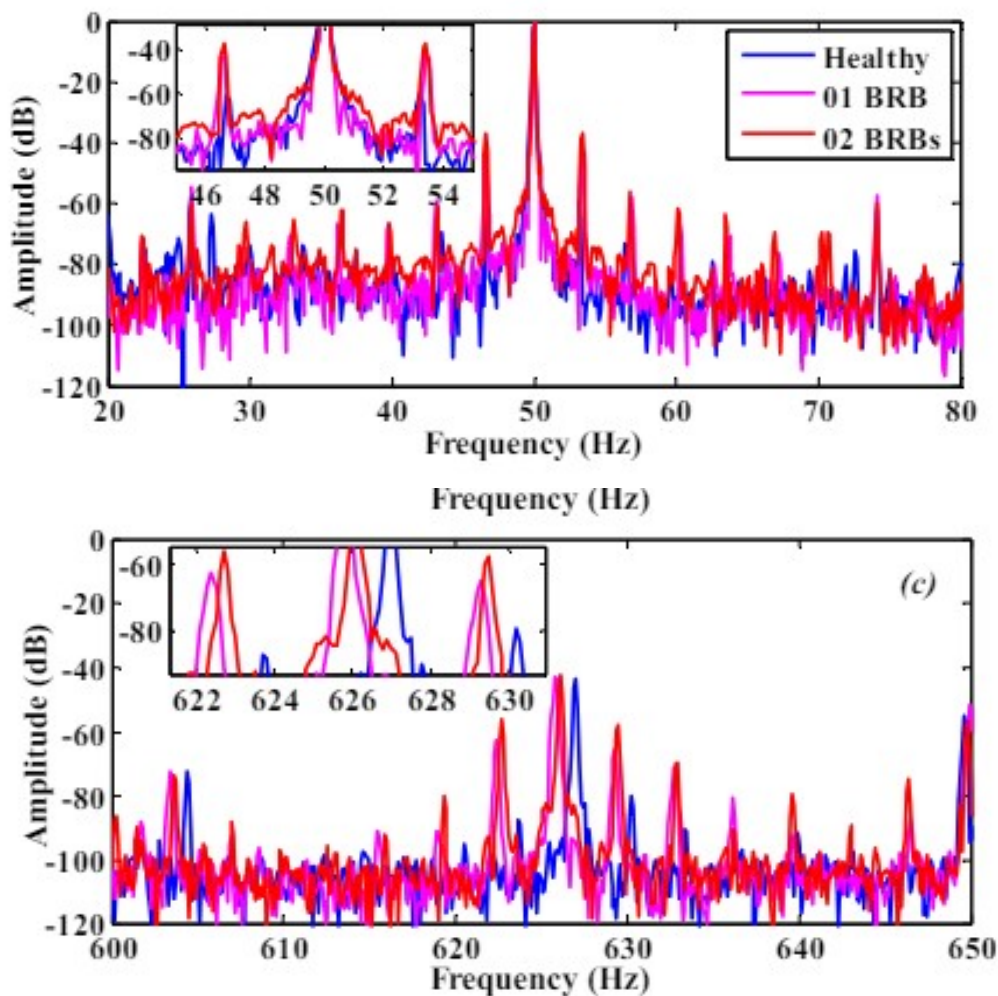
Επιπλέον η αδράνεια του φορτίου του κινητήρα επηρεάζει τις αρμονικές του ρεύματος που εντοπίζονται στις συχνότητες [19]:

$$f_{bb4} = \left[\frac{k}{p} \cdot (1-s) \pm s \right] \cdot f_s \quad (5.4).$$

με:

- p ζεύγη πόλων στάτη,
- s ολίσθηση του κινητήρα,
- f_s η βασική συχνότητα του στάτη (1η αρμονική),
- $\frac{k}{p}$ φυσικός αριθμός.

Αυτές οι μεγαλύτερες συχνότητες που θα προκύψουν έχουν αξία διότι υψηλότερη συχνότητα σημαίνει μεγαλύτερο επιδερμικό φαινόμενο στην επιφάνεια των μπαρών πράγμα που μεγεθύνει την ασυμμετρία του μαγνητικού πεδίου όταν επικρατεί σφάλμα σπασμένης μπάρας.



Εικόνα 5.1 Φάσμα ρεύματος στάτη κινητήρα σε υγιή κατάσταση (μπλε), με μία σπασμένη μπάρα (ροζ) και με δύο σπασμένες μπάρες (κόκκινο) σε χαμηλές και υψηλές συχνότητες [18].

Νεότερη έρευνα έχει αναδείξει περιπτώσεις κατά τις οποίες η χρήση της MCSA μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα. Αυτά μπορεί να είναι ψευδώς θετικά είτε ψευδώς αρνητικά με την δεύτερη περίπτωση να είναι σαφέστατα η πιο επικίνδυνη.

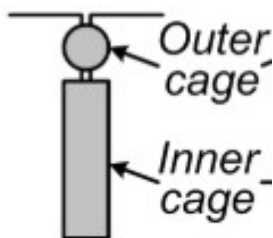
Ψευδώς θετικά αποτελέσματα, με την εμφάνιση υπογραφών στο φάσμα του ρεύματος ταυτόσημες με αυτές της σπασμένης μπάρας, μπορούμε να έχουμε στις εξής περιπτώσεις:

- όταν υπάρχουν ταλαντώσεις φορτίου στην ίδια συχνότητα που αναμέναμε να προκαλέσουν οι σπασμένες μπάρες [22].
- όταν ο δρομέας, σε μεγάλες μηχανές, έχει αξονικά λούκια εξαερισμού ίσα σε αριθμό με τους πόλους [23].
- όταν ο αριθμός των πτερυγίων της φτερωτής εξαερισμού είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του αριθμού των πόλων [28].
- όταν σίδηρος εμφανίζει μαγνητική ανισοτροπία λόγω της εσφαλμένης κατασκευής των ελασμάτων του. Αυτό δημιουργεί μαγνητική ασυμμετρία στον δρομέα που ομοιάζει με αυτή της σπασμένης μπάρας [24].

Το αποτέλεσμα μιας ψευδούς θετικής διάγνωσης παρότι ανεπιθύμητη θα έχει ως αποτέλεσμα μονάχα την απόσυρση του κινητήρα για λίγες μέρες έως ότου ανακαλυφθεί ότι δεν υφίσταται σφάλμα. Αντίθετα ψευδώς αρνητική διάγνωση σημαίνει πως το σφάλμα θα παραμείνει, η δυσλειτουργία και η καταπόνηση του κινητήρα θα συνεχιστεί και εν τέλει το σφάλμα θα επεκταθεί και σε άλλες μπάρες διογκώνοντας το πρόβλημα.

Ψευδώς αρνητικά αποτελέσματα μπορούμε να έχουμε στις εξής περιπτώσεις:

- όταν έχουμε δύο σπασμένες μπάρες σε απόσταση μισού πολικού βήματος μεταξύ του. Με τον όρο πολικό βήμα εννοούμε την απόσταση που καταλαμβάνουν οι αυλακώσεις ενός μαγνητικού πόλου του στάτη. Στην περίπτωση αυτή οι μαγνητικές ασυμμετρίες που προκαλούνται από τις σπασμένες μπάρες αλληλοαναιρούνται και το φάσμα του ρεύματος δεν εμφανίζει τις αναμενόμενες υπογραφές [25].
- όταν έχουμε σπάσιμο της εξωτερικής μπάρας του κινητήρα με δρομέα διπλού κλωβού (Class D). Στην περίπτωση αυτή η ασυμμετρία του μαγνητικού πεδίου είναι μικρή και έτσι οι υπογραφές του φάσματος έχουν μικρότερο πλάτος, κάτω από το θεσπισμένο όριο του -42db [21].



Εικόνα 5.2 Μπάρα δρομέα διπλού κλωβού class D.

- όταν έχουμε κάνει λάθος εκτίμηση της ταχύτητας και άρα της ολίσθησης της μηχανής
- όταν επιχειρούμε διάγνωση σε κινητήρα που εργάζεται υπό χαμηλό ή μηδενικό φορτίο. Αυτή η συνθήκη οδηγεί τον κινητήρα σε λειτουργία με ταχύτητα πολύ κοντά στην σύγχρονη πράγμα που σημαίνει σχεδόν μηδενική ολίσθηση. Έτσι πρακτικά οι υπογραφές που περιμέναμε να δούμε γύρω από την βασική αρμονική “κρύβονται” πίσω από αυτήν και δεν γίνονται αντιληπτές [18].

5.2 Vibration Monitoring

Μια δεύτερη μέθοδος διάγνωσης ηλεκτρικών σφαλμάτων δρομέα είναι αυτή της παρακολούθησης και ανάλυσης των δονήσεων. Για την εξαγωγή του σήματος των δονήσεων του κινητήρα, εγκαθίσταται εξωτερικά στην μηχανή επιταχυνσιόμετρο. Το σήμα στην συνέχεια αναλύεται στο πεδίο της συχνότητας μέσω του FFT. Οι συχνότητες που εμφανίζουν υπογραφές σφάλματος σε αυτή τη μέθοδο προκύπτουν από τον τύπο:

$$f_{bb}=2 \cdot k \cdot s \cdot f_s \quad (5.5)$$

όπου:

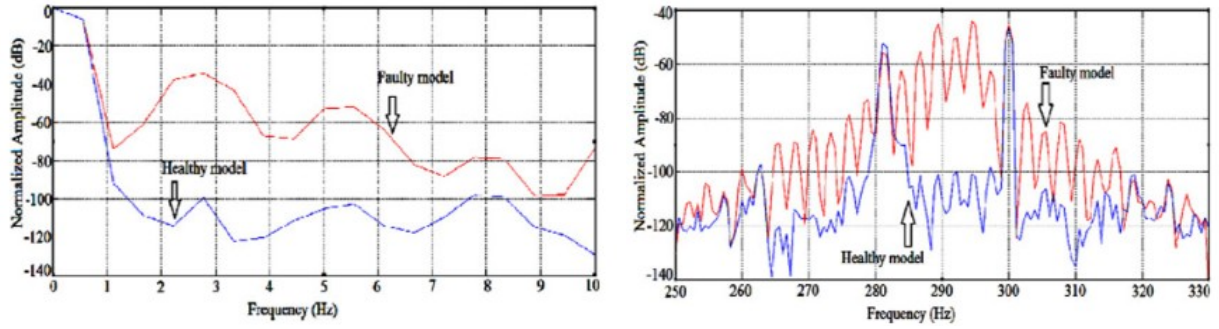
- s η ολίσθηση του κινητήρα,
- f_s η βασική συχνότητα του στάτη (1η αρμονική),
- k φυσικός αριθμός

5.3 Torque Monitoring

Στις ίδιες συχνότητες εμφανίζονται υπογραφές και κατά την διάγνωση με την χρησιμοποίηση της ροπής [26]. Επιπλέον των παραπάνω συχνοτήτων σφάλματα μπαρών εμφανίζουν υπογραφές σε συχνότητες γύρω και κυρίως πριν από τα 300Hz. Στα 300Hz έχουμε, ανεξαρτήτως παρουσίας σφάλματος, αρμονική λόγω της αλληλεπίδρασης αρμονικών στάτη και δρομέα. Το έντονο αρμονικό περιεχόμενο που παρουσιάζεται με το σφάλμα βρίσκεται σε συχνότητες [6] που μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$f_{bb}=300 \pm 2 \cdot k \cdot s \cdot f_s \quad (5.6).$$

Η διάγνωση γύρω από αυτές τις συχνότητες προκρίνεται διότι δεν επηρεάζεται από την ταχύτητα και κατά συνέπεια από την ολίσθηση της μηχανής ενώ το εύρος των συχνοτήτων κάνουν την διάγνωση πιο εύκολη.



Εικόνα 5.3 Φάσμα ροπής κινητήρα σε υγιή κατάσταση (μπλε) και με σπασμένη μπάρα (κόκκινο) για χαμηλές και υψηλές συχνότητες.

Στην πραγματικότητα όμως, σε αντίθεση με τις δονήσεις, η εξαγωγή του σήματος προς ανάλυση της ροπής δεν ενδείκνυται διότι η τοποθέτηση στην μηχανή ροτόμετρου είναι ταυτόχρονα κοστοβόρα καθώς και μη πρακτική. Ως αντιμετώπιση αυτού προκρίνεται η εκτίμηση της ροπής χρησιμοποιώντας μετρήσεις ρεύματος και τάσης [31].

Για την εκτίμηση του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ροπής ξεκινάμε παίρνοντας τις τάσεις και τα ρεύματα του στάτη και μετασχηματίζοντας τα στους άξονες d και q:

$$v_{sd} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left[v_a - \frac{1}{2} \cdot v_b - \frac{1}{2} \cdot v_c \right] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left[\frac{2 \cdot v_{ab} + v_{bc}}{2} \right] \quad (5.7)$$

$$v_{sd} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot v_b - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot v_c \right] = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot v_{bc} \quad (5.8)$$

$$i_{sd} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left[i_a - \frac{1}{2} \cdot i_b - \frac{1}{2} \cdot i_c \right] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left[\frac{2 \cdot i_{ab} + i_{bc}}{2} \right] \quad (5.9)$$

$$i_{sd} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_b - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_c \right] = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot i_{bc} \quad (5.10)$$

όπου:

- v_a, v_b, v_c , φασικές τάσεις.
- v_{ab}, v_{bc} , τάσεις γραμμής.
- i_a, i_b, i_c , φασικά ρεύματα.
- i_{ab}, i_{bc} , ρεύματα γραμμής.

Στην συνέχεια κάνουμε το ίδιο για την μαγνητική ροή του στάτη, του διακένου και του δρομέα αντίστοιχα:

$$\lambda_{sd} = \int (v_{sd} - R_s \cdot i_{sd}) dt \quad (5.11)$$

$$\lambda_{sq} = \int (v_{sq} - R_s \cdot i_{sq}) dt \quad (5.12)$$

$$\lambda_{md} = \lambda_{sd} - L_{ss} \cdot i_{sd} = L_m \cdot (i_{sd} + i_{rd}) \quad (5.13)$$

$$\lambda_{mq} = \lambda_{sq} - L_{ss} \cdot i_{sq} = L_m \cdot (i_{sq} + i_{rq}) \quad (5.14)$$

$$\lambda_{rd} = L_m \cdot i_{sd} + L_r \cdot i_{rd} \quad (5.15)$$

$$\lambda_{rq} = L_m \cdot i_{sq} + L_r \cdot i_{rq} \quad (5.16)$$

όπου:

- R_s αντίσταση του στάτη.
- L_{ss} μαγνητική σκέδαση στάτη.
- L_m μαγνητική επαγωγή.
- L_r μαγνητική αυτεπαγωγή δρομέα.
- i_{rd}, i_{rq} ρεύμα δρομέα στον άξονα d,q, αντίστοιχα.

Το ρεύμα του δρομέα δεν είναι άμεσα μετρήσιμο με κάποιο όργανο οπότε εναλλακτικά για την μαγνητική ροή του δρομέα έχουμε:

$$\lambda_{rd} = \frac{L_r}{L_m} \cdot (\lambda_{sd} - \sigma \cdot L_s \cdot i_{sd}) \quad (5.17)$$

$$\lambda_{rq} = \frac{L_r}{L_m} \cdot (\lambda_{sq} - \sigma \cdot L_s \cdot i_{sq}) \quad (5.18)$$

όπου:

- L_s μαγνητική αυτεπαγωγή στάτη.
- $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r}$.

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή της ισούται με:

$$T_{em} = \frac{p \cdot L_m}{L_r} \cdot (\lambda_{rd} \cdot i_{sq} - \lambda_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (5.19)$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις βλέπουμε ότι η ηλεκτρομαγνητική ροπή μπορεί έμμεσα να εκφραστεί συναρτήσει των ρευμάτων και τάσεων του στάτη κάνοντας τον υπολογισμό της δυνατό.

5.4 Flux Monitoring

Εναλλακτική μέθοδο διάγνωση σφάλματος σπασμένης μπάρας στον δρομέα αποτελεί η μέτρηση και ανάλυση της stray flux με την χρήση αισθητήρων πάνω και εξωτερικά της μηχανής. Στην stray flux οι μαγνητικές γραμμές του πεδίου εξέρχονται από τον πυρήνα του στάτη αλλά σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να συγχέεται με την σκέδαση καθώς αποτελεί μέρος του χρήσιμου μαγνητικού πεδίου.

Η εκτέλεση της μεθόδου ακολουθεί τα ίδια βήματα με αυτά των προηγούμενων, με την μέτρηση της ροής στην μόνιμη κατάσταση να ακολουθείτε από ανάλυση του φάσματος του σήματος μέσω μετασχηματισμού Fourier (FFT) και αναζήτηση υπογραφών σε αυτό. Μάλιστα επειδή η μαγνητική ροή είναι επί της ουσίας παραγόμενη από το ρεύμα αυτά μοιράζονται χαρακτηριστικά. Έτσι οι συχνότητες ενδιαφέροντος στις οποίες αναμένουμε να εμφανιστούν αρμονικές, όταν υπάρχει σφάλμα, είναι κοινές και δίνονται από τους τύπους:

$$f_{bb} = (1 \pm 2 \cdot s \cdot k) \cdot f_s ,$$

όπου:

- s η ολίσθηση του κινητήρα,
- f_s η βασική συχνότητα του στάτη (1η αρμονική),
- k φυσικός αριθμός

και,

$$f_{bb2} = [\frac{k}{p} \cdot (1-s) \pm s] \cdot f_s$$

με:

- p ζεύγη πόλων στάτη,
 - s ολίσθηση του κινητήρα,
 - f_s η βασική συχνότητα του στάτη (1η αρμονική),
- $\frac{k}{p}$ φυσικός αριθμός.

Συμπληρωματικά πρόσφατη έρευνα έχει αναδείξει νέες συχνότητες υπογραφών σχετικές με την μηχανική ταχύτητα του δρομέα [27] και προκύπτουν από τον τύπο:

$$f_{bb3} = [n \pm m \cdot \frac{(1-s)}{p}] \cdot f_s \quad (5.20).$$

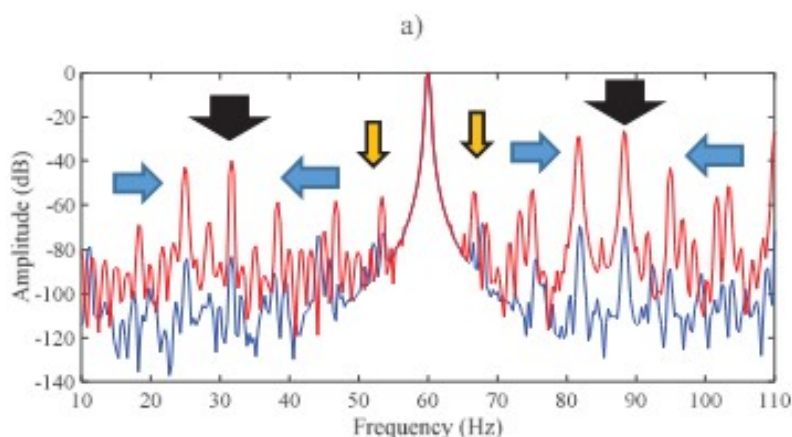
με:

- p ζεύγη πόλων στάτη,
- s ολίσθηση του κινητήρα,
- f_s η βασική συχνότητα του στάτη (1η αρμονική),
- n περιττός φυσικός αριθμός,
- m φυσικός αριθμός

Πρόσθετες υπογραφές, εμφανιζόμενες πλευρικά των παραπάνω [27] υπολογίζονται με τον τύπο:

$$f_{bb4} = [n \pm m \cdot \frac{(1-s)}{p} + 2 \cdot k \cdot s] \cdot f_s \quad (5.21), \text{ με } k \text{ φυσικό αριθμό.}$$

Η παρακολούθηση της stray flux μοιράζεται σχεδόν το σύνολο των πλεονεκτημάτων της MCSA. Υστερεί μονάχα στην ανάγκη πρόσβασης στην μηχανή για την τοποθέτηση του αισθητήρα. Συγκρίνοντας τις δύο διαγνωστικές μεθόδους περαιτέρω, η πρώτη υπερτερεί σημαντικά λόγω των εξτρά αρμονικών που προκύπτουν εξαιτίας της μηχανικής ταχύτητας. Ταυτόχρονα η χρήση της οδηγεί σε ασφαλέστερα συμπεράσματα διότι δεν επηρεάζεται από περιπτώσεις που οδηγούν σε εσφαλμένη διάγνωση που πηγάζουν είτε από την γεωμετρία της μηχανής, είτε από την θέση των σπασμένων μπαρών [10], [27].



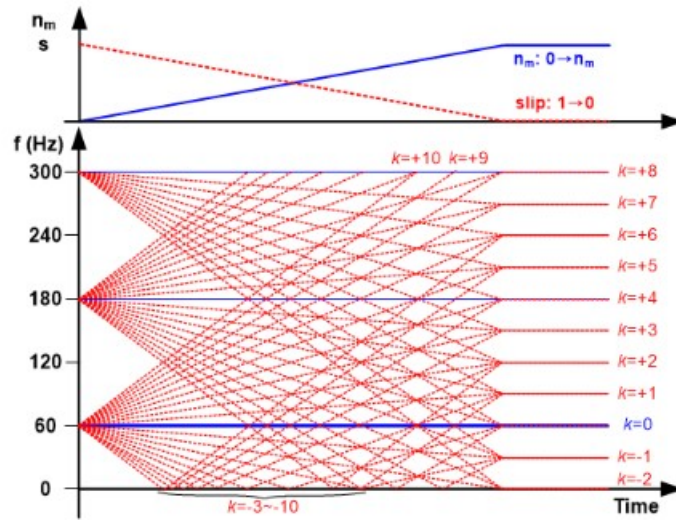
Εικόνα 5.4 Φάσμα μαγνητικής ροής κινητήρα σε υγιά κατάσταση (μπλε) και με σπασμένη μπάρα (κόκκινο).

5.5 Παρακολούθηση Μεγεθών κατά την εκκίνηση

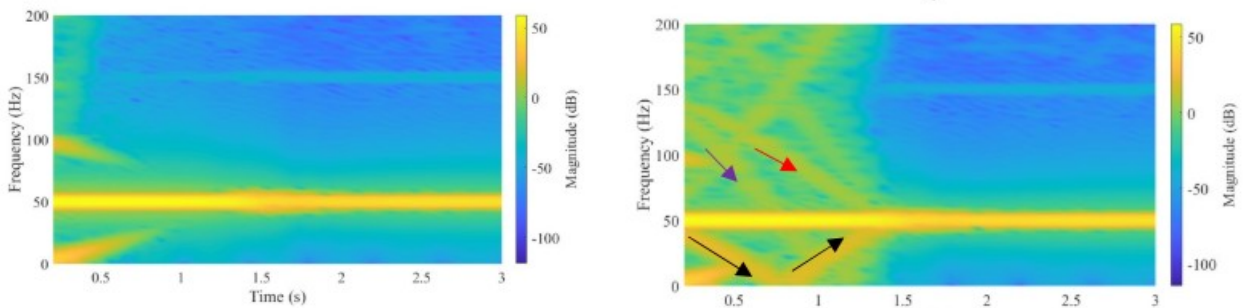
Μέχρι στιγμής έχουμε επικεντρωθεί στην εύρεση σφάλματος αναλύοντας διάφορα μεγέθη της μηχανής στην μόνιμη κατάσταση. Όμως η παρακολούθηση κατά την εκκίνηση, δηλαδή στην δυναμική κατάσταση είναι εξίσου πολύτιμη. Το ρεύμα του δρομέα παίρνει την μέγιστη τιμή του κατά την εκκίνηση ενώ παράλληλα στην εκκίνηση μεγιστοποιείται και η συχνότητα των μεγεθών του η οποία είναι ανάλογη της ολίσθησης [29]. $f_r = s \cdot f_s$. Έχοντας αυξημένη συχνότητα ενισχύεται το επιδερμικό φαινόμενο. Έτσι ο συνδυασμός υψηλού ρεύματος μαζί με μετατόπιση της πυκνότητας του προς την επιφάνεια των μπαρών μεγαλοποιεί τις συνέπειες του σφάλματος. Αυτό καθιστά την παρακολούθηση της εκκίνησης σημαντική.

Για να το πετύχουμε αυτό χρησιμοποιούμε τρισδιάστατα φασματογραφήματα που απεικονίζουν την εξέλιξη των εξεταζόμενων μεγεθών στο χρόνο, στη συχνότητα αλλά και ως προς το πλάτος. Για να εξάγουμε τα φασματογραφήματα χρησιμοποιούμε Short Time Fourier Transform στα σήματα. Επειδή η ανάλυση γίνεται κατά την εκκίνηση όπου η ταχύτητα μεταβάλλεται, σφάλματα που εξαρτώνται από αυτή, όπως αυτό της σφάλμα σπασμένη μπάρας, εμφανίζονται ως αποτέλεσμα τροχιές που εύκολα μπορούν να ταυτοποιηθούν και να οδηγήσουν σε επιτυχή διάγνωση. Ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι η αδυναμία της χρήσης της σε μηχανές με πολύ γρήγορη εκκίνηση [29].

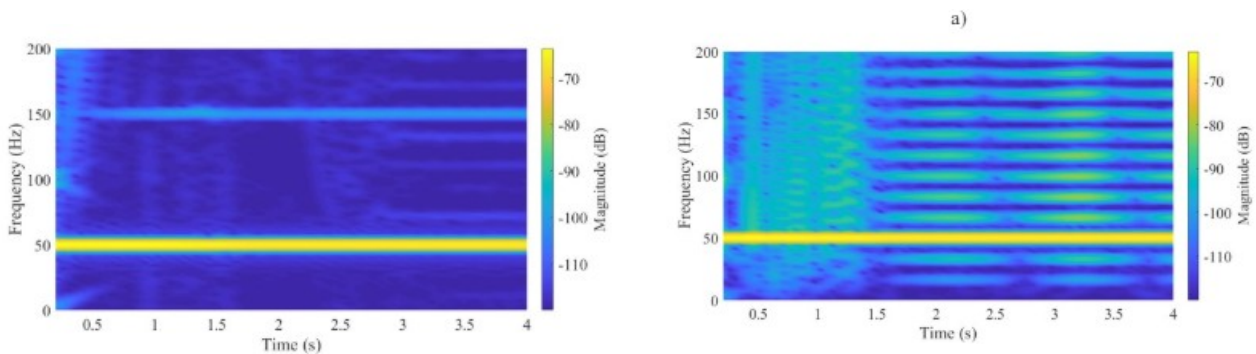
Υπογραφές κατά την εκκίνηση, σε μηχανές που παρουσιάζουν σφάλμα σπασμένης μπάρας, μπορούμε να εντοπίσουμε στο φασματογράφημα είτε του ρεύματος στάτη είτε της ροπής είτε φυσικά και της stray flux. Για την τελευταία μάλιστα μπορούμε να εξάγουμε τις τροχιές που εμφανίζονται σύμφωνα με τον τύπο $f_{rrf} = k_{odd} \cdot f_s \pm k \cdot f_r$, όπου f_s η συχνότητα της πηγής, f_r η συχνότητα του δρομέα και k_{odd} θετικός μονός ακέραιος [30].



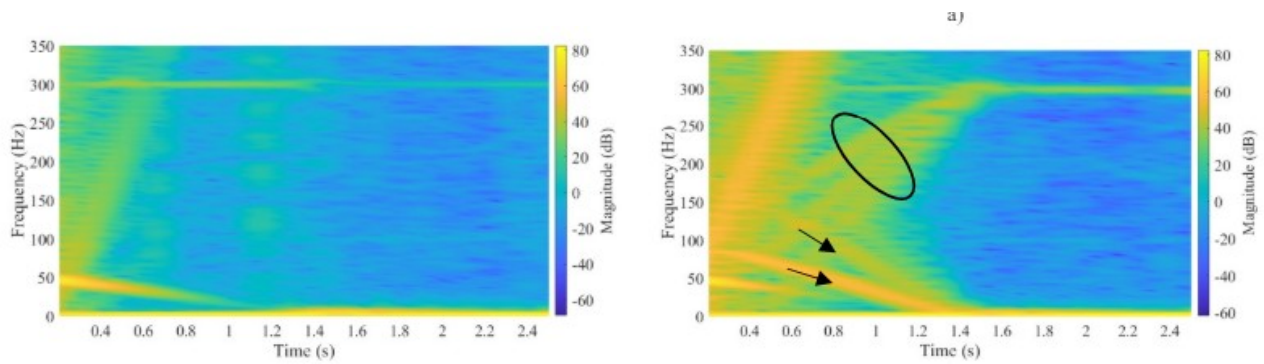
Εικόνα 5.5 Αναπαράσταση των f_{rrf} συχνοτήτων κατά την μετάβαση από την εκκίνηση προς την μόνιμη κατάσταση



Εικόνα 5.6 Φασματογράφημα ρεύματος στάτη υγιούς κινητήρα και με μία σπασμένη μπάρα [29].



Εικόνα 5.7 Φασματογράφημα μαγνητικής ροής υγιούς κινητήρα και με μία σπασμένη μπάρα [29].



Εικόνα 5.8 Φασματογράφημα ροπής κινητήρα σε υγιή κατάσταση και με μία σπασμένη μπάρα [29].

Και στις τρεις περιπτώσεις όταν έχουμε σφάλμα σπασμένης μπάρας στα αποτελέσματα εμφανίζεται ευδιάκριτα πλούσιο αρμονικό περιεχόμενο υπό την μορφή τροχιών που αναπόφευκτα μας οδηγεί στο συμπέρασμα της παρουσίας του σφάλματος.

6. Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ [47]

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων είναι μια προσεγγιστική, αριθμητική μέθοδος επίλυσης διαφορικών εξισώσεων που τα τελευταία χρόνια βρίσκει εφαρμογή σε μαθηματικά μοντέλα και προσομοιώσεις και χρησιμοποιείται σε ευρύ φάσμα επιστημονικών πεδίων όπως η ρευστομηχανική, δομική μηχανική ανάλυση, θερμοδυναμική, στον ηλεκτρομαγνητισμό κ.α.

Για την επίλυση ενός προβλήματος με την χρήση της αυτής της μεθόδου, πραγματοποιείται η υποδιαίρεση του συστήματος σε μικρότερα μέρη που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Αυτό επιτυγχάνεται με την διακριτοποίηση του μοντέλου στο χώρο και την κατασκευή πλέγματος του. Η επιλογή της κατάλληλης πυκνότητας πεπερασμένων στοιχείων του πλέγματος είναι κρίσιμη καθώς εάν το πλέγμα είναι αραιό τότε καθίσταται είναι δυσχερής η ορθή επίλυση του προβλήματος. Αντιθέτως, ένα πλέγμα με υπερβολικά μεγάλο αριθμό στοιχείων μπορεί να οδηγήσει σε δυσανάλογα, ως προς την μεγαλύτερη ακρίβεια της λύσης που προσφέρει, αύξηση του υπολογιστικού χρόνου πράγμα που το καθιστά ανώφελο.

Τα στοιχεία του πλέγματος είναι ενωμένα μεταξύ τους σε κόμβους και το κάθε ένα αποτελείται από ένα σετ εξισώσεων, απλούστερων στην λύση τους από τις αρχικές μερικές διαφορικές εξισώσεις του συνολικού προβλήματος. Η προσεγγιστική αντιστοίχιση των μερικών διαφορικών εξισώσεων με απλούστερες εξισώσεις γίνεται μέσω της μεθόδου Galerkin. Συγκεκριμένα οι μερικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν το φαινόμενο που εξετάζεται στην του δυναμική κατάσταση αντικαθίσταται από συνήθεις διαφορικές εξισώσεις. Ομοίως για την μόνιμη κατάσταση επιλέγονται πολυωνυμικές εξισώσεις.

Στην συνέχεια οι εξισώσεις κάθε πεπερασμένου στοιχείου συγκεντρώνονται σε ένα κοινό σύστημα εξισώσεων λαμβάνοντας υπόψιν, την θέση και την σύνδεση μεταξύ των στοιχείων και των κόμβων στον χώρο, καθώς και τις οριακές συνθήκες του προβλήματος. Η επίλυση των απλών εξισώσεων των στοιχείων οδηγεί με την σειρά του στην επίλυση του συστήματος συνολικά δίνοντας έτσι την τελική λύση του προβλήματος.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι πολυχρηστική και ευέλικτη διότι ικανοποιεί πολύπλοκες δομές, γεωμετρίες και ιδιότητες υλικών. Μέσα από την κατάλληλη και προσεγμένη κατασκευή του πλέγματος οδηγεί σε ακριβή αποτελέσματα. Βέβαια, όπως έχει προαναφερθεί, δεν πρέπει να αγνοηθεί το γεγονός ότι εν τέλει δεν παύει να αποτελεί μια προσεγγιστική μέθοδο οπότε συνοδεύεται από ένα επίπεδο σφάλματος. Η ανάγκη επίτευξης όσο το δυνατόν μικρότερου σφάλματος μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση του υπολογιστικού χρόνου. Αυτό αντιμετωπίζεται μέσω της αποδοτικής χρήσης του πλέγματος, αυξάνοντας την πυκνότητα του σε ειδικά σημεία ενδιαφέροντος πάνω στο μοντέλο, όπου χρειάζεται, κρατώντας όσο γίνεται χαμηλότερα τον χρόνο εκτέλεσης.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων δεν θα μπορούσε να μην βρίσκει εφαρμογή και στις ηλεκτρικές μηχανές. Οι επαγωγικοί κινητήρες περιέχουν περίπλοκες γεωμετρίες στα επιμέρους τμήματά τους, ενώ κατά την εκκίνηση τους εμφανίζουν έντονα δυναμικά φαινόμενα πράγμα. Αυτές οι συνθήκες κάνουν την μέθοδο απαραίτητη στην ηλεκτρομαγνητική ανάλυση ενός λεπτομερούς, ακριβούς μοντέλου κινητήρα.

Η επίλυση του μοντέλου επιτυγχάνεται με την χρήση των εξισώσεων Maxwell για το μαγνητικό πεδίο. Οι εξισώσεις του Maxwell είναι οι εξής:

- Νόμος Gauss για το ηλεκτρικό πεδίο: $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ (6.1) όπου,

ρ συνολική πυκνότητα φορτίου,
 ϵ_0 διηλεκτρική σταθερά του κενού,
 E το ηλεκτρικό πεδίο.

- Νόμος Gauss για τον μαγνητισμό: $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$ (6.2) όπου,

B η μαγνητική επαγωγή.

- Νόμος της Faraday για την επαγωγή: $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t}$ (6.3)

- Νόμος Ampere-Maxwell: $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = \mu_0 \cdot (J + \epsilon_0 \cdot \frac{\partial E}{\partial t})$ (6.4) όπου,

J η πυκνότητα του ρεύματος,
 μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού.

Το στατικό μαγνητικό πεδίο περιγράφεται από τις εξισώσεις [2]:

- $\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}$ (6.5)

- $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$

- $\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \vec{H}$ (6.6)

Όπου: B η μαγνητική επαγωγή, J η πυκνότητα του ρεύματος, μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, μ_r η σχετική μαγνητική διαπερατότητα υλικού, H η ένταση του μαγνητικού πεδίου.

Για την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων παίρνουμε την εξίσωση () και εκφράζουμε την μαγνητική επαγωγή B σε σχέση με το μαγνητικό διανυσματικό δυναμικό A :

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (6.7)$$

Έτσι η εξίσωση () γίνεται:

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (6.8)$$

Στην περίπτωση μαγνητικού πεδίου που μεταβάλλεται στον χρόνο περαιτέρω εξισώσεις λαμβάνονται υπόψιν, λόγω της παρουσίας δινορρευμάτων. Για την σχέση μεταξύ της πυκνότητας ρεύματος με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου έχουμε [1]:

$$J = \sigma \cdot E \quad (6.9)$$

Όπου σ η αγωγιμότητα του υλικού και E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.

Το παραγόμενο ηλεκτρικό πεδίο (εξ επαγωγής) υπακούει την εξίσωση:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (6.10)$$

Αντικαθιστώντας την (6.7) στην (6.10) παίρνουμε:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (6.11)$$

Στην περίπτωση δισδιάστατου προβλήματος η παραπάνω εξίσωση μετατρέπεται σε:

$$\vec{E} = -\vec{A} - \vec{\nabla} V \quad (6.12)$$

Αν στην παραπάνω λάβουμε υπόψιν την (6.9) τότε έχουμε:

$$\vec{J} = -\sigma \cdot \vec{A} - \sigma \cdot \vec{\nabla} V \quad (6.13)$$

Αντικαθιστώντας την (6.13) στην (6.8) παίρνουμε:

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = \vec{J}_{src} - \sigma \cdot \vec{A} - \sigma \cdot \vec{\nabla} V \quad (6.14)$$

Με J_{src} να αντιπροσωπεύει τις εφαρμοσμένες πηγές ρεύματος.

Για γραμμικά ισотροπικά υλικά και θεωρώντας την συνθήκη Coulomb ($\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0$), οι εξισώσεις (6.8) και κατά συνέπεια η (6.14) απλοποιούνται αντίστοιχα σε:

- $-\frac{1}{\mu}\vec{\nabla}^2\vec{A}=\vec{J} \quad (6.15)$

- $-\frac{1}{\mu}\vec{\nabla}^2\vec{A}=\vec{J}_{src}-\sigma\cdot\vec{A}-\sigma\cdot\vec{\nabla}\vec{V} \quad (6.16)$

7. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΠΑΓΩΓΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

7.1 Βασικά Χαρακτηριστικά

Η παρούσα διπλωματική βασίζεται στην δισδιάστατη μοντελοποίηση και προσομοίωση λειτουργίας ενός επαγωγικού κινητήρα 4ων kilowatt στο περιβάλλον του SimCenter Magnet. Παρακάτω παραθέτονται τα ονομαστικά χαρακτηριστικά του κινητήρα όπως αυτά δίνονται από τον κατασκευαστή του:

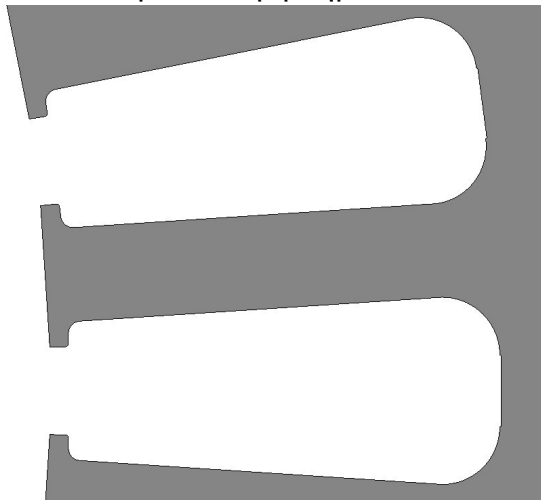
Συνδεσμολογία	Τάση (V)	Συχνότητα (Hz)	Ταχύτητα (rpm)	Ισχύς Εξόδου (kW)	Συντελεστής Ισχύος	Ρεύμα (A)
Δ	400	50	1455	4	0.79	8.50
Υ	690	50	1455	4	0.79	4.90
Δ	460	60	1765	4	0.76	7.40

Πίνακας 7.1

Στην δική μας περίπτωση τρέχουμε τον κινητήρα με συχνότητα τροφοδοσίας στα 50 Hz και συνδεσμολογία πηγής τρίγωνο με δύο ζεύγη πόλων. Το φορτίο του κινητήρα είναι 26.27Nm και η αδράνεια του είναι ίση με 0.4 kgm^2 . Η επίλυση του προβλήματος απαιτεί και το σχεδιασμό ενός εξωτερικού κυκλώματος που περιλαμβάνει όλα τα ηλεκτρικά στοιχεία του μοντέλου, από τις πηγές τάσης, τα πηνία του τυλίγματος μέχρι και τις εσωτερικές αντιστάσεις του.

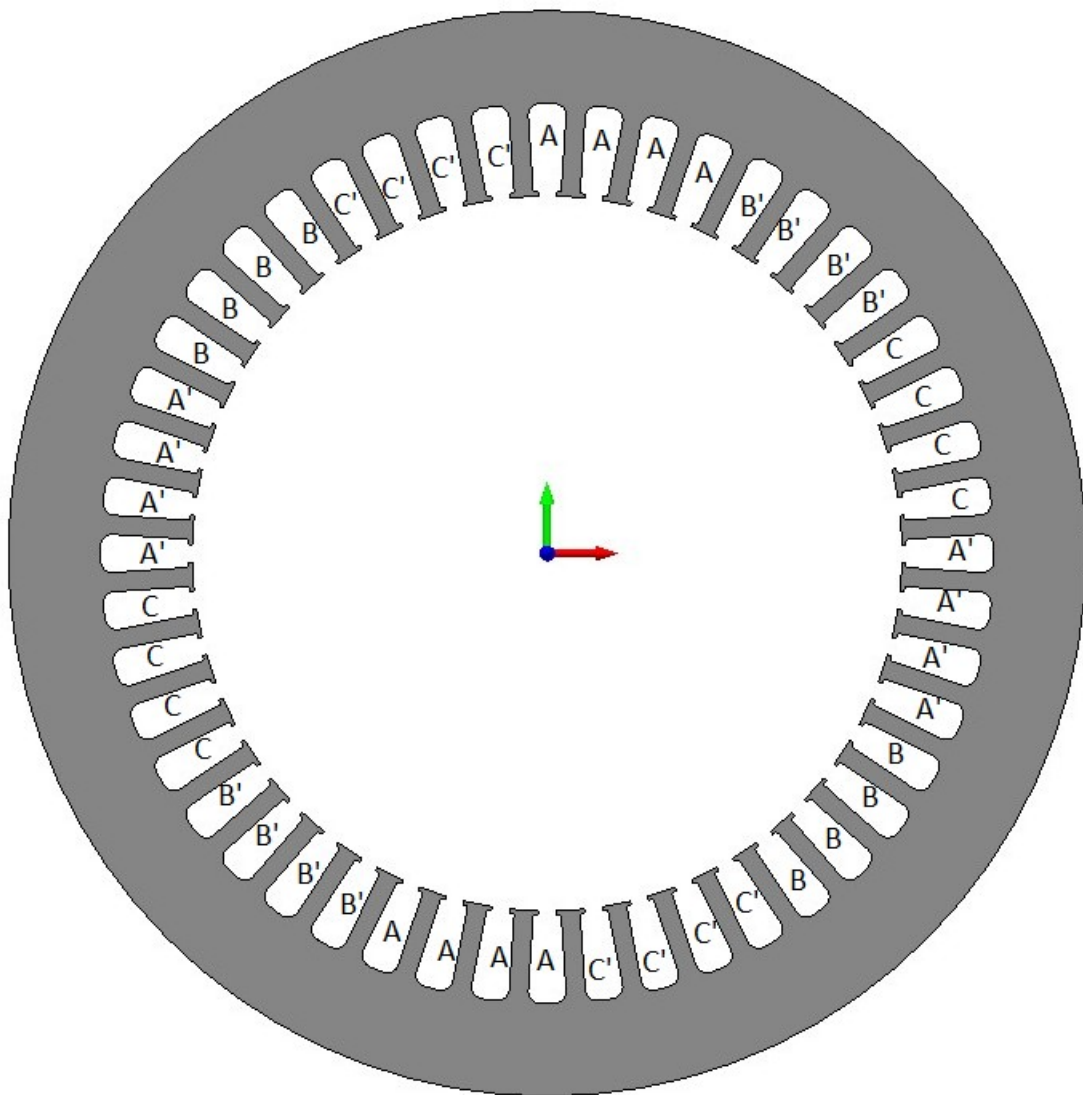
7.2 Στάτης

Ο στάτης του κινητήρα είναι κατασκευασμένος από σίδηρο τύπου M400-50A έχει ενεργό μήκος 150mm και αποτελείται από 48 δόντια που διαμορφώνουν 48 αυλακώσεις μέσα από τις οποίες περνάει το τριφασικό τύλιγμα. Για την δημιουργία του στάτη στο περιβάλλον του Magnet πρώτα σχεδιάστηκε με λεπτομέρεια ένα δόντι, το οποίο στην συνέχεια επαναλήφθηκε 47 φορές στρέφοντας το κάθε ένα αντίγραφο 7.5μοίρες σε σχέση με το άλλο. Η γεωμετρία του μοντέλου του σιδηροπυρήνα του στάτη ολοκληρώθηκε με την σχεδίαση του εσωτερικού εξωτερικού περιβλήματος του.

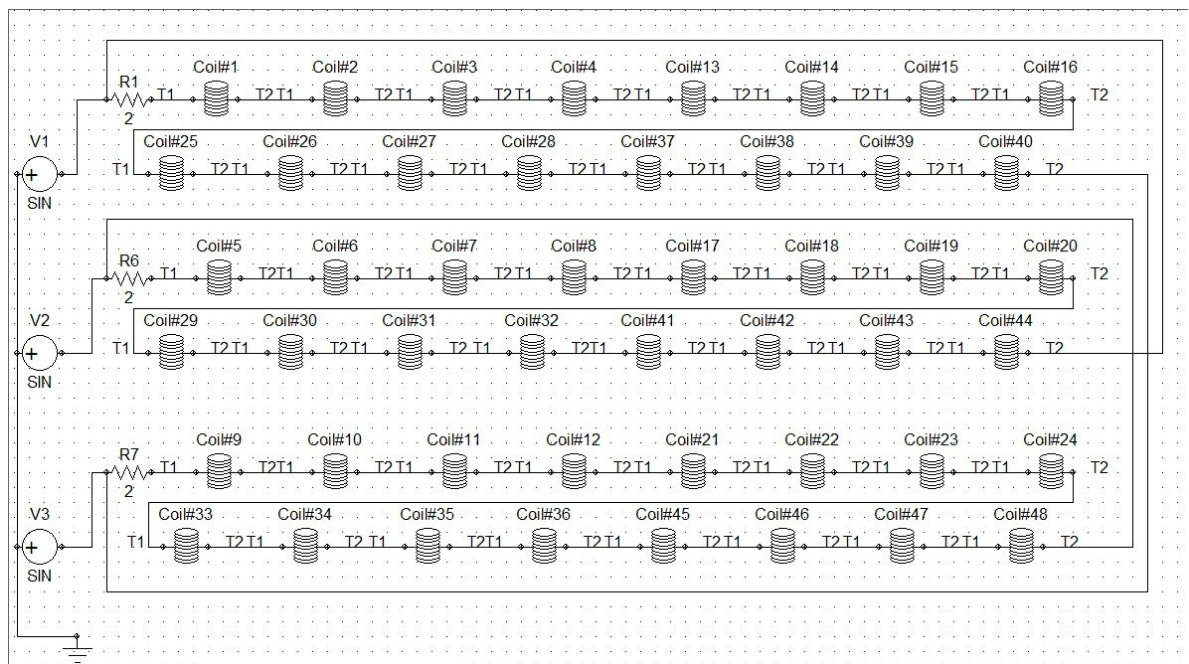


Εικόνα 7.1 Γεωμετρία Δοντιού Στάτη

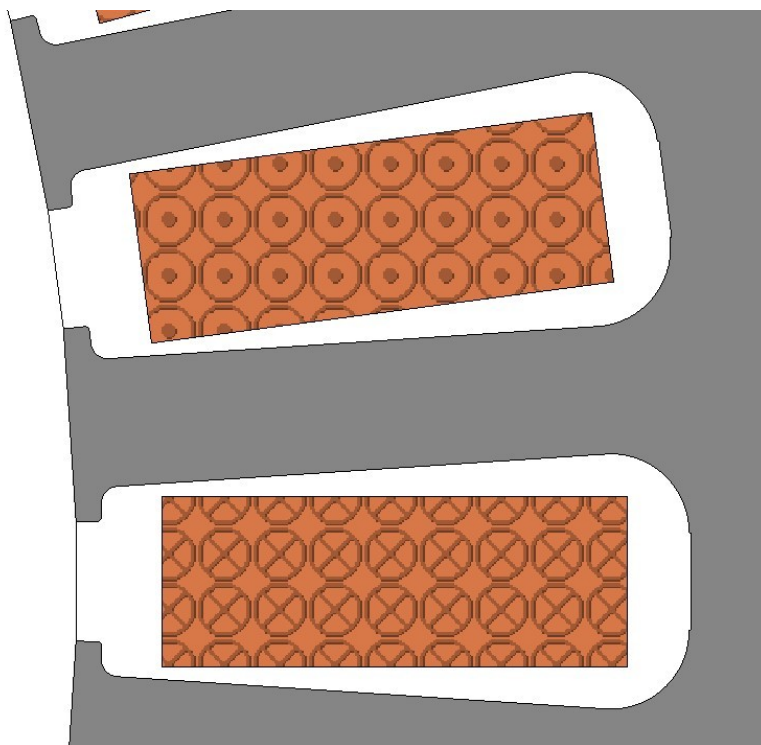
Το τύλιγμα του στάτη μοντελοποιείται με πηνία ορθογώνιου σχήματος. Τα πηνία είναι κατασκευασμένα από χαλκό και τοποθετούνται στους αύλακες του στάτη. Κάθε πηνίο αποτελείται από 40 σπείρες και σε κάθε φάση ανήκουν 16 από αυτά. Τα πηνία σε επίπεδο κυκλώματος είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους σε σειρά και έχουν αντίσταση 2Ω ανά φάση. Όπως σημειώθηκε από πάνω η μηχανή είναι συνδεδεμένη σε τρίγωνο οπότε αυτό ισχύει ως προς την συνδεσμολογία των πηνίων. Στα πηνία δίνεται η κατάλληλη φορά και θέση στα αυλάκια του στάτη ώστε να σχηματιστούν στην μηχανή δύο ζεύγη πόλων. Οι τρεις πηγές τάσης του κινητήρα είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους σε αστέρα και τροφοδοτούν το τύλιγμα με τάση πλάτους 326.6V και συχνότητας 50 Hz.



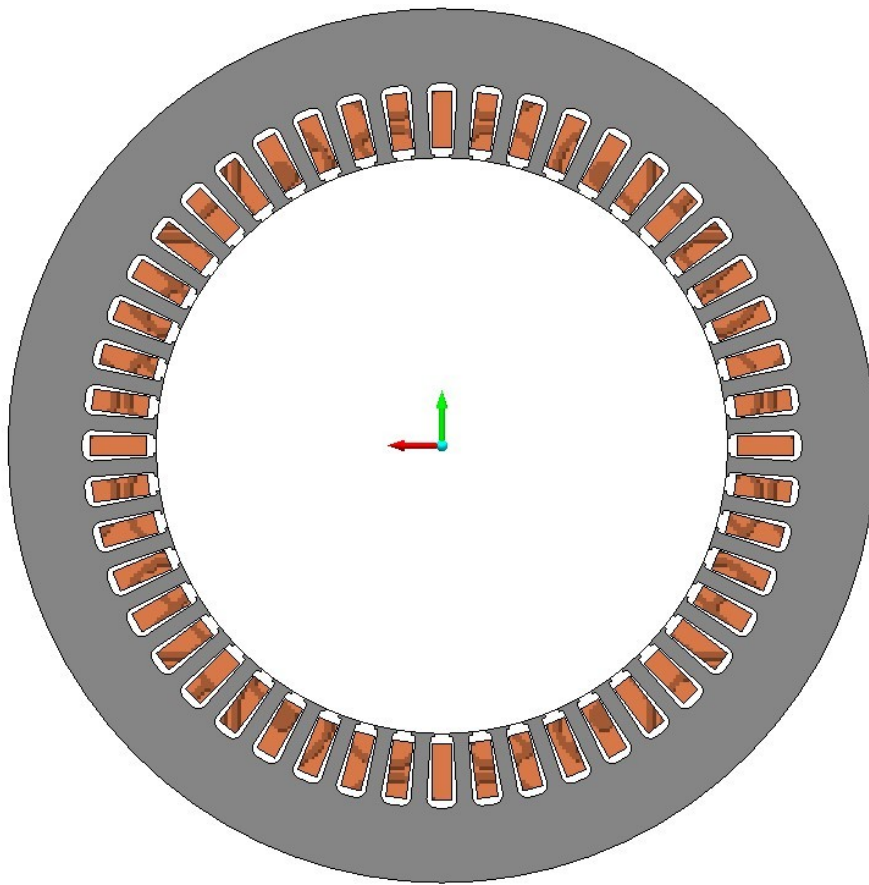
Εικόνα 7.2 Πλήρης γεωμετρία σιδηροπυρήνα Στάτη, φορά και θέση πηνίων τυλίγματος ανά φάση.



Εικόνα 7.3 Κύκλωμα πηγών και τριφασικού τυλίγματος στάτη



Εικόνα 7.4 Μοντελοποίηση τυλίγματος Στάτη

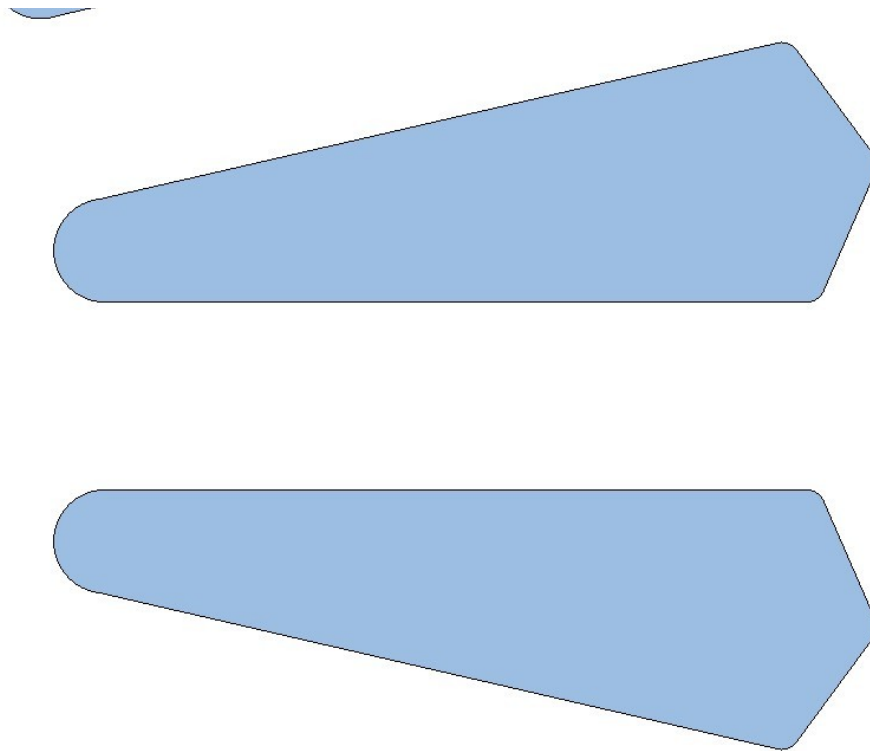


Εικόνα 7.5 Πλήρες μοντέλο Στάτη

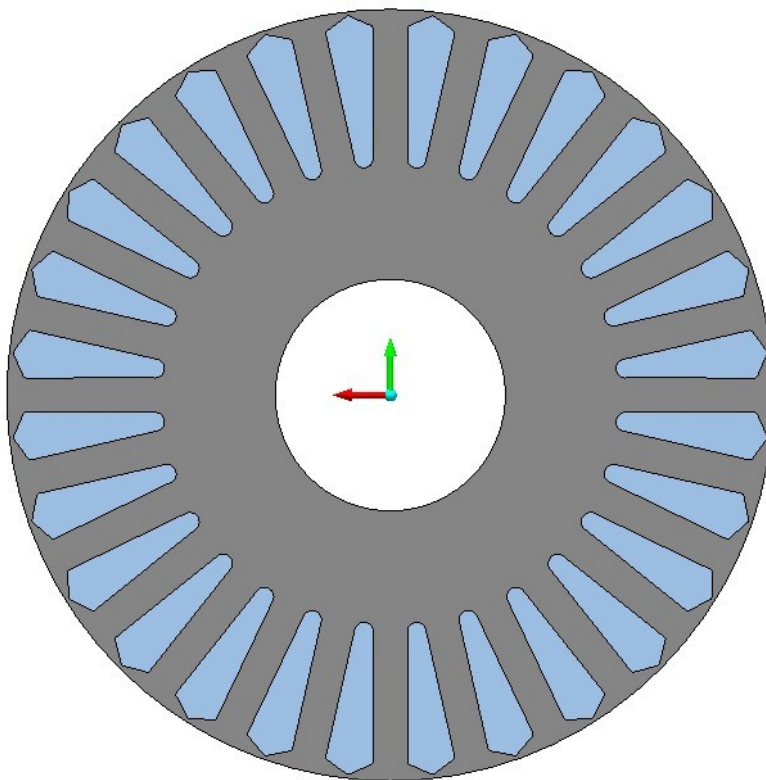
7.3 Δρομέας

Ο δρομέας του κινητήρα είναι τύπου βραχυκυκλωμένου κλωβού και έχει ενεργό μήκος 150mm. Αποτελείται από τον πυρήνα κατασκευασμένο από σίδηρο, ίδιου τύπου με αυτό του στάτη, και 28 αυλακώσεις μέσα στις οποίες τοποθετούνται οι αλουμιένιες μπάρες.

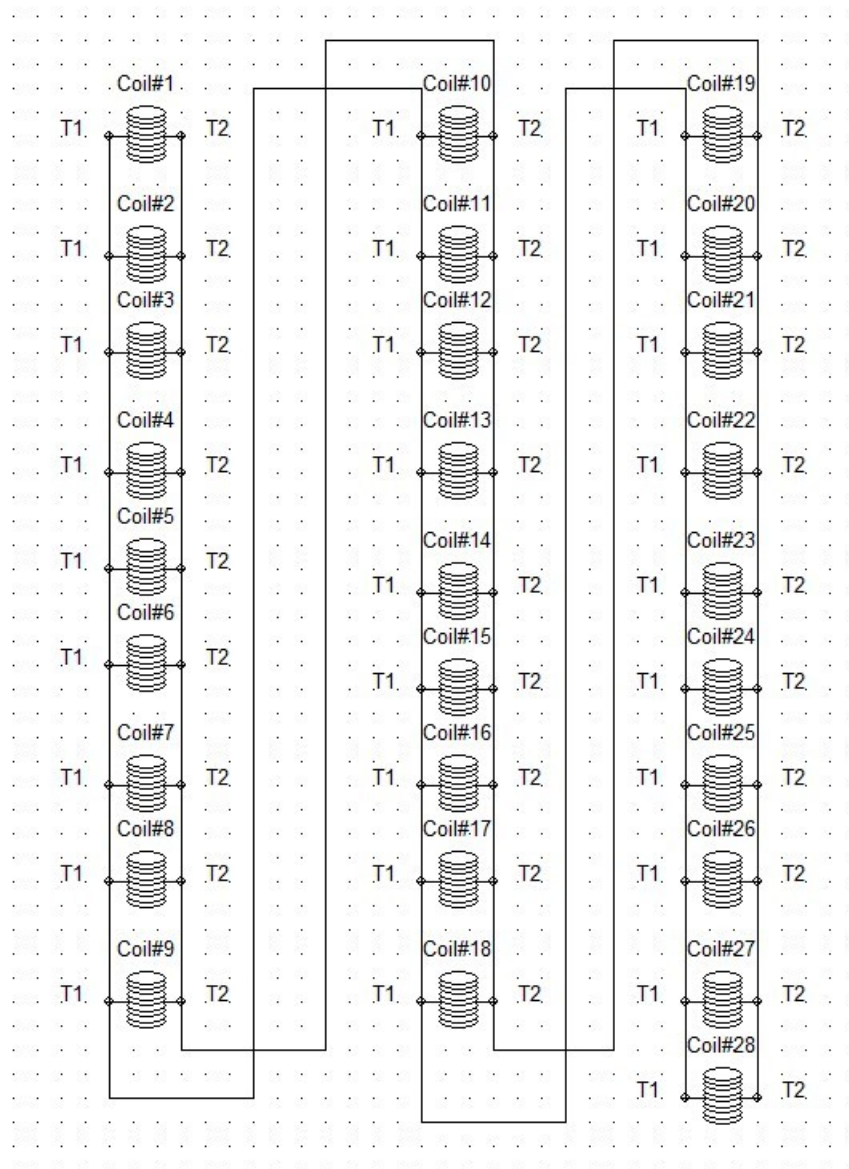
Για την δημιουργία του δρομέα στο περιβάλλον του Magnet αρχικά σχεδιάστηκε μία αυλάκωση η οποία έπειτα επαναλήφθηκε 27 φορές στρέφοντας το κάθε ένα αντίγραφο 12.87 μοίρες περίπου σε σχέση με το άλλο. Στην συνέχεια σχεδιάστηκε ο πυρήνας που περιλαμβάνει εσωτερικά τις αυλακώσεις. Οι αλουμιένιες μπάρες είναι πρακτικά πηνία και κυκλωματικά είναι όλες βραχυκυκλωμένες μεταξύ τους. Τέλος σχεδιάστηκε ο άξονας της μηχανής που στην μοντελοποίηση μας έχει μονάχα αέρα.



Εικόνα 7.6 Γεωμετρία μπαρών Δρομέα



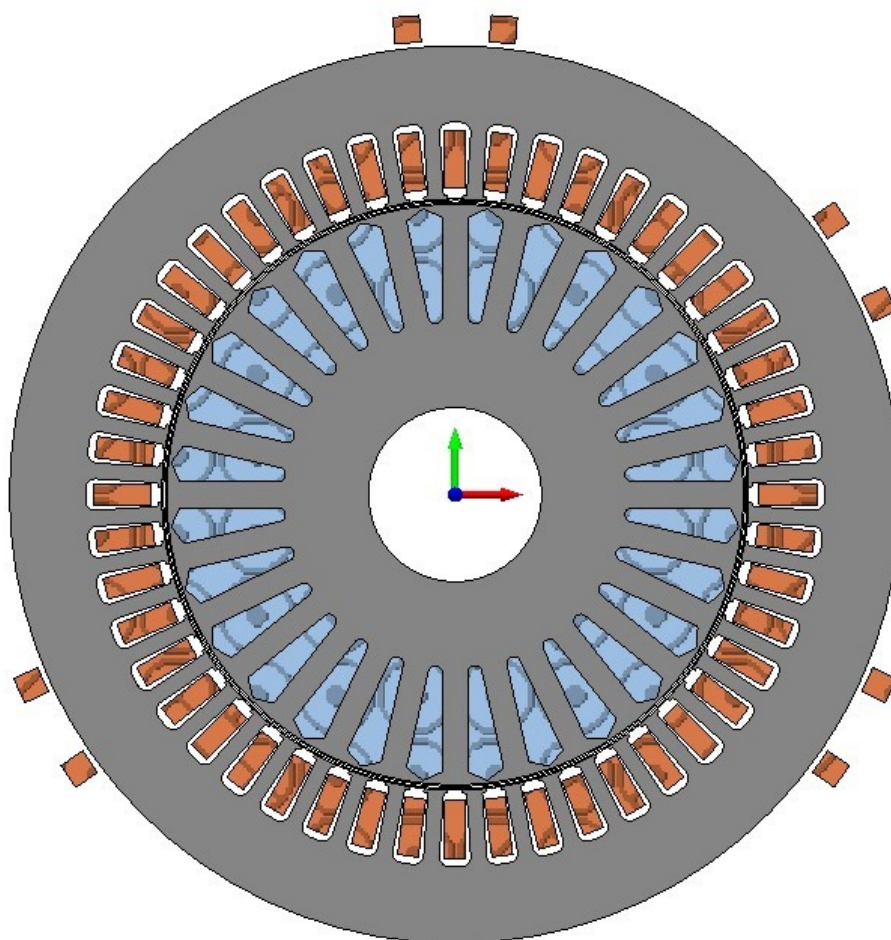
Εικόνα 7.7 Πλήρες μοντέλο Δρομέα



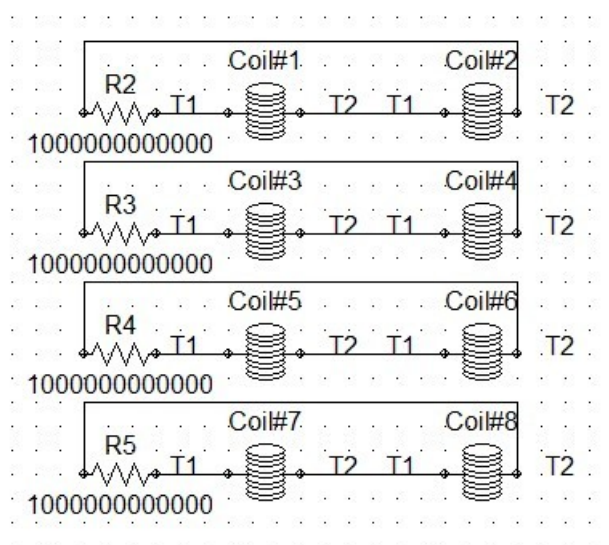
Εικόνα 7.8 Κύκλωμα δρομέα

7.4 Διάκενο, Αισθητήρες, Οριακές Συνθήκες

Όπως έχει προαναφερθεί το ενεργό μήκος της μηχανής είναι 150mm. Ο δρομέας με τον στάτη χωρίζονται μεταξύ τους από το διάκενο που έχει μέγεθος 1mm. Χωρίζουμε το διάκενο σε τρία μέρη, το εξωτερικό, το εσωτερικό μήκους 0.3mm και το μεσαίο μήκους 0.4mm. Για την μέτρηση της μαγνητικής ροής προσθέτουμε εξωτερικά του κινητήρα, σε απόσταση 1mm, αισθητήρες υπό την μορφή πηνίων. Συνολικά τοποθετούμε τέσσερις αισθητήρες περιμετρικά της μηχανής στις 0, 60, 120 και 240 μοίρες. Κάθε αισθητήρας μοντελοποιείται σαν ένα ζεύγος πηνίων αντίθετης φοράς. Σε επίπεδο κυκλώματος έχουμε τα πηνία, που αποτελούν τον κάθε αισθητήρα ξεχωριστά, συνδεδεμένα σε σειρά με μία αντίσταση 10GΩ. Τέλος γύρω από τον κινητήρα έχουμε ένα air box ώστε που καθορίζει τις οριακές συνθήκες του μοντέλου. Στην εξωτερική επιφάνεια του air box εφαρμόζεται αυτόματα η προκαθορισμένη οριακή συνθήκη του tangential flux σύμφωνα με την οποία το η ροή εφάπτεται στο εξωτερικό όριο και δεν το διαπερνά.

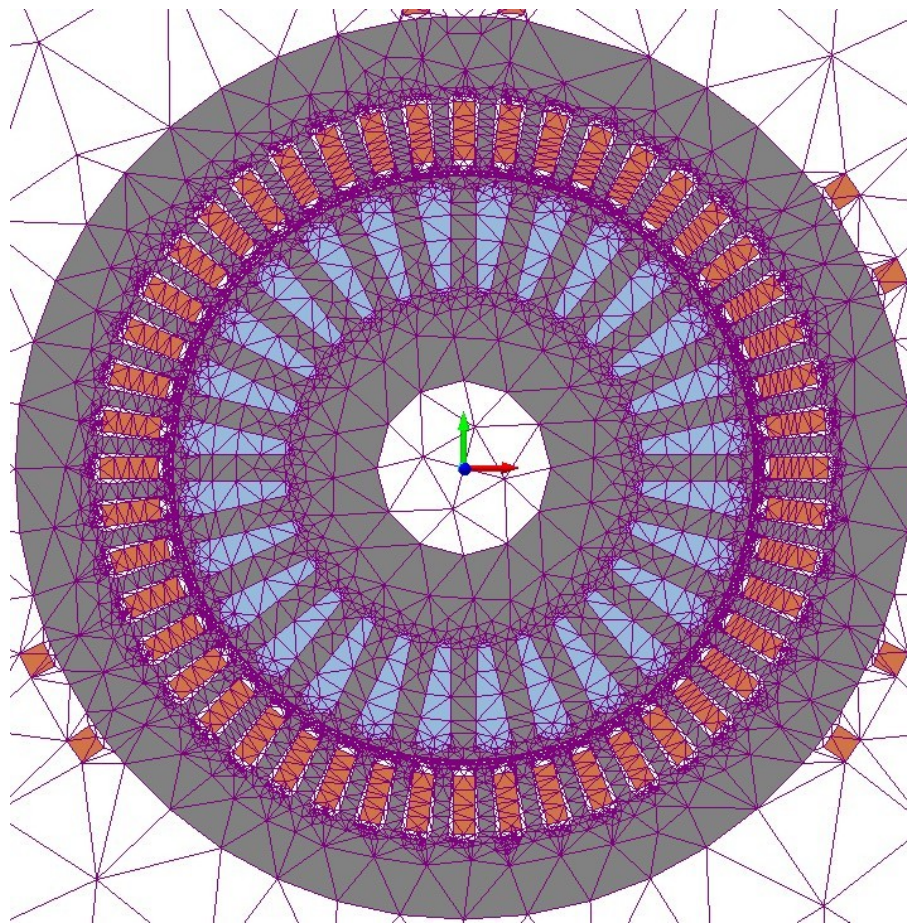


Εικόνα 7.9 Πλήρες μοντέλο κινητήρα και αισθητήρων



Εικόνα 7.10 Κύκλωμα αισθητήρων μαγνητικής ροής

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναδείξαμε την σημασία του πλέγματος στην επιτυχημένη και ακριβή προσομοίωση. Παρακάτω παρατίθεται εικόνα από το πλέγμα του μοντέλου και παρατηρείται η έντονη πυκνότητα του σε σημεία μεγάλου ενδιαφέροντος όπως το διάκενο της μηχανής.



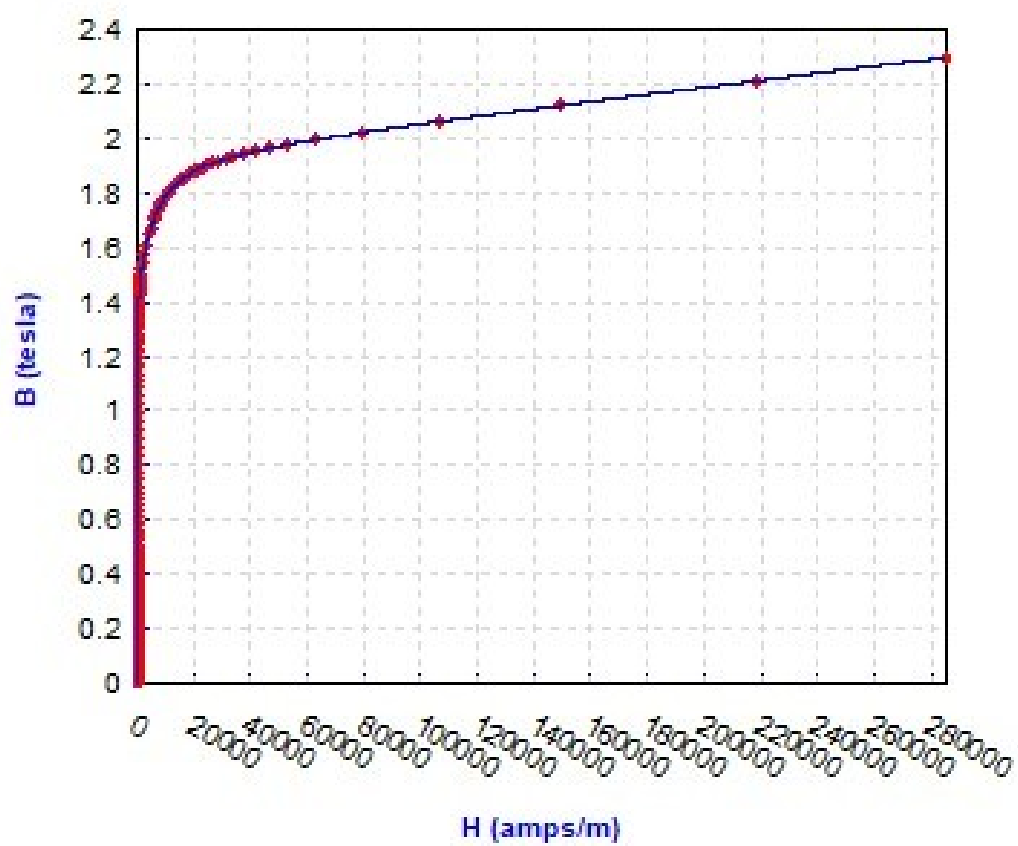
Εικόνα 7.11 Πλέγμα προσομοίωσης κινητήρα

7.5 Βασικά Χαρακτηριστικά Υλικών

Τα χαρακτηριστικά των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένος ο κινητήρας παίζουν μεγάλο ρόλο με μεγαλύτερο αυτόν της χαρακτηριστικής B-H του σιδήρου από τον οποίο κατασκευάζονται στάτης και δρομέας.

Ο στάτης και ο πυρήνας του δρομέα κατασκευάζονται από σίδηρο τύπου M400-50A η καμπύλη μαγνητικής επαγωγής – ένταση μαγνητικού πεδίου ($B - H$) του οποίου παρατίθεται παρακάτω.

Οι μπάρες του δρομέα είναι κατασκευασμένες από αλουμίνιο το οποίο έχει ηλεκτρική αντίσταση $3.8e-08 \Omega m$.



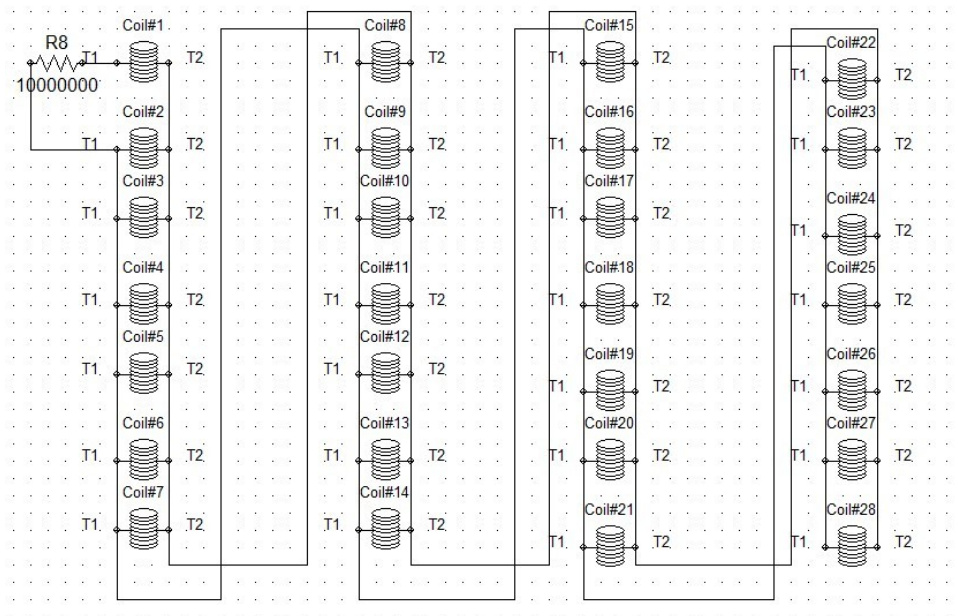
Εικόνα 7.12 Χαρακτηριστική B-H του σιδήρου M400-50A

8. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΣΕ ΥΓΙΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΜΕ ΣΦΑΛΜΑ ΣΠΑΣΜΕΝΗΣ ΜΠΑΡΑΣ

8.1 Μοντελοποίηση Σφάλματος

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε κάποια βασικά αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης του κινητήρα μετά την προσομοίωση του στο πρόγραμμα SimCenter Magnet σε υγιή κατάσταση αλλά και με μία σπασμένη μπάρα. Η προσομοίωση έγινε με ονομαστικό φορτίο και χρονικό βήμα 0.1ms σε σύνολο 6s προσομοίωσης.

Για να μοντελοποιήσουμε το σφάλμα σπασμένης μπάρας προσθέτουμε στο κύκλωμα μια αντίσταση 10MΩ σε σειρά με το πηνίο που αποτελεί την μπάρα που θέλουμε να σπάσουμε.



Εικόνα 8.1 Κύκλωμα δρομέα με σπασμένη μπάρα.

8.2 Βασικά Μεγέθη

Στους παρακάτω πίνακες επισημαίνουμε στοιχεία της ηλεκτρομαγνητικής ανάλυσης.

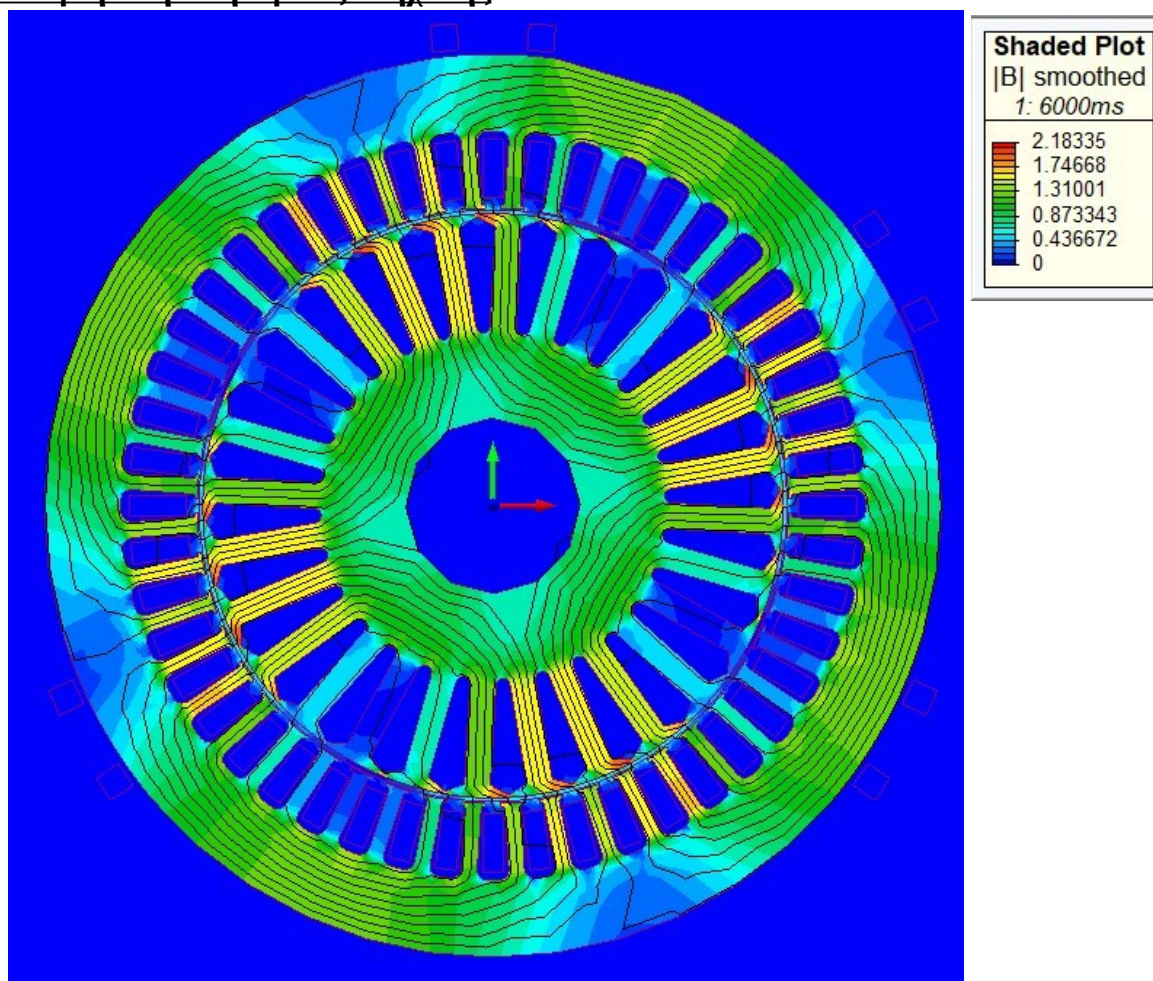
	Τάση (V)	Ρεύμα (A)	Συχνότητα (Hz)	Ζεύγη πόλων	Συντελεστής Ισχύος	Ροπή (Nm)
Υγιής	400	9.85	50	2	0.6714	26.27
Σπασμένη Μπάρα	400	9.97	50	2	0.6673	26.27

	Ταχύτητα (rpm)	Σύγχρονη ταχύτητα (rpm)	Ολίσθηση	Ηλεκτρική Ισχύς Εισόδου (W)	Μηχανική Ισχύς Εξόδου (W)	Απόδοση (%)
Υγιής	1464.75	1500	0.0245	4461.4	4025.24	90.22
Σπασμένη Μπάρα	1461.21	1500	0.0259	4461.4	4019.77	90.10

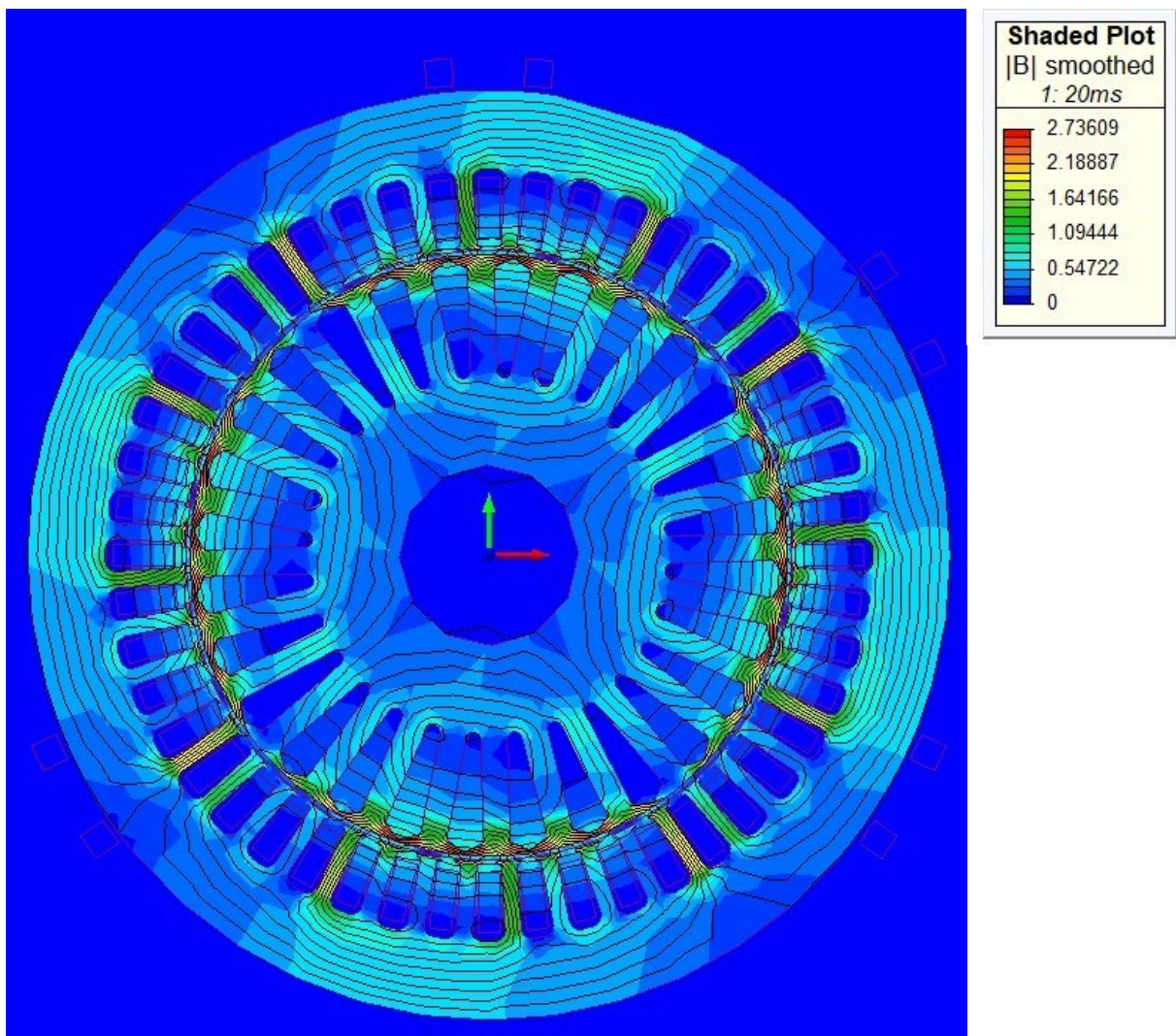
Όπως γίνεται αντιληπτό το σφάλμα σπασμένης μπάρας δεν φαίνεται να προκαλεί ραγδαίες διαφοροποιήσεις σε κάποιο από τα μεγέθη. Εμφανίζεται μια ελαφριά πτώση στην ταχύτητα του δρομέα που συμπαράσχει και τα εξαρτώμενα μεγέθη της όπως η ολίσθηση και η μηχανική ισχύς εξόδου.

Στην συνέχεια παρουσιάζουμε και για δύο περιπτώσεις, σε εικόνες την κατανομή της μαγνητικής ροής και της πυκνότητας ρεύματος στην μηχανή, κατά την εκκίνηση καθώς και στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της.

8.3 Μαγνητική Ροή Υγιούς Μηχανής



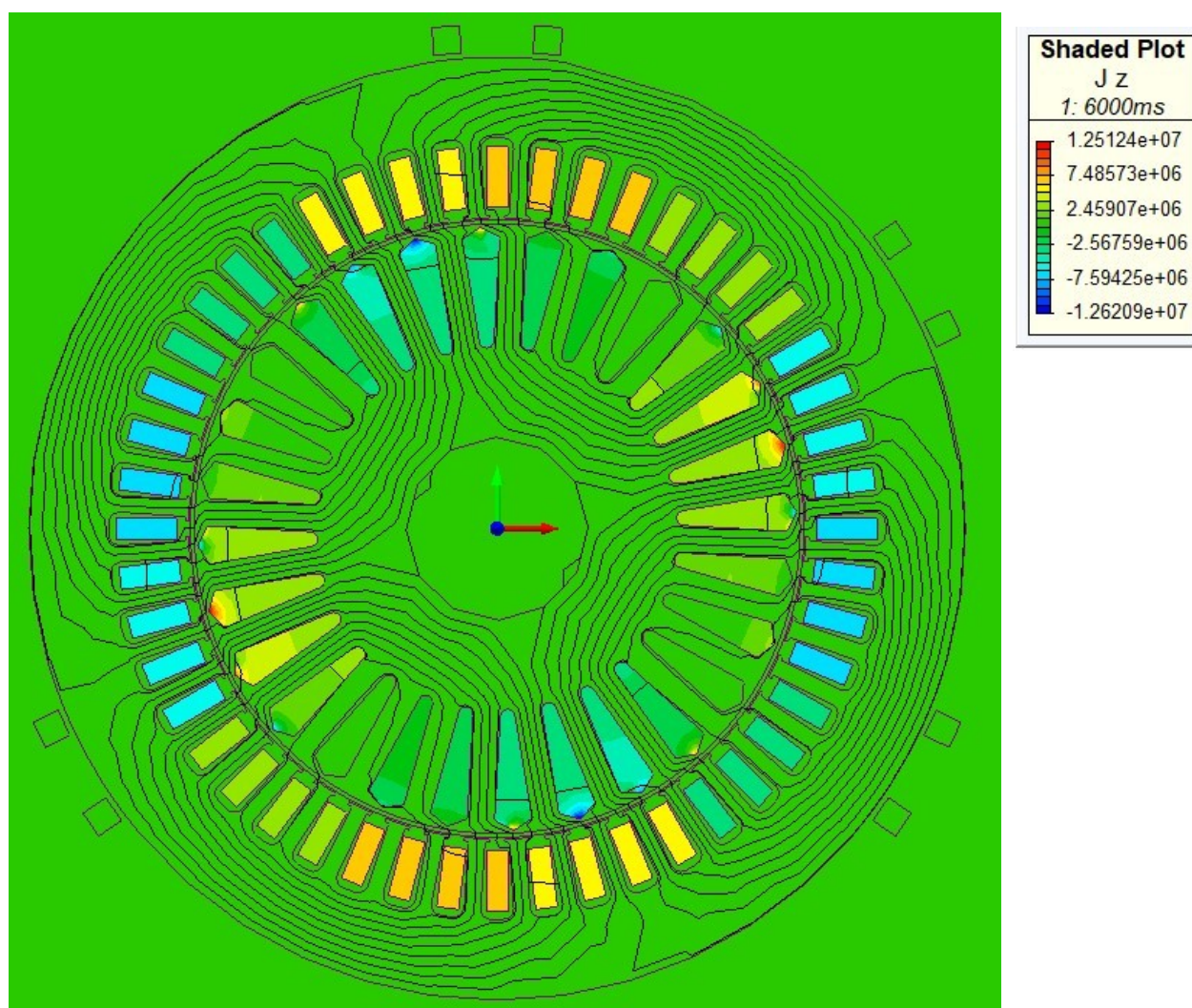
Εικόνα 8.2 Κατανομή μαγνητικής ροής υγιούς μηχανής κατά την μόνιμη κατάσταση



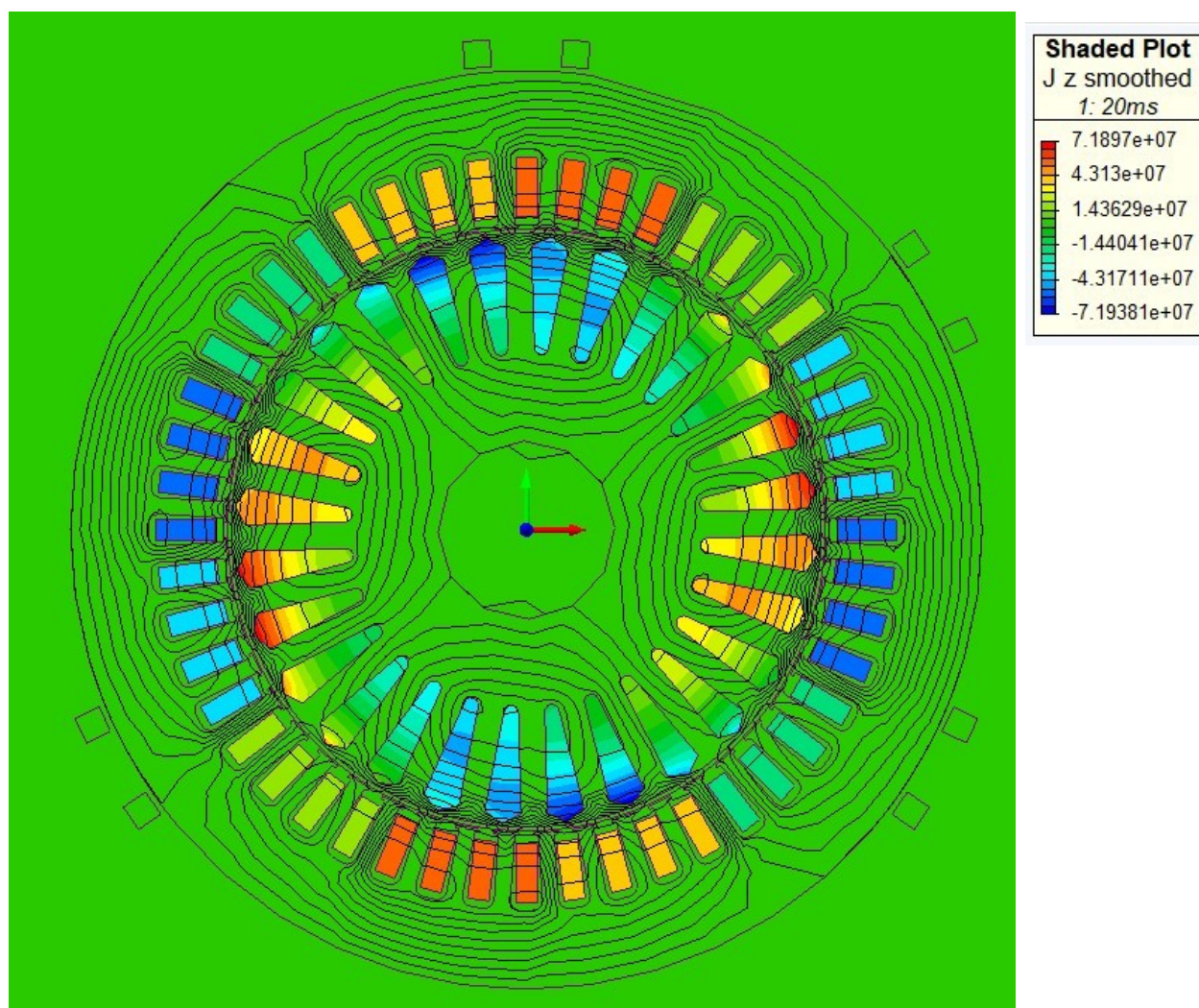
Εικόνα 8.3 Κατανομή μαγνητικής ροής υγιούς μηχανής κατά την εκκίνηση

Η μαγνητική ροή αυξάνεται σημαντικά καθώς η μηχανή πλησιάζει στην μόνιμη κατάσταση. Βλέπουμε την συμμετρία των πόλων του μαγνητικού πεδίου.

8.4 Πυκνότητα Ρεύματος Υγιούς Μηχανής



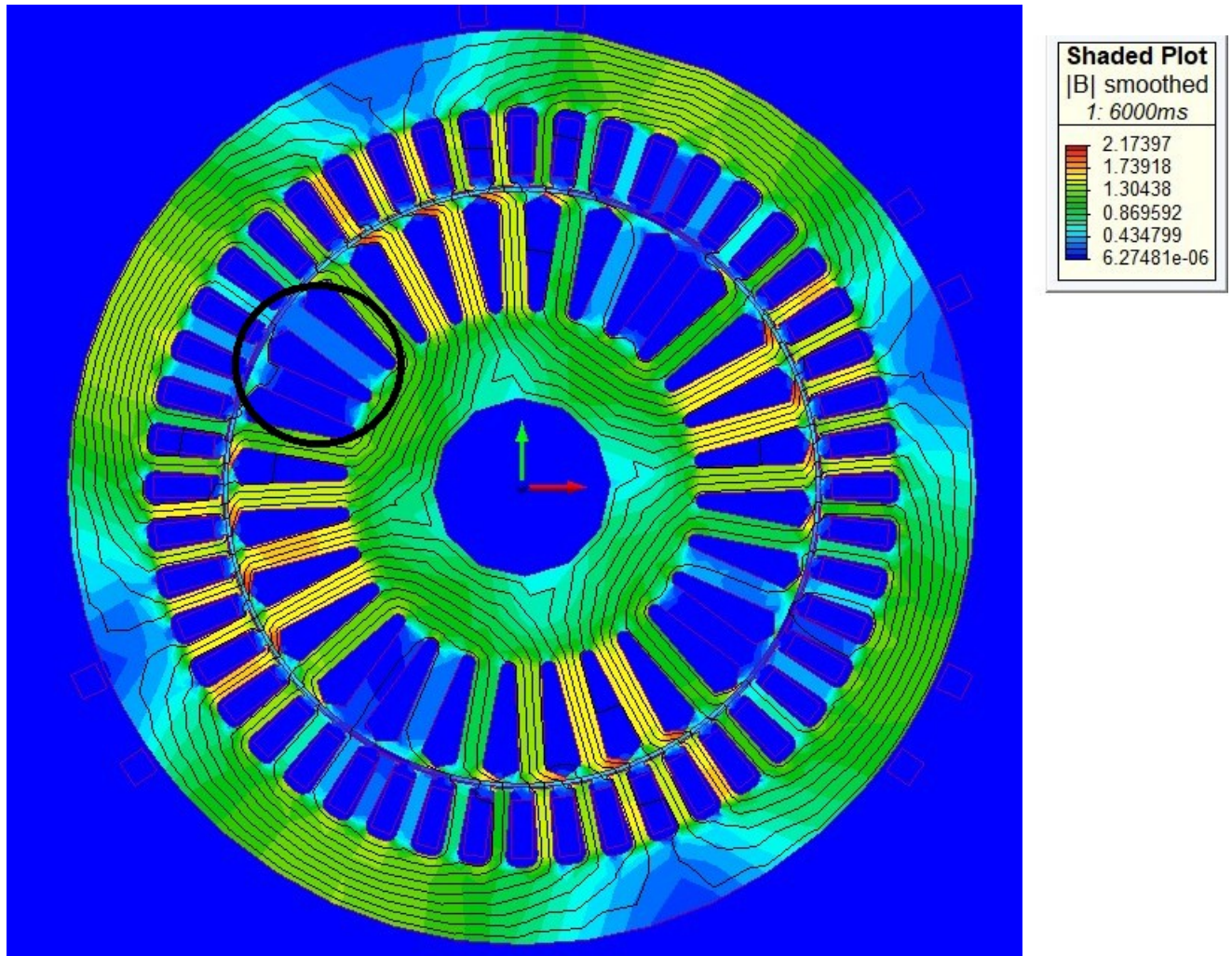
Εικόνα 8.4 Κατανομή πυκνότητας ρεύματος υγιούς κινητήρα στην μόνιμη κατάσταση



Εικόνα 8.5 Κατανομή πυκνότητας ρεύματος υγιούς κινητήρα στην εκκίνηση

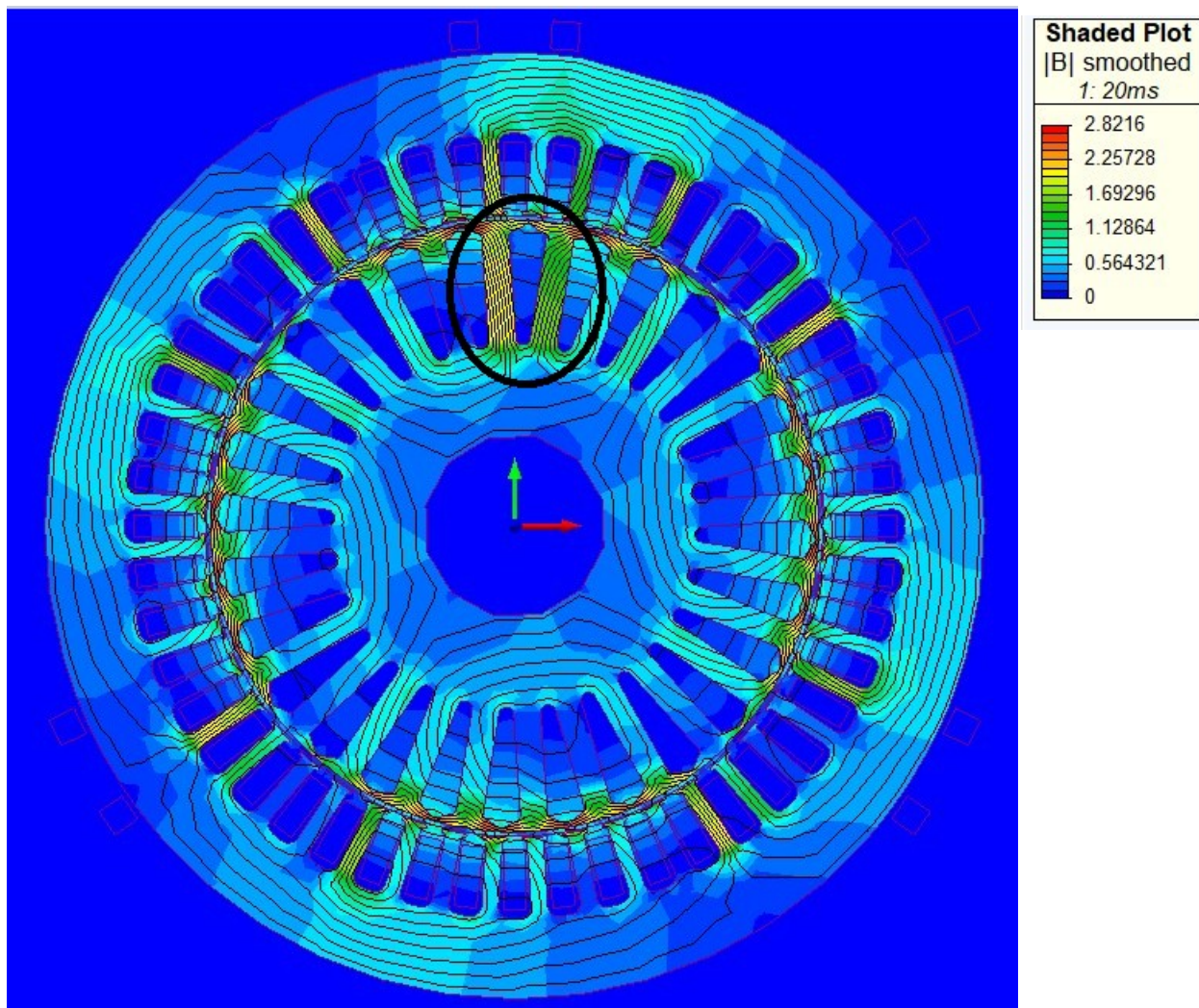
Παρατηρούμε την αναμενόμενη αύξηση του ρεύματος κατά την εκκίνηση συγκριτικά με την μόνιμη κατάσταση. Επίσης γίνεται αντιληπτή η παρουσία του επιδερμικού φαινομένου στην εκκίνηση με την συγκέντρωση του ρεύματος στην επιφάνεια των μπαρών.

8.5 Μαγνητική Ροή Μηχανής με Σπασμένη Μπάρα



Εικόνα 8.6 Κατανομή μαγνητικής ροής σε κινητήρα με σπασμένη μπάρα κατά την μόνιμη κατάσταση

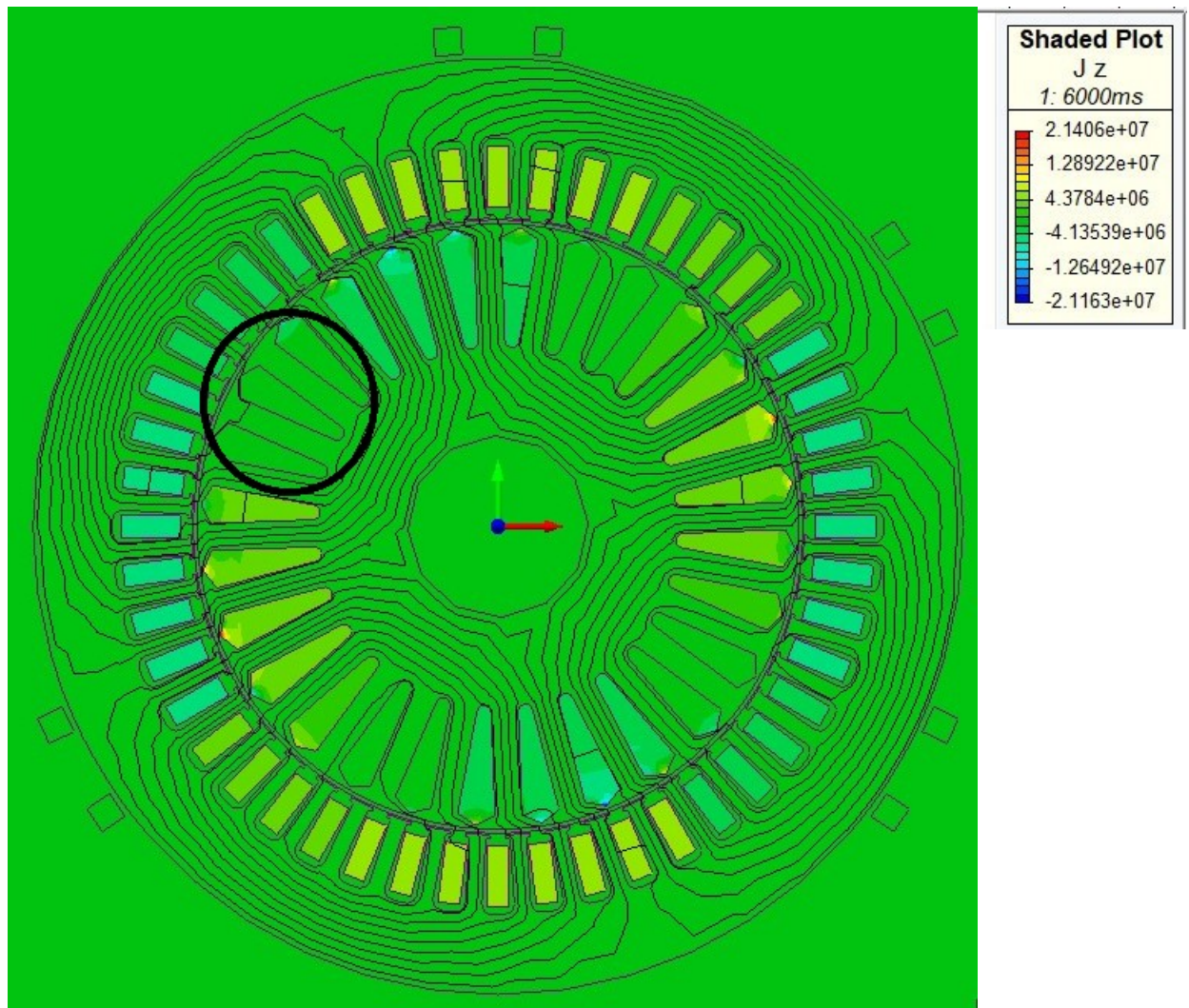
Βλέπουμε στην μόνιμη κατάσταση την ασυμμετρία που δημιουργείται στους πόλους του μαγνητικού πεδίου του στάτη.



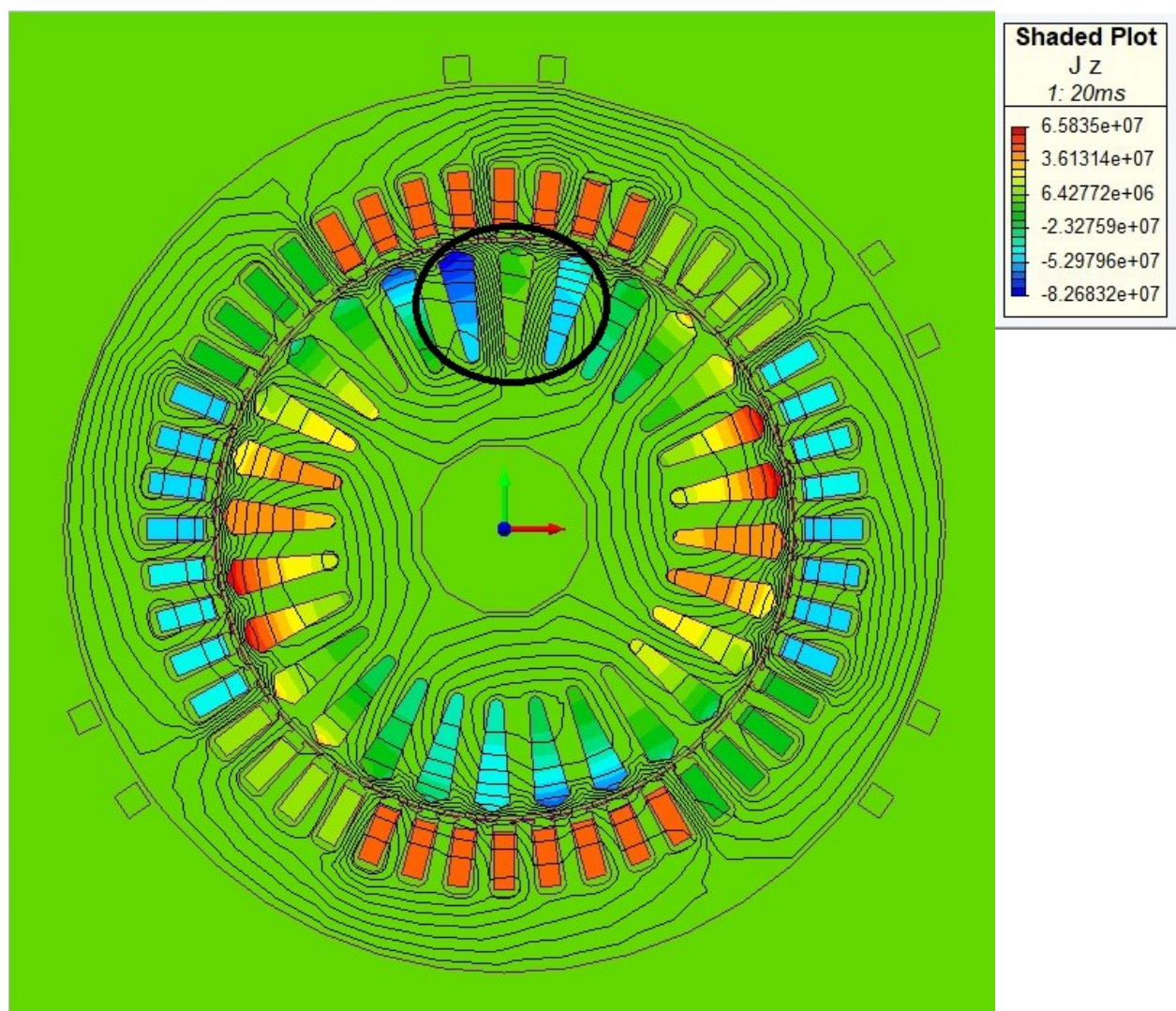
Εικόνα 8.7 Κατανομή μαγνητικής ροής σε κινητήρα με σπασμένη μπάρα κατά την εκκίνηση

Παρατηρούμε έντονη αύξηση της μαγνητικής ροής στον σίδηρο του δρομέα γύρω από την σπασμένη μπάρα καθώς και ασυμμετρία στον μαγνητικό πόλο που την γειτνιάζει.

8.6 Πυκνότητα Ρεύματος Μηχανής με Σπασμένη Μπάρα



Εικόνα 8.8 Κατανομή πυκνότητας ρεύματος σε κινητήρα με σπασμένη μπάρα στην μόνιμη κατάσταση



Εικόνα 8.9 Κατανομή πυκνότητας ρεύματος σε κινητήρα με σπασμένη μπάρα στην εκκίνησης

Βλέπουμε στην κορυφή του δρομέα πως η σπασμένη μπάρα, προφανώς, δεν διαρρέεται με ρεύμα. Ταυτόχρονα παρατηρούμε την αύξηση της πυκνότητας ρεύματος στις γειτονικές μπάρες.

9. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΝΑ ΜΕΘΟΔΟ

9.1 Εισαγωγή

Για την διάγνωση σφάλματος σπασμένης μπάρας δρομέα κάνουμε χρήση του μοντέλου που περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Εξετάζονται 4 περιπτώσεις, υγιής μηχανή, μηχανή με μια σπασμένη μπάρα, μηχανή με δύο γειτονικές σπασμένες μπάρες και τέλος μηχανή με δύο σπασμένες μπάρες με απόσταση μισού πολικού βήματος.

Η μοντελοποίηση του σφάλματος πολλαπλών μπαρών γίνεται όμοια με αυτόν που περιγράφηκε για την μία σπασμένη μπάρα. Στο κύκλωμα του δρομέα προσθέτουμε, ανάλογα την θέση της μπάρας που θέλουμε να σπάσουμε, αντίσταση σε σειρά με το πηνίο της μπάρας. Για την περίπτωση των μη γειτονικών σπασμένων μπαρών υπολογίζουμε το πολικό βήμα. Εφόσον έχουμε 4 μαγνητικούς πόλους και 28 μπάρες δρομέα το πολικό βήμα είναι ίσο με 7. Οπότε για να προσομοιώσουμε το σφάλμα για μπάρες σε απόσταση μισού πολικού βήματος θεωρούμε ως σπασμένη την 1η και 4η μπάρα του δρομέα.

Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του μοντέλου παραμένουν τα ίδια, η προσομοίωση γίνεται για 6 δευτερόλεπτα με δειγματοληψία 0.1ms. Τα αποτελέσματα ενδιαφέροντος εξάγονται σε spreadsheet και έπειτα εισάγονται ως σήματα στο MATLAB όπου επεξεργάζονται κατάλληλα σύμφωνα με κάθε μέθοδο διάγνωσης.

Η διάγνωση γίνεται με την χρήση των μεθόδων MCSA, παρακολούθησης της stray flux και με παρακολούθηση της ροπής, στην μόνιμη κατάσταση αλλά και κατά την εκκίνηση με την βοήθεια φασματογραφημάτων. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αναλύονται και συμπεράσματα βγαίνουν για την αποτελεσματικότητα κάθε μεθόδου για κάθε διαφορετικό μέγεθος σφάλματος.

9.2 Παρακολούθηση Ρεύματος Στάτη στην Μόνιμη Κατάσταση (MCSA)

Αφότου έχουμε εξάγει τα σήματα των ρευμάτων του στάτη του κινητήρα με την κατάλληλη επεξεργασία παίρνουμε το φάσμα τους το οποίο μας εμφανίζει ένα σύνολο αρμονικών. Κάποιες από αυτές εμφανίζονται σε συχνότητες που προκύπτουν από τους τύπους

$$f_{bb} = (1 \pm 2 \cdot s \cdot k) \cdot f_s, \quad f_{bb3} = [(4 \cdot m \pm 1) \pm 2 \cdot k \cdot s] \cdot f_s, \quad f_{bb4} = \left[\frac{k}{p} \cdot (1 - s) \pm s \right] \cdot f_s, \text{ όπως αναλύθηκε}$$

σε προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτές οι αρμονικές ανάλογα το μέγεθος τους αποτελούν ένδειξη ύπαρξης σφάλματος σπασμένης μπάρας στον δρομέα. Για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση πρώτα χρησιμοποιούμε το παράθυρο Hanning, στο σήμα του ρεύματος, για να αποφευχθεί τυχόν spectral leakage που θα παραποιήσει τα αποτελέσματα. Στην συνέχεια παίρνουμε το FFT του νέου σήματος και το πλοτάρουμε κανονικοποιώντας το πλάτος του ως προς την βασική συχνότητα 50Hz.

Η ανάλυση γίνεται μέχρι τα 400Hz, εύρος που επαρκεί για την διάγνωση σφάλματος. Οι ταλαντώσεις της ταχύτητας κάνουν δύσκολη την ακριβή μέτρηση της, άρα και της ολίσθησης, πράγμα που μαζί με την ανακρίβεια του FFT, οδηγεί σε ελαφριές αποκλίσεις των θεωρητικών συχνοτήτων από αυτές που εμφανίζονται στο φάσμα. Ακόμη αποκλίσεις στην συχνότητα υπάρχουν και μεταξύ των αρμονικών κάθε περίπτωσης λόγω της αλλαγής της ταχύτητας-ολίσθησης παρουσίας των διαφορετικών σφαλμάτων. Συγκεκριμένα για την κατάσταση λειτουργίας υγιούς κινητήρα, με μια σπασμένη μπάρα, με δύο γειτονικές σπασμένες μπάρες και με δύο μη γειτονικές σπασμένες μπάρες η ολίσθηση υπολογίζεται 0.0235, 0.0245, 0.0259, 0.0258 αντίστοιχα. Τέλος η μέθοδος πραγματοποιείται στο φασικό ρεύμα του στάτη καθώς και στο ρεύμα γραμμής του εξετάζοντας τα αποτελέσματα της φάσης A και των δύο.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται αναλυτικά αποτελέσματα για το σύνολο των αρμονικών του φασικού ρεύματος στάτη όσον αφορά, τον τύπο που εκφράζει την συχνότητα εμφάνισης τους, την συχνότητα αυτή καθώς και το πλάτος τους ως προς την βασική αρμονική, για όλες τις καταστάσεις του κινητήρα που μελετήθηκαν.

Υπογραφή	Συχνότητα Υγιής Κινητήρας (Hz)	Συχνότητα. Σπασμένη Μπάρα (Hz)	Συχνότητα. Δύο Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (Hz)	Συχνότητα. Δύο Μη Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (Hz)	Πλάτος Αρμονικής. Υγιής Κινητήρας (db)	Πλάτος Αρμονικής. Σπασμένη Μπάρα (db)	Πλάτος Αρμονικής. Δύο Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (db)	Πλάτος Αρμονικής. Δύο Μη Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (db)
(1-42s)fs	0.62				-97.71			
(1-40s)fs	3.33				-118.7			
(1-38s)fs	5.83	3.33	0.62		-114.08	-93.67	-106.44	
(1-36s)fs	7.7	5.83	3.33	3.95	-103.77	-91.4	-98.1	-94.76
(1-34s)fs	10.62	8.33	5.83	6.66	-109.01	-93.21	-86.74	-99.67
(1-32s)fs	12.29	10.83	8.54	8.95	-106.59	-85.75	-87.23	-80.52
(1-30s)fs	14.58	13.12	11.04	11.45	-38.41	-71.21	-73.29	-74.66
(1-28s)fs	17.08	15.62	13.75	13.95	-106.54	-64.16	-69.56	-65.56

(1-26s)fs	19.37	18.12	16.25	16.66	-121.72	-65.73	-82.05	-78.58
(1-24s)fs	21.87	20.62	18.95	19.16	-118.1	-74.08	-83.32	-75.48
(1-22s)fs	24.16	23.12	21.45	21.66	-119.7	-83.68	-68.31	-65.57
(1-20s)fs	26.45	25.41	23.95	24.37	-137.03	-73.46	-66.87	-84.8
(1-18s)fs	28.75	27.91	26.66	26.87	-119.29	-69.21	-72.09	-75.71
(1-16s)fs	31.25	30.41	29.16	29.37	-56.42	-55.83	-52.72	-50.97
(1-14s)fs	33.54	32.91	31.87	32.08	-120.67	-41.82	-50.75	-45.86
(1-12s)fs	35.83	35.2	34.37	34.58	-136.63	-60.04	-46.55	-50.97
(1-10s)fs	38.33	37.7	37.08	37.08	-134.54	-55.48	-49.86	-47.93
(1-8s)fs	40.62	40.2	39.58	39.79	-135.45	-52.1	-59.88	-54.28
(1-6s)fs	42.91	42.7	42.29	42.29	-134.9	-52.44	-52.63	-46.26
(1-4s)fs	45.41	45	44.79	44.79	-118.7	-60.95	-67.83	-45.49
(1-2s)fs	47.7	47.5	47.5	47.5	-97.71	-35.76	-30.03	-38.92
(1+2s)fs	52.29	52.5	52.5	52.5	-102.45	-39.79	-33.85	-48.85
(1+4s)fs	54.58	55	55.2	55.2	-107.32	-55.56	-48.74	-49.43
(1+6s)fs	57.08	57.29	57.7	57.7	-118.42	-56.74	-56.88	-50.77
(1+8s)fs	59.37	59.79	60.41	60.2	-109.29	-59.95	-62.36	-66.07
(1+10s)fs	61.66	62.29	62.91	62.91	-112.47	-64.94	-57.17	-58.87
(1+12s)fs	64.16	64.79	65.62	65.41	-112.56	-64.64	-56.33	-58.21
(1+14s)fs	66.45	67.08	68.12	67.91	-45.13	-49.43	-54.3	-54.03
(1+16s)fs	69.16	69.58	70.93	70.62	-112.89	-63.9	-57.32	-59.44
(1+18s)fs	71.25	72.08	73.33	73.12	-119.77	-72.72	-91.48	-73.93
(1+20s)fs	73.54	74.58	75.83	75.62	-131.53	-78.87	-74.39	-84.1
(1+22s)fs	75.83	77.08	78.54	78.33	-124.97	-85.53	-72.47	-69.62
(1+24s)fs	78.12	79.37	81.04	80.83	-136.57	-76.16	-78.7	-78.74
(1+26s)fs	80.2	81.87	83.75	83.33	-114.8	-68.59	-79.24	-76.79
(1+28s)fs	82.91	84.37	86.25	86.04	-57.17	-65.44	-71.95	-66.29
(1+30s)fs	85.41	86.87	88.95	88.54	-110.59	-70.07	-74.07	-73.14
(1+32s)fs	87.5	89.16	91.45	91.04	-133.19	-83.45	-80.52	-74.91
(1+34s)fs	90	91.66	94.16	93.75	-132.38	-85.9	-78.38	-86.5
(1+36s)fs	92.29	94.16	96.66	96.04	-129.27	-82.88	-83.9	-80.71
(1+38s)fs	94.79	96.66	99.37	98.75	-143.3	-81.32	-82.32	-73.91
(1+40s)fs	96.66	98.95	101.87	101.45	-110.43	-80.09	-80.01	-74.08
(1+42s)fs	99.37				-69.39			
(3-42s)fs	100.62				-74.16			
(3-40s)fs	103.33	101.45			-122.43	-74.91		
(3-38s)fs	105.83	103.95			-139.59	-79.98		
(3-36s)fs	107.7	105.83	104.37	103.95	-130.68	-86.25	-80.05	-83.81
(3-34s)fs	110.2	108.95	105.83	106.45	-134.93	-89.86	-82.51	-85.87
(3-32s)fs	112.5	110.83	108.54	108.95	-127.24	-84.17	-81.29	-80.92
(3-30s)fs	114.58	113.12	111.04	111.45	-112.88	-71.17	-70.56	72.78

(3-28s)fs	117.08	115.62	113.75	113.95	-58.5	-64.27	-68.72	-64.09
(3-26s)fs	119.79	118.12	116.25	116.66	-117.71	-67.31	-78.45	-79.26
(3-24s)fs	121.87	120.62	118.95	119.37	-129.12	-78.62	-83.81	-86.46
(3-22s)fs	124.16	123.12	121.45	121.66	-122.04	-82.8	-69.99	-70.41
(3-20s)fs	126.45	125.41	123.95	124.37	-121.45	-79.04	-69.31	-80.49
(3-18s)fs	128.75	127.91	126.66	126.87	-118.84	-70.1	-71.5	-66.77
(3-16s)fs	131.25	130.41	129.16	129.37	-11.48	-56.63	-52.93	-58.39
(3-14s)fs	133.54	132.91	131.87	132.08	-40.51	-42.87	-49.31	-46.01
(3-12s)fs	135.83	135.2	134.37	134.58	-102.59	-59.77	-47.11	-53.8
(3-10s)fs	138.33	137.7	137.08	137.08	-101.37	-54.63	-53.32	-48.87
(3-8s)fs	140.62	140.2	139.58	139.79	-103.15	-57.06	-60.27	-64.21
(3-6s)fs	142.91	142.7	142.29	142.29	-98.35	-49	-55.37	-44.45
(3-4s)fs	145.2	145	144.79	144.79	-98.79	-37.8	-32.32	-33.52
(3-2s)fs	147.7	147.5	147.5	147.5	-96.75	-34.77	-29.79	-43.9
3fs	150	150	150	150	-20.25	-19.96	-19.33	-19.64
(3+2s)fs	152.29	152.5	152.5	152.5	-104.16	-51.15	-44.03	-54.74
(3+4s)fs	154.79	155	155.2	155.2	-100.88	-55.97	-54.92	-52.58
(3+6s)fs	157.08	157.29	157.7	157.7	-117.95	63.44	-82.98	-55.66
(3+8s)fs	159.37	159.79	160.41	160.2	-106.49	-73.27	-62.65	-64.16
(3+10s)fs	161.66	162.29	162.91	162.91	-125.77	-73.2	-72.16	-76.38
(3+12s)fs	164.16	164.79	165.62	165.41	-110.18	-61.93	-55.92	-59.91
(3+14s)fs	166.45	167.08	168.12	167.91	-50.02	-55.06	-55.3	-56.21
(3+16s)fs	169.16	169.58	170.83	170.62	-11.16	-66.18	-59.58	-65.04
(3+18s)fs	171.25	172.08	173.33	173.12	-126.2	-72.73	-79.7	-73.52
(3+20s)fs	175.93	174.58	175.83	175.62	-120.99	-92.86	-81.11	-80.19
(3+22s)fs	175.83	176.87	178.54	178.33	-120.99	-81.41	-78.69	-78.12
(3+24s)fs	178.12	179.37	181.04	180.83	-127.25	-76.84	-80.71	-78.12
(3+26s)fs	180.2	181.87	183.75	183.33	-11.62	-68.41	-68.94	-74.84
(3+28s)fs	182.91	184.37	186.25	186.04	-58.26	-66.79	-74.93	-67.39
(3+30s)fs	185.62	186.87	188.95	188.54	-109.05	-71.51	-79.43	-76.79
(3+32s)fs	187.5	189.16	191.45	191.04	-132.07	-88.72	-86.96	-78.83
(3+34s)fs	190	191.66	194.16	193.54	-133.86	-93.65	-79.58	-77.82
(3+36s)fs	192.29	193.75	196.66	196.04	-128.94	-87.72	-83.12	-79.79
(3+38s)fs	194.16	196.04	199.37	198.95	-129.58	-82.66	-86.75	-78.62
(3+40s)fs	196.66	198.54	201.87	201.45	-113.59	-79.46	-83.97	-76.61
(3+42s)fs	199.37				-68			
(5-42s)fs	200.62				-73.9			
(5-40s)fs	203.33	201.45			-105.98	-76		
(5-38s)fs	205.41	203.95			-138.61	-79.05		
(5-36s)fs	207.7	205.83	204.37	203.75	-134.12	-90.08	-92.92	-82.57
(5-34s)fs	210.2	208.33	205.83	206.45	-150.02	-89.65	-93.23	-85.25

(5-32s)fs	212.5	210.83	208.54	208.95	-132.43	-99.08	-89.9	-83.92
(5-30s)fs	214.58	213.12	211.04	211.45	-111.84	-74.68	-73.32	-75.32
(5-28s)fs	217.08	215.62	213.75	213.95	-60.37	-65.79	-75.92	-68.68
(5-26s)fs	219.58	218.12	216.25	216.66	-121.39	-72.45	-74.59	-78.05
(5-24s)fs	221.87	220.62	218.95	219.37	-132.94	-88.14	-82.61	-81.02
(5-22s)fs	224.16	223.12	221.45	221.66	-136.36	-92.06	-78.86	-81.14
(5-20s)fs	226.45	225.41	223.12	224.37	-125.43	-82.84	-82.33	-78.34
(5-18s)fs	228.75	227.91	226.66	226.87	-122.07	-77.8	-82.45	-70.63
(5-16s)fs	231.04	230.41	229.16	229.37	-113.2	-63.81	-60.99	-63.54
(5-14s)fs	233.54	232.91	231.87	232.08	-47.12	-49.49	-52.65	-52.2
(5-12s)fs	235.83	235.2	234.37	234.58	-110.12	-66.89	-57	-64.43
(5-10s)fs	238.33	237.7	237.08	237.08	-111.1	-59.85	-62.9	-54.46
(5-8s)fs	240.62	240.2	239.58	239.79	-111.39	-58.24	-61.65	-59.14
(5-6s)fs	242.91	242.7	242.29	242.29	-105.75	-57.88	-52.83	-56.95
(5-4s)fs	245.2	245	244.79	244.79	-104.82	-45.92	-41.39	-40.71
(5-2s)fs	247.29	247.5	247.5	247.5	-114.54	-50.75	-46.01	-61.49
5fs	250	250	250	250	-54.06	-49.15	-45.07	-44.71
(5+2s)fs	252.29	252.5	252.5	252.5	-107.98	-59.92	-57.45	-63.52
(5+4s)fs	254.79	255	255.2	255.2	-114.63	-67.02	-70.87	-64.27
(5+6s)fs	257.08	257.29	257.7	257.7	-122.71	-71.59	-67.92	-66.95
(5+8s)fs	259.37	259.79	260.41	260.2	-121.75	-78.29	-68.88	-71.21
(5+10s)fs	261.66	262.29	262.91	262.91	-125.19	-78.6	-85.82	-71.4
(5+12s)fs	263.95	264.79	265.62	265.41	-116.3	-71.17	-80.77	-85.06
(5+14s)fs	266.45	267.08	268.12	267.91	-56.48	-60.74	-62.34	-61.03
(5+16s)fs	269.16	269.58	270.83	270.62	-100.76	-70.92	67.11	-75.31
(5+18s)fs	271.25	272.08	274.37	273.12	-110.76	-82.88	-90.18	-78.64
(5+20s)fs	273.54	274.37	276.04	275.62	-124.62	-97.39	-82.23	-93.07
(5+22s)fs	275.83	277.08	278.54	278.33	-123.93	-84.94	-91.29	-78.01
(5+24s)fs	278.12	279.37	281.04	280.83	-139.93	-79.01	-84.97	-81.34
(5+26s)fs	280.2	281.87	283.75	283.54	-110.06	-74.58	-73.16	-77.01
(5+28s)fs	282.91	284.37	286.25	286.04	-65.29	-71.61	-79.14	-72.05
(5+30s)fs	285.62	286.87	287.7	288.54	-107.68	-76.48	-84.05	-83.78
(5+32s)fs	287.5	288.75	291.45	291.25	-133.21	-95.97	-85.67	-86.45
(5+34s)fs	290	291.45	294.16	293.75	-137.63	-85.97	-82.64	-89.78
(5+36s)fs	292.29	294.16	296.66	296.04	-129.33	-90.86	-86.52	-75.7
(5+38s)fs	294.16	296.04	299.37	298.54	-132.96	-80.56	-86.52	-77.63
(5+40s)fs	296.66	298.54	301.87	301.45	-112.41	-78.16	-87.37	-79.23
(5+42s)fs	299.37				-69.82			
(7-42s)fs	300.62				-70.16			
(7-40s)fs	303.33	301.45			-108.78	-78.15		
(7-38s)fs	305.41	303.95			-133.46	-81.3		

(7-36s)fs	307.7	305.83	304.58	303.75	-131.41	-89.22	-88.38	-82.41
(7-34s)fs	310	308.33	305.83	306.25	-141.41	-87.51	-101.82	-88.23
(7-32s)fs	312.5	310.83	308.54	308.95	-128.66	-93.43	-79.33	-84.23
(7-30s)fs	314.58	313.12	311.04	311.45	-112.39	-72.32	-68.69	-74.09
(7-28s)fs	317.08	315.62	313.75	313.95	-59.09	-64.24	-70.61	-65.03
(7-26s)fs	319.79	318.12	316.25	316.45	-118.73	-70.15	-75.15	-91.69
(7-24s)fs	321.87	320.62	318.95	319.16	-124.52	-76.39	-84.38	-74.53
(7-22s)fs	324.16	323.12	321.45	319.16	-123.2	-86.84	-80.07	-74.53
(7-20s)fs	326.87	325.41	324.16	324.37	-124.82	-74.57	-84.77	-68.81
(7-18s)fs	328.75	327.91	326.66	326.87	-125.89	-69.31	-66.4	-67.53
(7-16s)fs	331.25	330.41	329.16	329.37	-111.46	-55.28	-54.27	-59.44
(7-14s)fs	333.54	332.91	331.87	332.08	-40.15	-42.5	-44.42	-44.34
(7-12s)fs	336.04	335.2	334.37	334.58	-106.96	-63.13	-56.19	-62
(7-10s)fs	338.33	337.7	337.08	337.08	-125.19	-62.57	-71.73	-58.71
(7-8s)fs	340.62	340.2	339.58	339.79	-110.88	-51.27	-54.04	-49.43
(7-6s)fs	342.91	342.7	342.29	342.29	-107.24	-51.44	-50.93	-50.05
(7-4s)fs	345.2	345	344.79	344.79	-110.62	-59.92	-50.93	-53.42
(7-2s)fs	347.7	347.5	347.5	347.5	-106.16	-56.49	-55.17	-70.4
7fs	350	350	350	350	-41.74	-43.06	-45.35	-44.94
(7+2s)fs	352.29	352.5	352.5	352.5	-116.37	-66.58	-62.8	-65.08
(7+4s)fs	354.79	355	355.2	355.2	-116.91	-73.55	-77.85	-67.99
(7+6s)fs	357.08	357.29	357.7	357.7	-128.75	-82.05	-76.29	-75.78
(7+8s)fs	359.37	359.79	360.41	360.2	-123.66	-87.83	-74.62	-78.2
(7+10s)fs	361.66	362.29	362.91	362.91	-138.6	-85.17	-79.04	-83.21
(7+12s)fs	363.75	364.79	365.62	365.41	-113.25	-75.83	-72.69	-75.03
(7+14s)fs	366.45	367.08	368.12	367.91	-55.83	-60.62	-66.01	-63.12
(7+16s)fs	369.16	369.58	370.83	370.62	-113.41	-72.11	-69.68	-72.83
(7+18s)fs	371.25	372.08	373.33	373.12	-130.37	-87.35	-94.85	-79.16
(7+20s)fs	373.54	374.58	376.04	375.62	-124.4	-99.21	-84.04	-89.93
(7+22s)fs	375.83	377.08	378.54	378.33	-125.02	-89.15	-101.4	-77.99
(7+24s)fs	378.23	379.37	381.25	380.83	-138.37	-86.23	-101.18	-84.28
(7+26s)fs	380.2	381.87	383.75	383.33	-102.18	-80.3	-74.96	-76.46
(7+28s)fs	382.91	384.37	386.25	386.04	-67.83	-71.68	-82.15	-75.93
(7+30s)fs	385.62	386.87	387.7	388.54	-109.63	-78.42	-92.55	-82.59
(7+32s)fs	387.5	388.95	391.45	391.25	-133.68	-92.16	-83.79	-91.93
(7+34s)fs	389.37	391.87	394.16	393.75	-132.53	-95.13	-85	88.67
(7+36s)fs	392.29	394.16	396.66	396.04	-129.7	-91.43	-87.14	-79.82
(7+38s)fs	394.58	396.04	399.37	398.95	-139.67	-86.26	-89.02	-84.93
(7+40s)fs	396.66	398.54			-117.34	-83.86		
	399.37				-72.47			

Πίνακας 9.1 Σύνολο αρμονικών φάσματος φασικού ρεύματος στάτη φάσης Α ανά περίπτωση.

Από την πληθώρα των αρμονικών που παρουσιάστηκαν παραπάνω το μεγαλύτερο διαγνωστικό συμπέρασμα μπορούμε να το βγάλουμε παρατηρώντας τις αρμονικές που εμφανίζονται κοντά και γύρω από τα 50, 150, 250, 350Hz. Συγκεκριμένα επικεντρωνόμαστε στα παρακάτω δεδομένα.

Υπογραφή	Συχνότητα Υγιής Κινητήρας (Hz)	Συχνότητα. Σπασμένη Μπάρα (Hz)	Συχνότητα. Δύο Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (Hz)	Συχνότητα. Δύο Μη Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (Hz)	Πλάτος Αρμονικής. Υγιής Κινητήρας (db)	Πλάτος Αρμονικής. Σπασμένη Μπάρα (db)	Πλάτος Αρμονικής. Δύο Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (db)	Πλάτος Αρμονικής. Δύο Μη Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (db)
(1-6s)fs	42.91	42.7	42.29	42.29	-134.9	-52.44	-52.63	-46.26
(1-4s)fs	45.41	45	44.79	44.79	-118.7	-60.95	-67.83	-45.49
(1-2s)fs	47.7	47.5	47.5	47.5	-97.71	-35.76	-30.03	-38.92
(1+2s)fs	52.29	52.5	52.5	52.5	-102.45	-39.79	-33.85	-48.85
(1+4s)fs	54.58	55	55.2	55.2	-107.32	-55.56	-48.74	-49.43
(1+6s)fs	57.08	57.29	57.7	57.7	-118.42	-56.74	-56.88	-50.77

(3-6s)fs	142.91	142.7	142.29	142.29	-98.35	-49	-55.37	-44.45
(3-4s)fs	145.2	145	144.79	144.79	-98.79	-37.8	-32.32	-33.52
(3-2s)fs	147.7	147.5	147.5	147.5	-96.75	-34.77	-29.79	-43.9
3fs	150	150	150	150	-20.25	-19.96	-19.33	-19.64
(3+2s)fs	152.29	152.5	152.5	152.5	-104.16	-51.15	-44.03	-54.74
(3+4s)fs	154.79	155	155.2	155.2	-100.88	-55.97	-54.92	-52.58
(3+6s)fs	157.08	157.29	157.7	157.7	-117.95	-63.44	-82.98	-55.66

(5-6s)fs	242.91	242.7	242.29	242.29	-105.75	-57.88	-52.83	-56.95
(5-4s)fs	245.2	245	244.79	244.79	-104.82	-45.92	-41.39	-40.71
(5-2s)fs	247.29	247.5	247.5	247.5	-114.54	-50.75	-46.01	-61.49
5fs	250	250	250	250	-54.06	-49.15	-45.07	-44.71
(5+2s)fs	252.29	252.5	252.5	252.5	-107.98	-59.92	-57.45	-63.52
(5+4s)fs	254.79	255	255.2	255.2	-114.63	-67.02	-70.87	-64.27
(5+6s)fs	257.08	257.29	257.7	257.7	-122.71	-71.59	-67.92	-66.95

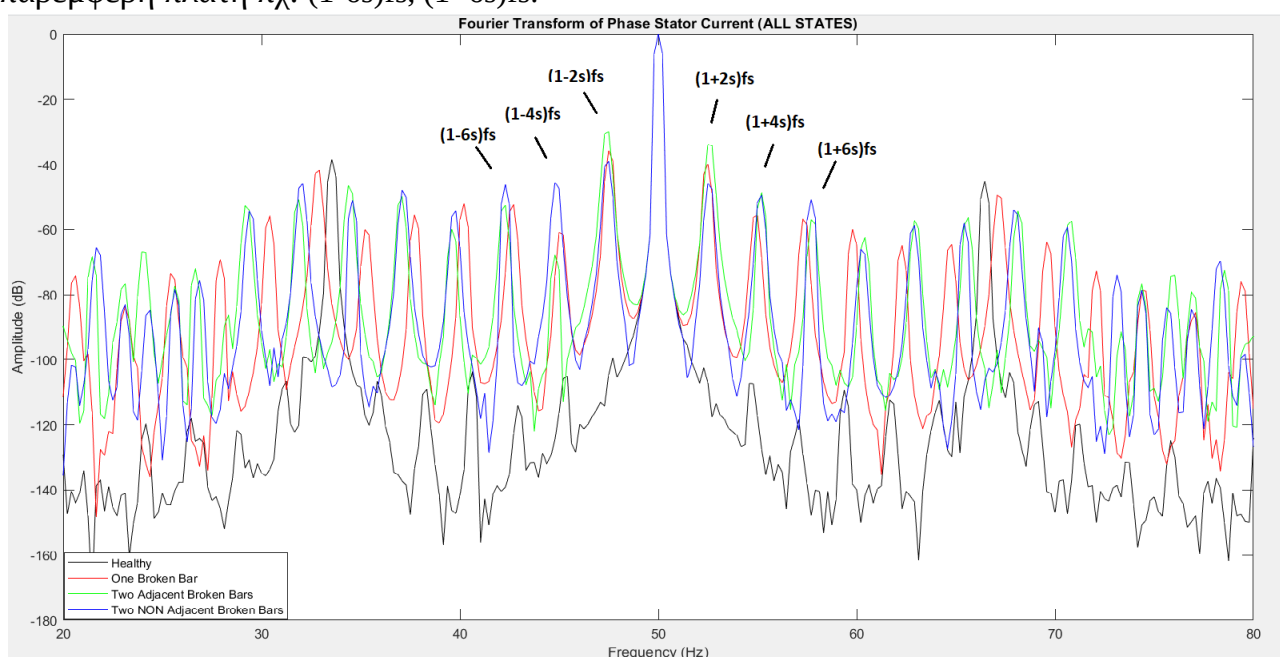
(7-6s)fs	342.91	342.7	342.29	342.29	-107.24	-51.44	-50.93	-50.05
(7-4s)fs	345.2	345	344.79	344.79	-110.62	-59.92	-50.93	-53.42
(7-2s)fs	347.7	347.5	347.5	347.5	-106.16	-56.49	-55.17	-70.4
7fs	350	350	350	350	-41.74	-43.06	-45.35	-44.94
(7+2s)fs	352.29	352.5	352.5	352.5	-116.37	-66.58	-62.8	-65.08
(7+4s)fs	354.79	355	355.2	355.2	-116.91	-73.55	-77.85	-67.99
(7+6s)fs	357.08	357.29	357.7	357.7	-128.75	-82.05	-76.29	-75.78

Πίνακας 9.2 Αρμονικές ενδιαφέροντος για την διάγνωση σφάλματος σπασμένης μπάρας.

Πρώτο συμπέρασμα που εξαγούμε είναι πως, σε κάθε περίπτωση, η διαφορά του μεγέθους των sideband αρμονικών της υγιούς μηχανής συγκριτικά με τις περιπτώσεις που έχουμε σφάλμα είναι χαώδης και δεν αφήνει περιθώρια παρερμηνείας. Η τρίτη και η έβδομη αρμονική του στάτη δεν παρουσιάζει μεγάλες διαφορές ανά περίπτωση ενώ στην πέμπτη έχουμε μία αύξηση 5 και 10 db ανάλογα το μέγεθος του σφάλματος.

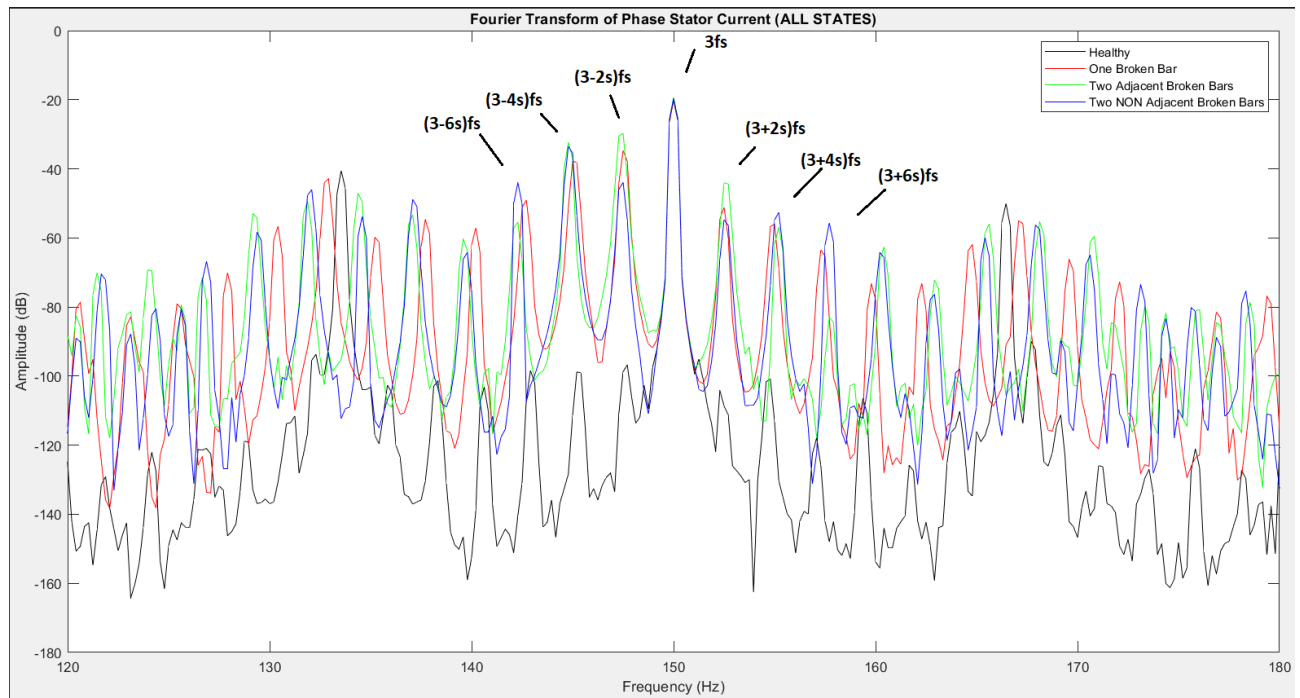
Συγκρίνοντας τα σφάλματα μεταξύ τους βλέπουμε πως γύρω στις γειτονικές αρμονικές της θεμελιώδους συχνότητας, της 3ης, της 5ης αλλά και της 7ης αρμονικής εμφανίζεται ένα μοτίβο κατά το οποίο το πλάτος των αρμονικών στην περίπτωση των δύο γειτονικών σπασμένων μπαρών είναι μεγαλύτερο από την περίπτωση της μίας σπασμένης μπάρας, με την αύξηση αυτή να κυμαίνεται από 1.5 έως 7 db, ενώ στην περίπτωση των μη γειτονικών σπασμένων μπαρών οι αρμονικές εμφανίζουν πλάτος μικρότερο ακόμη και από την περίπτωση της μιας σπασμένης μπάρας. Ειδικότερα σε όλες τις συχνότητες πλην της $(7+2s)fs$ οι αρμονικές της μιας σπασμένης μπάρας έχουν μεγαλύτερο μέγεθος, από 3 μέχρι 12 db συγκριτικά με αυτές των μη γειτονικών σπασμένων μπαρών.

Όσο απομακρυνόμαστε από τη θεμελιώδη συχνότητα, την 3η, την 5η αλλά και την 7η αρμονική το ύψος των αρμονικών πέφτει και το μοτίβο που αναφέραμε δεν εμφανίζεται πλέον. Γενικότερα δεν εντοπίζεται κάποιο νέο μοτίβο που να καλύπτει το σύνολο των αρμονικών. Στην πλειονότητα τους μπορούμε να πούμε πως το πλάτος αυξάνεται παράλληλα με την σοβαρότητα του σφάλματος ενώ τα πλάτη μεταξύ των δύο περιπτώσεων διπλής σπασμένης μπάρας έχουν μικρές διαφορές πχ. $(1+4s)fs$, $(3-4s)fs$, $(3+4s)fs$, $(5-4s)fs$, $(5+6s)fs$, $(7+6s)fs$. Όμως αρκετές είναι οι περιπτώσεις που το παραπάνω δεν ακολουθείται και αντίθετα το πλάτος των αρμονικών στο παράδειγμα των δυο γειτονικών σπασμένων μπαρών εμφανίζεται μικρότερο από τα άλλα δύο με την διαφορά από την περίπτωση των μη γειτονικών σπασμένων μπαρών να είναι μάλιστα σημαντική πχ. $(1-4s)fs$, $(3-6s)fs$, $(3+6s)fs$, $(5+4s)fs$, $(7+4s)fs$. Ακόμη έχουμε αρμονικές στις οποίες σημαντική διαφοροποίηση υπάρχει μονάχα στην περίπτωση των δύο μη γειτονικών σπασμένων μπαρών με το πλάτος να εμφανίζεται αυξημένο σε σχέση με τις άλλες δύο εσφαλμένες περιπτώσεις που έχουν παρεμφερή πλάτη πχ. $(1-6s)fs$, $(1+6s)fs$.

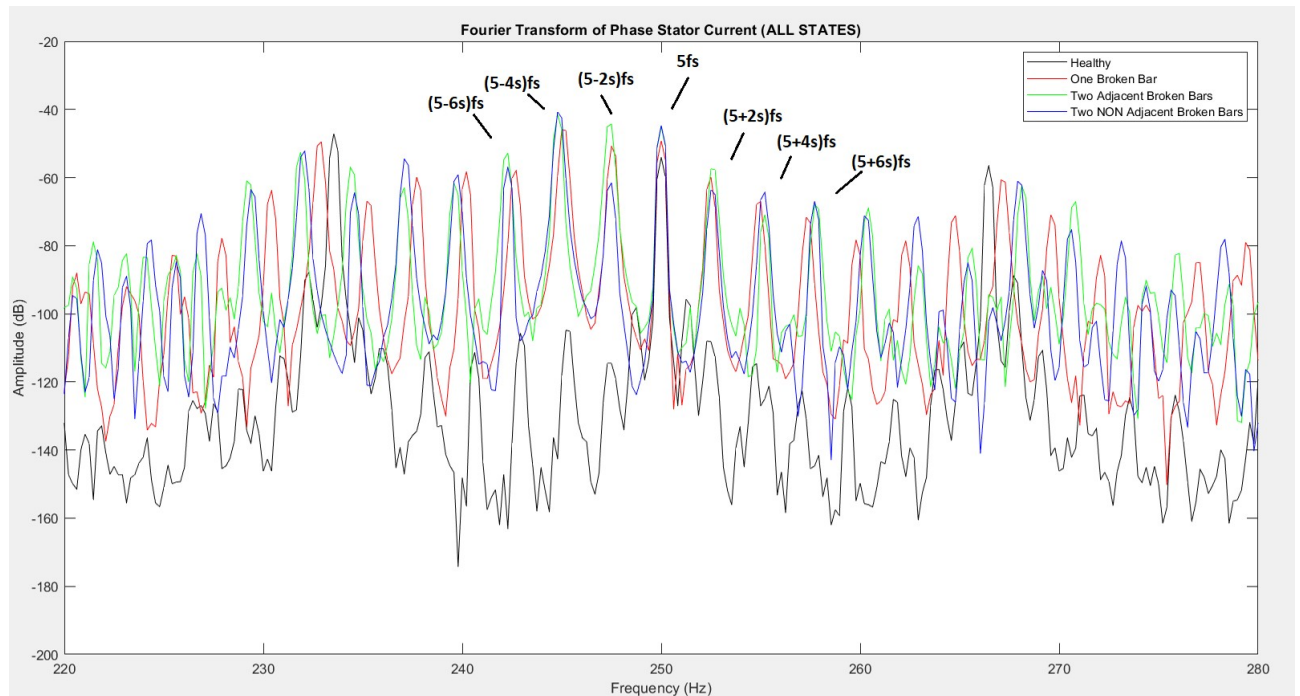


Εικόνα 9.1 Συγκεντρωτικά φάσματα φασικού ρεύματος στάτη φάσης Α για όλες τις περιπτώσεις στις

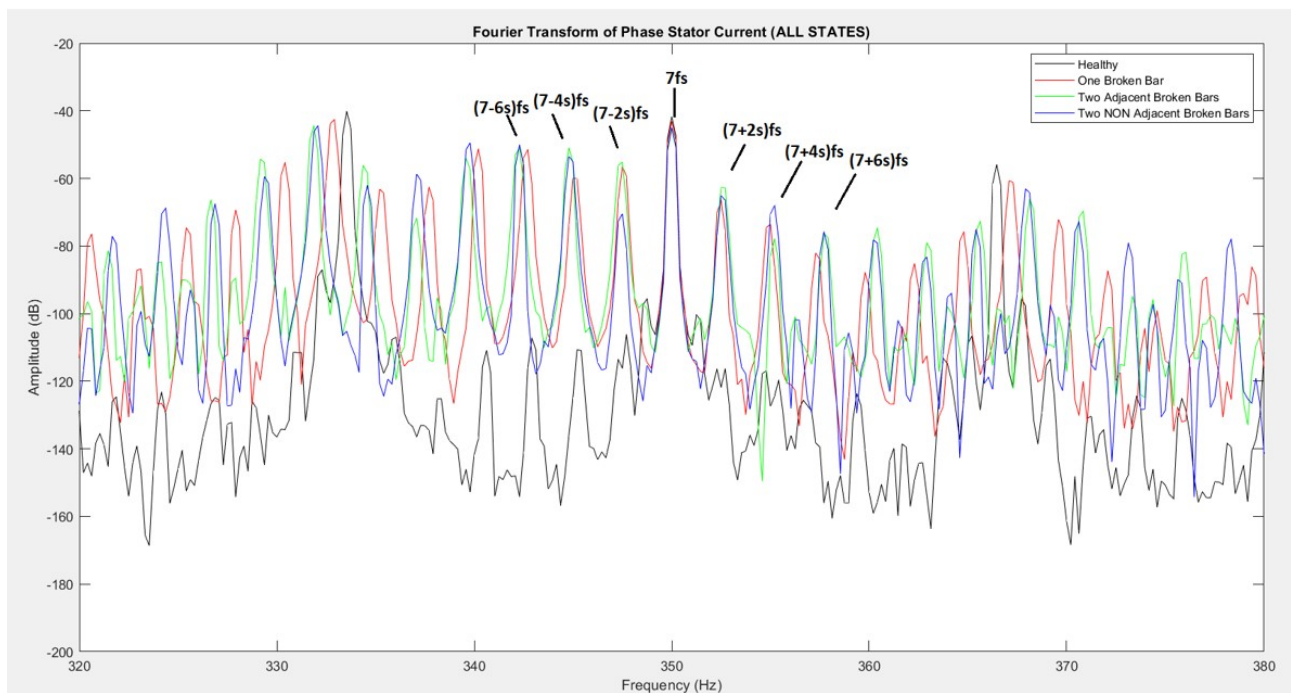
συχνότητες 20-80 Hz.



Εικόνα 9.2 Συγκεντρωτικά φάσματα φασικού ρεύματος στάτη φάσης A για όλες τις περιπτώσεις στις συχνότητες 120-180 Hz.



Εικόνα 9.3 Συγκεντρωτικά φάσματα φασικού ρεύματος στάτη φάσης A για όλες τις περιπτώσεις στις συχνότητες 220-280 Hz.



Εικόνα 9.4 Συγκεντρωτικά φάσματα φασικού ρεύματος στάτη φάσης Α για όλες τις περιπτώσεις στις συχνότητες 320-380 Hz.

Η ίδια ανάλυση πραγματοποιείται στο ρεύμα γραμμής του στάτη. Η πηγές τάσης είναι συνδεδεμένες σε αστέρα οπότε η τρίτη αρμονική του ρεύματος και οι υπόλοιπες γύρω της παραλείπονται.

Υπογραφή	Συχνότητα Υγιής Κινητήρας (Hz)	Συχνότητα. Σπασμένη Μπάρα (Hz)	Συχνότητα. Δύο Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (Hz)	Συχνότητα. Δύο Μη Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (Hz)	Πλάτος Αρμονικής. Υγιής Κινητήρας (db)	Πλάτος Αρμονικής. Σπασμένη Μπάρα (db)	Πλάτος Αρμονικής. Δύο Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (db)	Πλάτος Αρμονικής. Δύο Μη Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (db)
(1-42s)fs	0.62				-97.59			
(1-40s)fs	3.33	1.45			-119.69	-97.09		
(1-38s)fs	5.83	3.95	0.62	1.45	-136.47	-93.56	-106.54	-95.16
(1-36s)fs	7.7	5.83	3.33	3.95	-135.09	-91.18	-98.4	-95.51
(1-34s)fs	10.62	8.33	5.83	6.45	-140.93	93.05	-86.58	-96.35
(1-32s)fs	12.5	10.83	8.54	8.95	-138.07	-85.63	-87.24	-80.38
(1-30s)fs	14.79	13.12	11.04	11.45	-123.24	-71.14	-73.27	-75.11
(1-28s)fs	17.08	15.62	13.75	13.95	-56.37	-64.1	-69.54	-65.55
(1-26s)fs	19.58	18.12	16.25	16.66	-117.2	-65.73	-81.75	-78.37
(1-24s)fs	21.87	20.62	18.95	19.16	-137.63	-73.95	-83.05	-75.03
(1-22s)fs	24.16	23.12	21.45	21.66	-119.62	-89.12	-68.26	-65.59

(1-20s)fs	26.87	25.41	23.95	24.37	-121.57	-73.46	-66.84	-85.42
(1-18s)fs	28.75	27.91	26.66	26.87	-121.48	-69.06	-72.04	-75.82
(1-16s)fs	31.25	30.41	29.16	29.37	-106.81	-55.48	-52.7	-54.28
(1-14s)fs	33.54	32.91	31.87	32.08	-38.38	-41.8	-50.71	-45.83
(1-12s)fs	35.83	35.2	34.37	34.58	-106.58	-60.02	-46.54	-50.94
(1-10s)fs	38.33	37.7	37.08	37.08	-109.07	-55.48	-49.88	-47.94
(1-8s)fs	40.62	40.2	39.58	39.79	-103.85	-52.13	-59.86	-54.34
(1-6s)fs	42.91	42.7	42.29	42.29	-113.63	-52.47	-52.68	-46.28
(1-4s)fs	45.41	45	44.79	44.79	-105.05	-61.05	-67.24	-45.52
(1-2s)fs	47.7	47.5	47.5	47.5	-99.43	-35.79	-30.07	-38.95
(1+2s)fs	52.29	52.5	52.5	52.5	-102.47	-39.8	-33.86	-45.85
(1+4s)fs	54.58	55	55.2	55.2	-107.23	-55.64	-48.81	-49.51
(1+6s)fs	57.08	57.29	57.7	57.7	-118.5	-56.74	-56.85	-50.78
(1+8s)fs	59.37	59.29	60.41	60.2	-109.34	-59.94	-62.37	-65.92
(1+10s)fs	61.66	62.29	62.91	62.91	-2.24	-65.02	-57.21	-58.93
(1+12s)fs	64.16	64.79	65.62	65.41	-112.53	-64.68	-56.37	-58.27
(1+14s)fs	66.45	67.08	68.12	67.91	-45.17	-49.47	-54.33	-54.09
(1+16s)fs	69.16	69.58	70.93	70.62	-113.3	-63.82	-57.35	-59.48
(1+18s)fs	71.25	72.08	73.33	73.12	-119.82	-72.77	-91.73	-74.05
(1+20s)fs	73.54	74.58	75.83	75.62	-129.47	-79.17	-74.45	-84.51
(1+22s)fs	75.83	77.08	78.54	78.33	-124.99	-85.24	-72.47	-69.7
(1+24s)fs	78.12	79.37	81.04	80.83	-135.29	-76.67	-78.79	-79.06
(1+26s)fs	80.62	81.87	83.75	83.33	-124.4	-68.52	-78.99	-77.87
(1+28s)fs	82.91	84.37	86.25	86.04	-57.13	-65.36	-72.01	-66.23
(1+30s)fs	85.62	86.87	88.95	88.54	-111.48	-70.06	-74.02	-73.32
(1+32s)fs	87.5	89.16	91.45	91.04	-132.06	-83.39	-80.59	-76.22
(1+34s)fs	90	91.66	94.16	93.75	-131.75	-86.13	-78.33	-85.9
(1+36s)fs	92.29	94.16	96.66	96.25	-128.41	-82.71	-84.04	-95.18
(1+38s)fs	94.58	96.66	99.37	98.95	-143.16	-81.18	-82.34	-80.04
(1+40s)fs	96.66	99.16			-120.74	-80.3		
(1+42s)fs	99.37				-69.25			
(5-42s)fs	200.62				-74.21			
(5-40s)fs	203.33	201.04	200.62		-116.75	-83.66	-91.19	
(5-38s)fs	205.41	203.33	201.87	201.25	-139.12	-85.59	-97.65	-89.62
(5-36s)fs	207.7	205.83	203.95	203.75	-134.38	-90.97	-97.09	-85.19
(5-34s)fs	210.41	208.33	205.83	206.25	-140.21	-90.18	-94.28	-89.49
(5-32s)fs	212.5	210.62	208.54	208.95	-134	-104.55	-90.31	-84
(5-30s)fs	214.58	213.12	211.04	211.45	-112.37	-75.04	-73.65	-75.79
(5-28s)fs	217.08	215.62	213.75	213.95	-60.65	-66.12	-76.39	-69.14
(5-26s)fs	219.58	218.12	216.25	216.66	-121.49	-73.28	-74.77	-78.55
(5-24s)fs	221.87	220.62	218.95	219.16	-133.22	-89.64	-82.64	-84.74

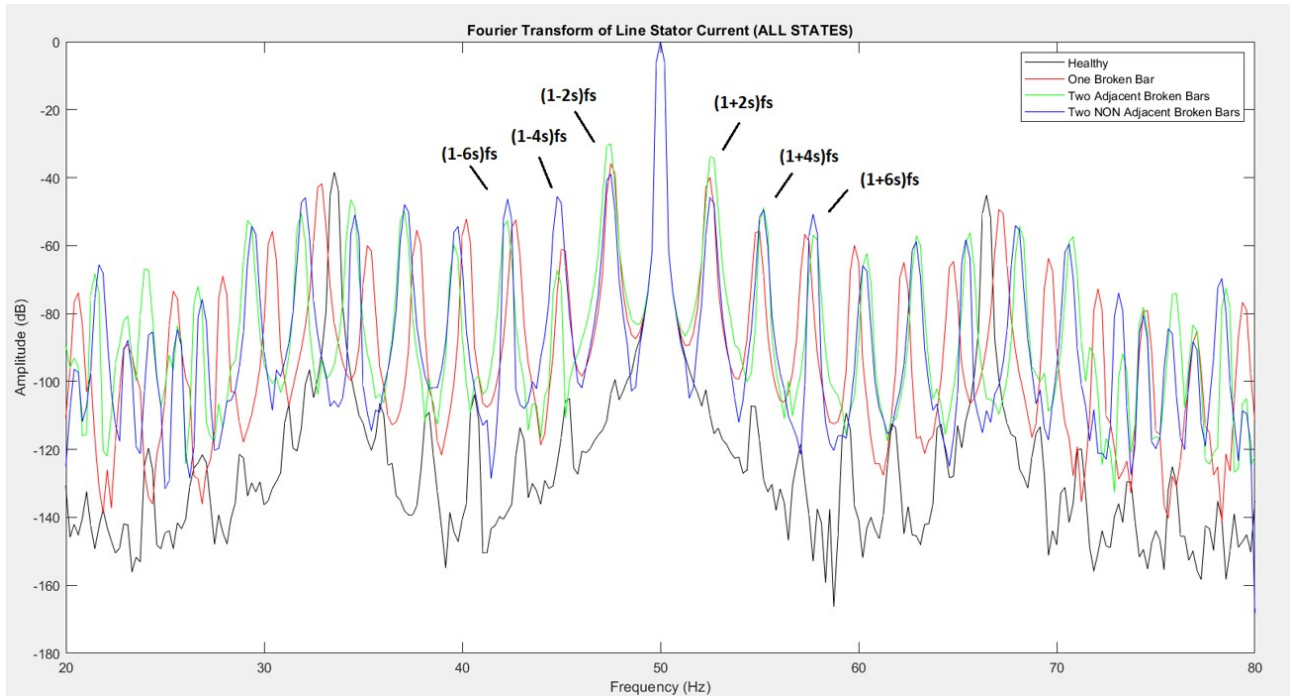
(5-22s)fs	224.16	222.91	221.45	221.66	-134.47	-99.11	-79.09	-81.34
(5-20s)fs	226.45	225.41	223.95	224.37	-122.14	-84.25	-83.99	-77.8
(5-18s)fs	228.75	227.91	226.66	226.87	-122.25	-77.94	-82.04	-70.66
(5-16s)fs	231.04	230.41	229.16	229.37	-112.02	-63.97	-61.15	-63.66
(5-14s)fs	233.54	232.91	231.87	232.08	-47.32	-49.7	-51.88	-52.46
(5-12s)fs	235.83	235.2	234.37	234.58	-110.45	-66.75	-57.06	-64.61
(5-10s)fs	238.33	237.7	237.08	237.08	-110.95	-59.98	-62.88	-54.6
(5-8s)fs	240.62	240.2	239.58	239.79	-111.61	-58.4	-61.79	-59.24
(5-6s)fs	242.91	242.7	242.29	242.29	-105.11	-58.44	-53.13	-57.63
(5-4s)fs	245.2	245	244.79	244.79	-105.17	-45.93	-41.42	-40.71
(5-2s)fs	247.29	247.5	247.5	247.5	-111.77	-50.79	-45.29	-61.5
5fs	250	250	250	250	-54.52	-49.42	-45.29	-44.93
(5+2s)fs	252.29	252.5	252.5	252.5	-108.3	60.02	-57.42	-63.62
(5+4s)fs	254.79	255	255.2	255.2	-114.95	-67.11	-70.75	-64.33
(5+6s)fs	257.08	257.29	257.7	257.7	-122.07	-71.73	-67.98	-66.95
(5+8s)fs	259.37	259.79	260.41	260.2	-122.54	-78.58	-68.91	-71.38
(5+10s)fs	261.66	262.29	262.91	262.91	-125.06	-78.72	-85.69	-71.51
(5+12s)fs	263.95	264.79	265.62	265.41	-114.98	-71.45	-81.24	-85.97
(5+14s)fs	266.45	267.08	268.12	267.91	-56.58	-61.02	-62.5	-61.32
(5+16s)fs	269.16	269.58	270.83	270.62	-128.25	-71.04	-67.31	-75.55
(5+18s)fs	271.25	272.08	273.33	273.12	-123.88	-83.27	-95.77	-78.53
(5+20s)fs	273.54	273.95	276.04	275.62	-125.22	-97.7	-82.28	-92.79
(5+22s)fs	275.83	277.08	278.54	278.33	-124.12	-85.48	-91.05	-78.1
(5+24s)fs	278.12	279.37	281.04	280.83	-140.43	-78.87	-84.82	-79.96
(5+26s)fs	280.2	281.87	283.75	283.54	-108.65	-74.67	-73.32	-77.38
(5+28s)fs	282.91	284.37	286.25	286.04	-65.49	-71.92	-79.09	-72.08
(5+30s)fs	285.62	286.87	288.95	288.54	-125.62	-76.67	-90.61	-82.65
(5+32s)fs	287.5	288.75	291.45	291.04	-134.99	-96.44	-85.8	-86.12
(5+34s)fs	290	291.45	294.16	293.75	-139.15	-87.54	-82.65	-86.87
(5+36s)fs	292.29	294.16	296.66	296.04	-129.46	-89.35	-83.46	-75.36
(5+38s)fs	294.16	296.04	299.37	298.54	-134.86	-80.74	-86.6	-76.51
(5+40s)fs	296.66	298.54	301.87		-112.18	-77.99	-87.49	
(5+42s)fs	299.37		304.58		-69.87		-88.24	
(7-42s)fs	300.62				-70.12			
(7-40s)fs	303.33	301.04			-109.01	-78.07		
(7-38s)fs	305.41	303.33	300.62	301.45	-133.43	-81.19	-86.64	-79.13
(7-36s)fs	307.7	305.83	303.33	303.75	-131.09	-89.38	-91.62	-83.55
(7-34s)fs	310	308.33	305.83	306.45	-146.07	-87.98	-100.44	-87.14
(7-32s)fs	312.5	310.83	308.54	308.95	-128.71	-93.41	-79.31	-83.07
(7-30s)fs	314.58	313.12	311.04	311.45	-127.61	-72.34	-68.77	-74.13
(7-28s)fs	317.08	315.62	313.75	313.95	-59.18	-64.37	-70.64	-65.18

(7-26s)fs	319.79	318.12	316.25	316.87	-118.95	-70.14	-75.33	-90.34
(7-24s)fs	321.87	320.62	318.95	319.16	-124.59	-76	-84.89	-74.21
(7-22s)fs	324.16	323.12	321.45	321.66	-122.71	-87.24	-81.34	-77.17
(7-20s)fs	326.45	325.41	324.16	324.37	-127.62	-74.55	-85.19	-68.44
(7-18s)fs	328.75	327.91	326.66	326.87	-126.16	-69.31	-66.28	-67.6
(7-16s)fs	331.25	330.41	329.16	329.37	-112.75	-55.25	-54.23	-59.4
(7-14s)fs	333.54	332.91	331.87	332.08	-40.1	-42.45	-44.35	-44.26
(7-12s)fs	335.83	335.2	334.37	334.58	-107.52	-63.14	-56.15	-62.03
(7-10s)fs	338.12	337.7	337.08	337.08	-127.38	-62.55	-72.16	-58.65
(7-8s)fs	340.62	340.2	339.58	339.79	-110.57	-51.28	-54.27	-49.47
(7-6s)fs	342.91	342.7	342.29	342.29	-107.84	-51.6	-51.12	-50.24
(7-4s)fs	345.2	345	344.79	344.79	-111.02	-59.85	-50.91	-53.38
(7-2s)fs	347.7	347.5	347.5	347.5	-105.91	-56.52	-55.18	-70.4
7fs	350	350	350	350	-41.8	-43.12	-45.46	-45.02
(7+2s)fs	352.29	352.5	352.5	352.5	-113.81	-66.56	-62.6	-65.1
(7+4s)fs	354.79	355	355.2	355.2	-116.77	-73.48	-77.99	-68.04
(7+6s)fs	356.87	357.29	357.7	357.7	-126.25	-82.79	-76.41	-75.79
(7+8s)fs	359.37	359.79	360.41	360.2	-123.47	-87.84	-74.74	-78.53
(7+10s)fs	361.66	362.29	362.91	362.91	-138.19	-84.6	-78.95	-83.67
(7+12s)fs	364.16	364.79	365.62	365.41	-119.45	-75.83	-72.61	-74.89
(7+14s)fs	366.45	367.08	368.12	367.91	-55.91	-60.74	-66.1	-63.21
(7+16s)fs	369.16	369.58	370.83	370.62	-113.51	-72.01	-69.73	-72.85
(7+18s)fs	371.25	372.08	373.33	373.12	-129.98	-86.71	-95.17	-79.12
(7+20s)fs	373.54	374.58	376.04	375.62	-124.55	-96.4	-81.9	-89.6
(7+22s)fs	375.83	377.08	378.54	378.33	-125.14	-88.73	-101.02	-78.01
(7+24s)fs	378.12	379.37	381.25	380.83	-139.17	-86.53	-101.92	-83.62
(7+26s)fs	380.2	381.87	383.75	383.33	-124.28	-80.26	-75.07	-76.27
(7+28s)fs	382.91	384.37	386.25	386.04	-67.97	-71.85	-83.52	-76.08
(7+30s)fs	385.62	386.87	388.95	388.54	-110.29	-78.46	-95.14	-85.4
(7+32s)fs	387.7	389.37	391.45	391.25	-131.77	-99.19	-83.72	-90.96
(7+34s)fs	390	391.66	394.16	393.75	-137.73	-93.04	-85.11	-86.7
(7+36s)fs	392.29	394.16	396.66	396.25	-129.71	-90.64	-87.27	-89.63
(7+38s)fs	394.58	396.66	399.37	398.95	-139.96	-91.07	-89.07	-84
(7+40s)fs	393.87	398.54			-135.69	-87.94		
(7+42s)fs	399.37				-72.64			

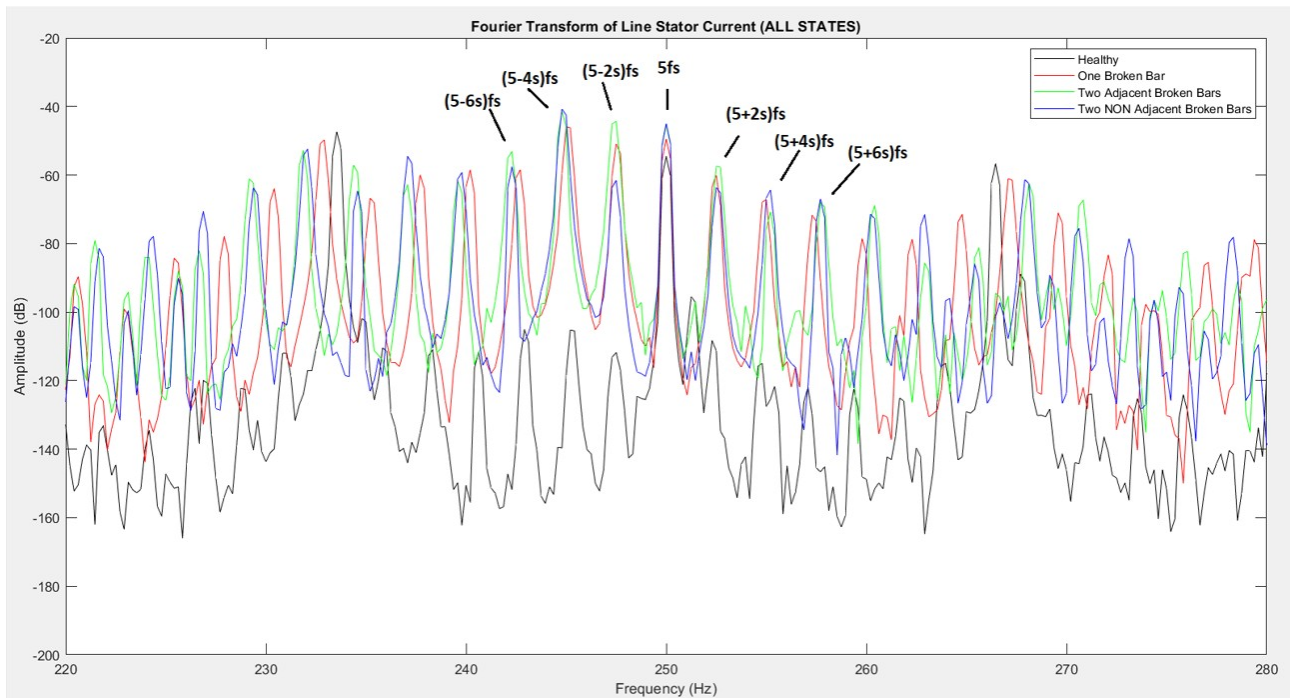
Πίνακας 9.3 Σύνολο αρμονικών φάσματος ρεύματος γραμμή στάτη φάσης Α ανά περίπτωση.

Γίνεται αντιληπτό πως πέρα από την επίδραση της συνδεσμολογίας αστέρα των πηγών, το φάσμα του ρεύματος γραμμής έχει σχεδόν πανομοιότυπη μορφή, ιδιαίτερα κοιτώντας τις αρμονικές ενδιαφέροντος γύρω από τα 50, 250, 350Hz και εξάγονται τα ίδια συμπεράσματα ως προς την σύγκριση της υγιούς κατάστασης με τις εσφαλμένες αλλά και των δεύτερων μεταξύ τους. Παρακάτω δίνονται εικόνες του φάσματος του ρεύματος

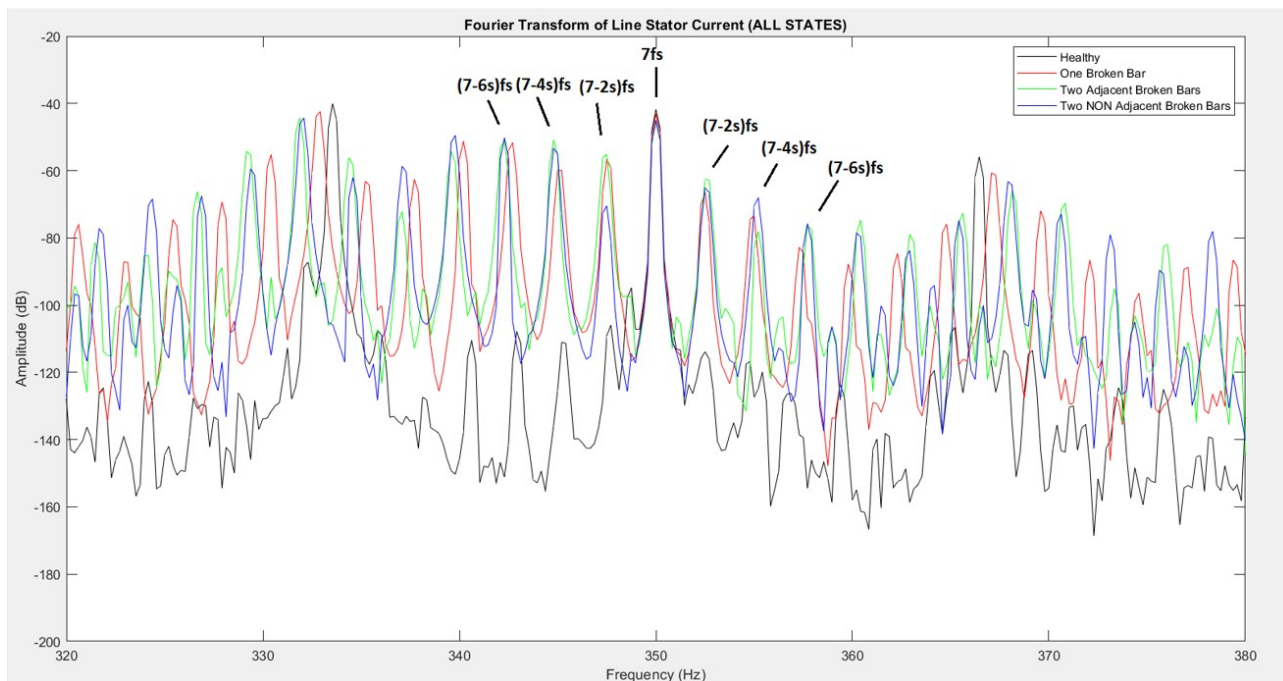
γραμμής για κάθε περίπτωση σε διάφορες συχνότητες, υπογραμμίζοντας τις αρμονικές ενδιαφέροντος καθώς και πίνακας με τα αναλυτικά μεγέθη αυτών.



Εικόνα 9.5 Συγκεντρωτικά φάσματα ρεύματος γραμμής στάτη φάσης Α για όλες τις περιπτώσεις στις συχνότητες 20-80 Hz.



Εικόνα 9.6 Συγκεντρωτικά φάσματα ρεύματος γραμμής στάτη φάσης Α για όλες τις περιπτώσεις στις συχνότητες 220-280 Hz.



Εικόνα 9.7 Συγκεντρωτικά φάσματα ρεύματος γραμμής στάτη φάσης Α για όλες τις περιπτώσεις στις συχνότητες 320-380 Hz.

Υπογραφή	Συχνότητα Υγιούς Κινητήρα (Hz)	Συχνότητα. Σπασμένη Μπάρα (Hz)	Συχνότητα. Δύο Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (Hz)	Συχνότητα. Δύο Μη Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (Hz)	Πλάτος Αρμονικής. Υγιούς Κινητήρα (db)	Πλάτος Αρμονικής. Σπασμένη Μπάρα (db)	Πλάτος Αρμονικής. Δύο Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (db)	Πλάτος Αρμονικής. Δύο Μη Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (db)
(1-6s)fs	42.91	42.7	42.29	42.29	-113.63	-52.47	-52.68	-46.28
(1-4s)fs	45.41	45	44.79	44.79	-105.05	-61.05	-67.24	-45.52
(1-2s)fs	47.7	47.5	47.5	47.5	-99.43	-35.79	-30.07	-38.95
(1+2s)fs	52.29	52.5	52.5	52.5	-102.47	-39.8	-33.86	-45.85
(1+4s)fs	54.58	55	55.2	55.2	-107.23	-55.64	-48.81	-49.51
(1+6s)fs	57.08	57.29	57.7	57.7	-118.5	-56.74	-56.85	-50.78

(5-6s)fs	242.91	242.7	242.29	242.29	-105.11	-58.44	-53.13	-57.63
(5-4s)fs	245.2	245	244.79	244.79	-105.17	-45.93	-41.42	-40.71
(5-2s)fs	247.29	247.5	247.5	247.5	-111.77	-50.79	-45.29	-61.5
5fs	250	250	250	250	-54.52	-49.42	-45.29	-44.93
(5+2s)fs	252.29	252.5	252.5	252.5	-108.3	60.02	-57.42	-63.62
(5+4s)fs	254.79	255	255.2	255.2	-114.95	-67.11	-70.75	-64.33
(5+6s)fs	257.08	257.29	257.7	257.7	-122.07	-71.73	-67.98	-66.95

(7-6s)fs	342.91	342.7	342.29	342.29	-107.84	-51.6	-51.12	-50.24
(7-4s)fs	345.2	345	344.79	344.79	-111.02	-59.85	-50.91	-53.38
(7-2s)fs	347.7	347.5	347.5	347.5	-105.91	-56.52	-55.18	-70.4
7fs	350	350	350	350	-41.8	-43.12	-45.46	-45.02
(7+2s)fs	352.29	352.5	352.5	352.5	-113.81	-66.56	-62.6	-65.1
(7+4s)fs	354.79	355	355.2	355.2	-116.77	-73.48	-77.99	-68.04
(7+6s)fs	356.87	357.29	357.7	357.7	-126.25	-82.79	-76.41	-75.79

Πίνακας 9.4 Αρμονικές ενδιαφέροντος για την διάγνωση σφάλματος σπασμένης μπάρας.

9.3 Παρακολούθηση Stray Flux στην Μόνιμη Κατάσταση

Σε προηγούμενη ενότητα δείξαμε ότι το φάσμα της μαγνητικής ροή σε περίπτωση σπασμένης μπάρας εμφανίζει αρμονικές. Συγκεκριμένα παίρνοντας τον FFT της τάσης που επάγεται στα άκρα του αισθητήρα εντοπίζονται αρμονικές, σε συχνότητες όμοιες με αυτές του ρεύματος, $f_{bb} = (1 \pm 2 \cdot s \cdot k) \cdot f_s$, $f_{bb2} = [\frac{k}{p} \cdot (1-s) \pm s] \cdot f_s$ αλλά και σε επιπλέον συχνότητες που σχετίζονται με την μηχανική ταχύτητα, $f_{bb3} = [n \pm m \cdot \frac{(1-s)}{p}] \cdot f_s$

$$f_{bb4} = [n \pm m \cdot \frac{(1-s)}{p} + 2 \cdot k \cdot s] \cdot f_s .$$

Παρακάτω επισυνάπτονται το φάσμα της stray flux, σε διάφορες συχνότητες, για όλες τις περιπτώσεις λειτουργίας της μηχανής, καθώς και πίνακες με στοιχεία για την θέση και το πλάτος κάθε αρμονικής. Η ανάλυση γίνεται μέχρι τα 300Hz, συχνότητα που επαρκεί για την διάγνωση σφάλματος, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του αισθητήρα A, και οι πίνακες εμπεριέχουν αποτελέσματα των παραπάνω τύπων μέχρι εκείνη την συχνότητα. Κενά σε κελιά του πίνακα σημαίνουν την απουσία κάποιου spike στην συγκεκριμένη συχνότητα. Όπως γίνεται αντιληπτό οι έξτρα τύποι μας προσδίδουν μεγάλη ακρίβεια αφού αποδίδεται με λεπτομέρεια το πυκνό αρμονικό περιεχόμενο του φάσματος. Όμοια με την περίπτωση του ρεύματος έτσι και εδώ ταλαντώσεις της ταχύτητας κάνουν δύσκολη την ακριβή μέτρηση της, άρα και της ολίσθησης, πράγμα που μαζί με την ανακρίβεια του FFT, οδηγεί σε ελαφριές αποκλίσεις των θεωρητικών συχνοτήτων από αυτές που εμφανίζονται στο φάσμα. Τέλος αποκλίσεις στην συχνότητα υπάρχουν και μεταξύ των αρμονικών κάθε περίπτωσης λόγω της αλλαγής της ταχύτητας-ολίσθησης παρουσίας των διαφορετικών σφαλμάτων.

Τύπος υπολογισμού Συχνότητας	Συχνότητα Υγής Κινητήρας	Συχνότητα Σπασμένη Μπάρα	Συχνότητα Δύο Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες	Συχνότητα Δύο Μη Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες	Υγής Κινητήρας (db)	Σπασμένη Μπάρα (db)	Δύο Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (db)	Δύο Μη Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (db)
$(1 - ((2 \cdot (1-2))/2)) \cdot f_s$		1.25	1.25	1.25		-62.76	-46.03	-54.64
$(3 - ((6 \cdot (1-2))/2)) \cdot f_s$	3.33	3.75	3.95	4.16	-63.03	-65.62	-52.13	-63.94
$(1 - ((2 \cdot (1-s))/2 + 4s)) \cdot f_s$	6.04	6.04	6.45	6.45	-94.12	-66.22	-54.32	-60.98
$(1 - ((3 \cdot (1-s))/2 + 12s)) \cdot f_s$	7.5		7.5	7.7	-96.10		-49.99	-54.79
$(1 - ((2 \cdot (1-s))/2 + 6s)) \cdot f_s$	8.54	8.33	9.16	9.16	-95.32	-65.62	-55.36	-62.86
$(1 - ((6 \cdot (1-s))/2 - 12s)) \cdot f_s$	10.41	11.04	10	10.2	-90.99	-77.10	-55.03	-57.29
$(1 - ((6 \cdot (1-s))/2 - 10s)) \cdot f_s$	13.12	13.33	12.5	12.91	-84.03	-62.21	-55.88	-56.55
$(1 - ((1 \cdot (1-s))/2 - 8s)) \cdot f_s$	15.83	15.83	15.2	15.41	-86.41	-55.3	-53.24	-60.17

$(1-26s)fs$	17.08	18.33	16.25	16.45	-68.71	-56.65	-52.73	-60.29
$(1-((1*(1-s))/2-6s)fs$			17.7	17.91			-51.44	-47.44
$(1-((1*(1-s))/2-4s)fs$	19.79	20.62	20.41	20.41	-78.64	-50.83	-39.18	-49.3
$(1-((3*(1-s))/2))*fs$	23.12	23.12	23.12	23.12	-90.62	-30.87	-25.16	-29.98
$(1-((1*(1-s))/2))*fs$	25.62	25.62	25.62	25.62	-87.04	-29.31	-22.38	-23.59
$(3-((5*(1-s))/2))*fs$	27.08	28.12	28.33	28.33	-79.33	-44.27	-38.2	-57.72
$(1-16s)fs$		30.41		29.58		-58.74		-57.93
$(1-((1*(1-s))/2+4s)fs$			30.83	30.83			-44.29	-47.89
$(1-14s)fs$		32.91	31.87	32.08		-52.66	-50.54	-49.6
$(1-((1*(1-s))/2+6s)fs$	33.54		33.54	33.33	-49.77		-53.68	-61.39
$(1-12s)fs$		35.2	34.58	34.58		-62.23	-53.15	-50.46
$(1-((1*(1-s))/2+8s)fs$	36.04		36.04	35.83	-81.29		-54.49	-62.33
$(1-10s)fs$		37.7	37.08	37.08		-59.21	-54.53	-50.84
$(1-((1*(1-s))/2+10s)fs$	38.12			38.56	-80.06			-58.42
$(1-8s)fs$	39.37	40.2	39.79	39.79	-79.77	-53.81	-51.54	-53.51
$(1-6s)fs$		42.7	42.08	42.29		-49.19	-45.67	-40.9
$(1-4s)fs$		45	44.79	44.79		-44.74	-30.74	-39.04
$(1-2s)fs$		47.5	47.5	47.5		-34.94	-24.53	-31.28
$(1+2s)fs$		52.5	52.5	52.5		-34.86	-24.65	-30.16
$(1+4s)fs$		55	55.2	55.2		-46.26	-32.6	-41.65
$(1-((5*(1-s))/2+12s)fs$			56.25	56.45			-46.37	-44.99
$(1+6s)fs$		57.29	57.7	57.7		-48.87	-52.21	-44.64
$(1+((1*(1-s))/2-12s)fs$			58.75	58.75			-51.08	-60.29
$(1+8s)fs$	60.62	59.58	60.41	60.2	-78.91	-54.09	-54.78	-58.77
$(1+((1*(1-s))/2-10s)fs$	61.25		61.25	61.45	-78.91		-52.45	-45.65
$(1+10s)fs$	62.70	62.08	63.12	62.91	-80.48	-53.15	-56.25	-54.2
$(1+12s)fs$	64.37	64.58	65.62	65.62	-82.64	-47.91	-51.22	-56.81
$(1+((1*(1-s))/2-6s)fs$	66.45		66.45	66.66	-52.05		-47.21	-43.67
$(1+14s)fs$	67.29	67.29	68.33	67.91	-79.05	-50.67	-50.31	-46.86
$(1+((1*(1-s))/2-4s)fs$	68.95		69.16	69.16	-81.77		-35.26	-32.35
$(1+16s)fs$	69.58	69.58		70.62	-82.16	-42.79		-58.24
$(1+((1*(1-s))/2-2s)fs$	71.87	71.87	71.66	71.87	-84.37	-28.53	-22.69	-45.51
$(1+((1*(1-s))/2))*fs$	73.12	74.37	74.37	74.37	-76.59	-20	-13.48	-14.13
$(3-((3*(1-s))/2))*fs$	76.87	76.87	76.87	76.87	-81.84	-22.29	-17.13	-20.97
$(5-((7*(1-s))/2))*fs$	79.16	79.37	79.58	79.58	-85.78	-44.26	-36.07	-43.72
$(1-((6*(1-s))/2+12s)fs$	80.20			80.83	-76.97			-50.46
$(1+((1*(1-s))/2+6s)fs$	82.91	81.66	82.29	82.08	-68.90	-53.71	-56.20	-41.46
$(1+((2*(1-s))/2-12s)fs$	83.54		83.12	83.33	-86.81		-52.69	-51.13

$(1+((1*(1-s))/2+8s))fs$	84.37	84.16	84.58	84.58	-86.03	-46.55	-61.26	-59.63
$(1+((2*(1-s))/2-10s))fs$	85.83	86.45	85.62	85.83	-86.88	-55.45	-51.75	-47.07
$(1+((1*(1-s))/2+10s))fs$	86.25		87.29	87.29	-85.30		-55.17	-56.36
$(1+((2*(1-s))/2-8s))fs$	88.12	88.95	88.33	88.54	-86.31	-49.38	-51.7	-47.79
$(1+((1*(1-s))/2+12s))fs$	89.58		90	89.79	-86.59		-50.5	-53.51
$(1+((2*(1-s))/2-6s))fs$	90.62		90.83	91.04	-88.20		-51.22	-57.86
$(3-((3*(1-s))/2+12s))fs$	91.66	91.66	92.5	92.29	-86.63	-46.63	-42.23	-42.82
$(1+((2*(1-s))/2-4s))fs$	93.54	93.95	93.54	93.54	-87.37	-41.39	-35.1	-31.89
$(2*(1-s) - s)fs$	96.66	96.25	96.04	96.25	-64.30	-31.66	-24.15	-39.72
$(2*(1-s) + s)fs$	99.37	98.75	98.75	98.75	-76.92	-28.6	-18.98	-22.6

Τύπος υπολογισμού Συχνότητας	Συχνότητα Υγιής Κινητήρας	Συχνότητα Σπασμένη Μπάρα	Συχνότητα Δύο Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες	Συχνότητα Δύο Μη Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες	Υγιής Κινητήρας (db)	Σπασμένη Μπάρα (db)	Δύο Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (db)	Δύο Μη Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (db)
$(3-((2*(1-2))/2))*fs$	100.62	101.25	101.25	101.25	-80.04	-35.67	-24.49	-27.35
$(5-((6*(1-2))/2))*fs$	103.33	103.75	103.95	103.95	-67.01	-45.3	-34.19	-59.19
$(1+((2*(1-s))/2+6s))fs$	106.25	106.25	106.45	106.45	-86.26	-51.37	-39.14	-41.38
$(1+((3*(1-s))/2-12s))fs$	107.91		107.5	107.7	-84.53		-37.01	-38.08
$(1+((2*(1-s))/2+8s))fs$	109.16	108.54	109.16	108.95	-85.15	-42.72	-49.77	-50.45
$(1+((3*(1-s))/2-10s))fs$	110.62	110.83	110.20	110.2	-86.39	-57.95	-52.88	-43.59
$(1+((3*(1-s))/2-8s))fs$	112.91	113.33	112.7	112.91	-85.56	-47.56	-47.89	-44.09
$(1+((3*(1-s))/2-6s))fs$	115.20	115.83	115.2	115.41	-84.17	-47.43	-46.43	-50.55
$(1+((3*(1-s))/2-4s))fs$	117.08	118.33	117.91	117.91	-59.74	-39.88	-35.61	-31.13
$(1-((7*(1-s))/2))*fs$	119.58	120.62	120.41	120.41	-85.19	-32.62	-21.91	-31.74
$(1+((3*(1-2))/2))*fs$	122.29	123.12	123.12	123.12	-86.24	-17.77	-11.41	-16.22
$(3-((1*(1-2))/2))*fs$	125.62	125.62	125.62	125.62	-80.72	-16.16	-9.19	-10.37
$(5-((5*(1-2))/2))*fs$	127.08	128.12	128.33	128.33	-80.46	-31.38	-25.3	-44.35
$(1+((3*(1-s))/2+6s))fs$	128.95	130.62	130.83	130.83	-83.54	-50.14	-35.15	-38.2
$(1+((4*(1-s))/2-12s))fs$	132.08	132.7	131.87	132.08	-86.55	-43.46	-42.1	-39.46
$(1+((3*(1-s))/2+8s))fs$	133.54		133.54	133.33	-40.42		-45.43	-39.98
$(1+((4*(1-s))/2-10s))fs$		135.41	134.58	134.58		-51.38	-48.60	-42.98
$(1+((3*(1-s))/2+10s))fs$	135.83			135.83	-75.42			-49.93
$(1+((4*(1-s))/2-12s))fs$	136.87	137.7	136.87	137.08	-75.86	-52.03	-48.7	-41.69

-8s)fs								
$(1+((3*(1-s))/2+12s)fs$	138.33		138.54	138.54	-75.91		-51.55	-50.18
$(1+((4*(1-s))/2-6s)fs$	140.20	140.41	139.58	139.79	-74.46	-48.49	-43.17	-43.01
$(1+((4*(1-s))/2-4s)fs$	142.08	142.7	142.29	142.29	-73.37	-38.86	-39.2	-32.42
$(5-((5*(1-s))/2+12s)fs$	143.33			143.54	-71.28			-44.46
$(3*(1-s) - s)fs$		145	144.79	144.79		-36.24	-22.47	-29.82
$(3*(1-s) + s)fs$		147.5	147.5	147.5		-27.55	-17.11	-23.9
3fs	150	150	150	150	-5.74	-4.8	-2.32	3.35
$(5-((4*(1-2))/2))*fs$		152.5	152.5	152.5		-29.14	-19.29	-24.36
$(7-((8*(1-2))/2))*fs$		155	155.2	155.2		-41.42	-28.99	-37.11
$(1+((5*(1-s))/2-12s)fs$	156.66	157.08	156.25	156.45	-71.29	-47.15	-41.59	-38.9
$(1+((4*(1-s))/2+8s)fs$	157.5		157.91	157.7	-73.25		-45.24	-38.55
$(1+((4*(1-s))/2+10s)fs$	159.16	159.79	158.75	158.95	-74.50	-46.86	-42.39	-57.24
$(1+((5*(1-s))/2-8s)fs$	162.08	162.08	161.25	161.45	-77.49	-47.66	-46.37	-39.88
$(1+((4*(1-s))/2+12s)fs$			162.91	162.91			-49.48	-49.99
$(1+((5*(1-s))/2-6s)fs$	163.75	164.58	163.95	164.16	-77.91	-47.94	-40.68	-43
$(5-((4*(1-s))/2+10s)fs$	165.20		165.62	165.41	-80.05		-48.45	-49.53
$(1+((5*(1-s))/2-4s)fs$	166.45	167.08	166.45	166.66	-49.06	-43.63	-44.61	-40.23
$(5-((4*(1-s))/2+12s)fs$	167.91		168.12	167.91	-78.65		-48.9	-41.81
$(1+((5*(1-s))/2-2s)fs$	169.37	169.58	169.16	169.16	-79.66	-35.62	-26.07	-26.25
$(1+((5*(1-2))/2))*fs$	170.41	171.87	171.66	171.87	-79.52	-27.66	-23.49	-42.48
$(3+((1*(1-2))/2))*fs$	173.12	174.39	174.37	174.37	-77.23	-17.78	-11.17	-11.85
$(5-((3*(1-2))/2))*fs$	176.87	176.87	176.87	176.87	-79.76	-20.46	-16.02	-19.47
$(7-((7*(1-2))/2))*fs$	178.95	179.37	179.58	179.37	-80.85	-45.32	-42.55	-47.04
$(1+((6*(1-s))/2-12s)fs$	180.20		180.41	180.83	-73.75		-46.93	-45.56
$(1+((5*(1-s))/2+8s)fs$	182.91	181.87	182.29	182.08	-65.53	-51.79	-52.17	-37.45
$(1+((6*(1-s))/2-10s)fs$			183.12	183.33			-46.14	-47.02
$(1+((5*(1-s))/2+10s)fs$	184.37	184.16	184.79	184.58	-82.11	-43.3	-50.87	-54.63
$(1+((6*(1-s))/2-8s)fs$	186.25	186.45	185.62	185.83	-82.97	-51.72	-45.21	-41.63
$(1+((5*(1-s))/2+12s)fs$			187.29	187.08			-50.92	-53.96
$(1+((6*(1-s))/2-6s)fs$	188.33	188.95	188.33	188.54	-84.40	-49.48	-41.58	-43.8
$(3+((1*(1-s))/2+12s)fs$			190	189.79			-50.98	-48
$(1+((6*(1-s))/2-4s)fs$	191.45	191.45	190.83	191.04	-83.26	-43.82	-44.27	-49.86
$(5-((3*(1-s))/2+12s)fs$	192.08		192.5	192.29	-83.59		-38.87	-40.23

$(4*(1-s) - s)fs$	193.33	193.95	193.54	193.54	-85.33	-37.25	-28.18	-27.54
$(4*(1-s) + s)fs$	196.66	196.25	196.04	196.25	-69.41	-31.23	-22.19	-40.21
$(3+(2*(1-2)/2))*fs$	199.37	198.77	198.75	198.75	-77.42	-27.75	-17.45	-21.4

Τύπος υπολογισμού Συχνότητας	Συχνότητα Υγιής Κινητήρας	Συχνότητα Σπασμένη Μπάρα	Συχνότητα Δύο Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες	Συχνότητα Δύο Μη Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες	Υγιής Κινητήρας (db)	Σπασμένη Μπάρα (db)	Δύο Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (db)	Δύο Μη Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (db)
$(5-((2*(1-2)/2))*fs$	200.62	201.25	201.25	201.25	-73.35	-34.26	-23.63	-26.28
$(7-((6*(1-2)/2))*fs$	203.33	203.75	203.95	203.95	-65.31	-48.49	-33.44	-53.63
$(1+((6*(1-s))/2+8s)fs$	205.83	206.25	206.45	206.45	-83.36	-48.85	-37.53	-38.66
$(3+((3*(1-s))/2-12s)fs$	208.54	208.54	207.5	207.7	-84.85	-41.59	-35.67	-36.45
$(1+((6*(1-s))/2+10s)fs$				208.95				-49.51
$(3+((3*(1-s))/2-10s)fs$	210	210.83	210	210.2	-84.88	-51.07	-45.11	-42.18
$(1+((6*(1-s))/2+12s)fs$			211.66	211.66			-51.31	-57.87
$(3+((3*(1-s))/2-8s)fs$	212.5	213.33	212.7	212.7	-83.80	-47.16	-43.51	
$(3+((2*(1-s))/2+12s)fs$	214.37		214.16	213.95	-83.04		-50.81	-49.83
$(3+((3*(1-s))/2-6s)fs$	215.20	215.83	215.2	215.41	-84.04	-47.05	-42.95	-46.73
$(3+((3*(1-s))/2-4s)fs$	217.08	218.33	217.91	217.91	-62.12	-37.34	-31.25	-28.67
$(1+((7*(1-2)/2))*fs$	220.83	220.62	220.41	220.41	-84.99	-33.84	-21.96	-31.98
$(3+((3*(1-2)/2))*fs$	223.12	223.16	223.12	223.12	-85.39	-19.5	-12.7	-17.57
$(5-((1*(1-2)/2))*fs$	226.87	225.62	225.62	225.62	-70.83	-17.81	-10.65	-11.97
$(7-((5*(1-2)/2))*fs$	228.54	228.12	228.33	228.33	-87.36	-34.7	-28.87	-45.86
$(3+((3*(1-s))/2+6s)fs$	230.20	230.62	230.83	230.83	-87.22	-52.27	-39.02	-42.95
$(3+((4*(1-s))/2-12s)fs$		232.7	231.87	232.08		-42.45	-38.65	-37.68
$(3+((3*(1-s))/2+8s)fs$	233.54		233.54	233.33	-38.04		-46.72	-41.37
$(3+((4*(1-s))/2-10s)fs$			234.37	234.58			-50.42	-41.89
$(3+((3*(1-s))/2+10s)fs$	236.04	235.41	236.04	235.83	-73.75	-50.65	-51.80	-50.27
$(3+((4*(1-s))/2-8s)fs$	237.29	237.7	237.08	237.08	-74.30	-49.06	-40.57	-39.85
$(3+((3*(1-s))/2+12s)fs$	238.54		238.54	238.54	-74.48		-52.76	-48.7
$(3+((4*(1-s))/2-6s)fs$	240.83	240.2	239.58	239.79	-73.07	-43.01	-41.35	-39.82
$(5*(1-s) - s)fs$		242.7	242.29	242.29		-37.21	-35.32	-30.79
$(7-((5*(1-s))/2+12s)fs$			243.75	243.54			-46.39	-45.67
$(5*(1-s) + s)fs$		245	244.79	244.79		-36.66	-23.58	-28.74
$(3+((4*(1-2)/2))*fs$		247.55	247.5	247.5		-30.22	-19.62	-26.43

5fs	250	250	250	250	-9.86	-8.79	-6.10	-7.17
$(7 - ((4 * (1 - 2)) / 2)) * fs$		252.5	252.5	252.5		-32.3	-22.91	-27.76
$(9 - ((8 * (1 - 2)) / 2)) * fs$		255	255.2	255.2		-45.91	-34.3	-42.31
$(3 + ((5 * (1 - s)) / 2 - 12s)) fs$	256.66	257.08	256.25	256.45	-70.91	-48.67	-41.73	-39.4
$(3 + ((4 * (1 - s)) / 2 + 8s)) fs$			257.91	257.7			-47.61	-41.78
$(3 + ((5 * (1 - s)) / 2 - 10s)) fs$	259.58	259.79	258.75	258.95	-75.11	-48.86	-45.32	-53.96
$(3 + ((5 * (1 - s)) / 2 - 8s)) fs$	261.25	262.08	261.45	261.45	-76.25	-47.42	-43.34	-40.95
$(3 + ((4 * (1 - s)) / 2 + 12s)) fs$			262.91	262.91			-47.61	-51.01
$(3 + ((5 * (1 - s)) / 2 - 6s)) fs$	263.95	264.58	263.95	264.16	-77.52	-50.12	-39.48	-43.18
$(7 - ((4 * (1 - s)) / 2 + 10s)) fs$			265.62	265.41			-52.06	-51.38
$(3 + ((5 * (1 - s)) / 2 - 4s)) fs$	266.45	267.08	266.66	266.66	-59.98	-40.91	-40.32	-39.3
$(7 - ((4 * (1 - s)) / 2 + 12s)) fs$			268.12	267.91			-50.16	-44.16
$(3 + ((5 * (1 - s)) / 2 - 2s)) fs$	269.16	269.58	269.16	269.16	-80.26	-37.78	-27.42	-28.74
$(3 + ((5 * (1 - 2)) / 2)) * fs$	271.04	271.93	271.66	271.87	-80.38	-31.99	-27.5	-48.52
$(5 + ((1 * (1 - 2)) / 2)) * fs$	273.75	274.39	274.37	274.37	-81.05	-23.31	-16.46	-17.19
$(7 - ((3 * (1 - 2)) / 2)) * fs$	276.87	276.87	276.87	276.87	-81.21	-26.61	-22.57	-26.11
$(9 - ((7 * (1 - 2)) / 2)) * fs$	278.95	279.16	279.58		-81.33	-55.59	-44.95	
$(3 + ((6 * (1 - s)) / 2 - 12s)) fs$	280.20	281.45	280.41	280.83	-68.42	-54.52	-48.62	-46.61
$(3 + ((5 * (1 - s)) / 2 + 8s)) fs$	282.91		282.29	282.08	-74.78		-53.8	-42.06
$(3 + ((6 * (1 - s)) / 2 - 10s)) fs$	283.75	284.16	283.12	283.33	-86.09	-48.87	-46.13	-49.33
$(3 + ((5 * (1 - s)) / 2 + 10s)) fs$	284.37		284.79	284.79	-82.59		-52.34	-52.34
$(3 + ((6 * (1 - s)) / 2 - 8s)) fs$	285.83	286.45	285.62	285.83	-85.69	-53.81	-46.04	-53.16
$(3 + ((5 * (1 - s)) / 2 + 12s)) fs$	286.87		287.29	287.29	-80.79		-57.31	
$(3 + ((6 * (1 - s)) / 2 - 6s)) fs$	288.95	288.95	288.33	288.33	-85.85	-52.57	-42.41	-45.95
$(5 + ((1 * (1 - s)) / 2 + 12s)) fs$			289.79	289.79			-53.73	-51.01
$(6 * (1 - s) - s) fs$	290.83	291.45	290.83	291.04	-85.59	-45.67	-42.52	-49.29
$(7 - ((3 * (1 - s)) / 2 + 12s)) fs$	292.08		292.5	292.29	-86.05		-43.16	-43.51
$(6 * (1 - s) + s) fs$	293.95	293.95	293.54	293.54	-86.07	-42.46	-31.02	-32.52
$(3 + ((6 * (1 - 2)) / 2)) * fs$	296.66	296.32	296.04	296.04	-78.31	-37.93	-27.42	-48.16
$(5 + ((2 * (1 - 2)) / 2)) * fs$	299.37	298.77	298.75	298.75	-78.56	-35.24	-24.62	-28.89

Πίνακας 9.5 Σύνολο αρμονικών φάσματος stray flux αισθητήρα Α ανά περίπτωση.

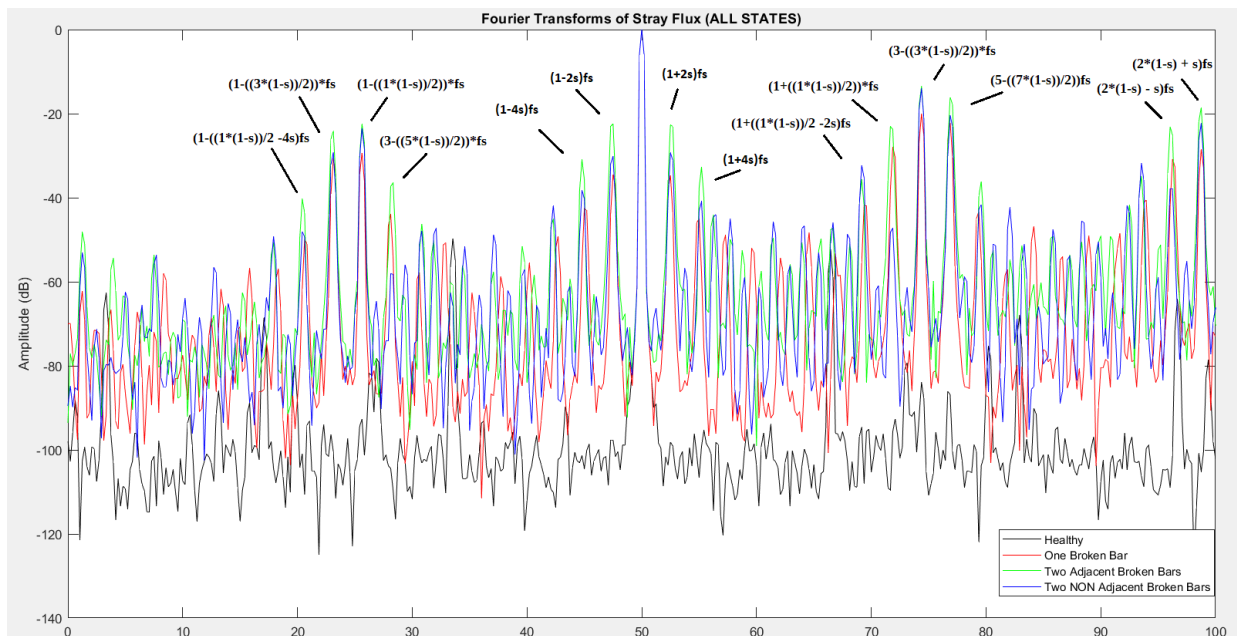
Από τα αποτελέσματα του πίνακα προκύπτει αρχικά πως η παρουσία σφάλματος, οποιασδήποτε έντασης, οδηγεί σε εμφάνιση αρμονικών στο φάσμα, το πλάτος των οποίων υπερβαίνει σημαντικά αυτό των αντίστοιχων της υγιούς κατάστασης.

Ακόμη παρατηρούμε πως η όξυνση του σφάλματος που προκαλείται με το σπάσιμο δεύτερη μπάρας, ανεξαρτήτως θέσης, εμπλουτίζει το αρμονικό περιεχόμενο με επιπλέον αρμονικές που απουσίαζαν στην περίπτωση της μιας σπασμένης μπάρας.

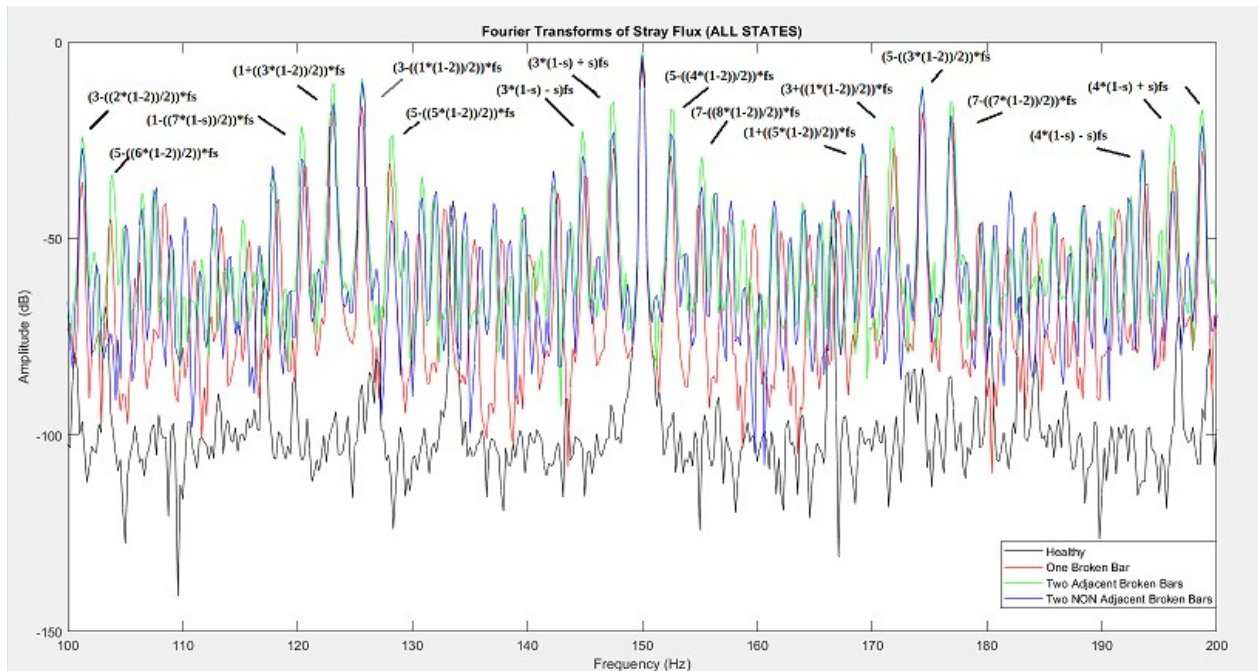
Συγκρίνοντας τις τρεις διαφορετικές εσφαλμένες καταστάσεις σε συχνότητες γύρω από την θεμελιώδη συχνότητα, την 3η και 5η αρμονική μπορούμε να εξάγουμε επιπλέον συμπεράσματα. Ειδικότερα γύρω από τα 50Hz οι αρμονικές για σφάλμα δύο γειτονικών σπασμένων μπαρών εμφανίζουν μεγαλύτερο πλάτος από αυτές της μιας σπασμένης μπάρας κατά 10-14db. Αντιθέτως όταν οι δυο σπασμένες μπάρες δεν είναι γειτονικές τότε το πλάτος των αρμονικών υπολείπεται από την περίπτωση των γειτονικών κατά 7-9db. Παρόμοια εικόνα παρουσιάζουν και οι αρμονικές γύρω από τα 150 και 250Hz.

Υψηλής έντασης αρμονικές, που προσεγγίζουν ή και ξεπερνούν σε πλάτος και αυτές που παρουσιάστηκαν παραπάνω, έχουμε στα διαστήματα 20-30, 70-80, 95-105, 120-130, 170-180, 193-203, 220-230, 270-280, 293-300. Σε αυτές, εκ νέου, το πλάτος στην περίπτωση των δύο γειτονικών σπασμένων μπαρών είναι το μεγαλύτερο ενώ στις μη γειτονικές πέφτει αισθητά προσεγγίζοντας, ακόμη και προσπερνώντας, αυτό των αρμονικών της μιας σπασμένης μπάρας.

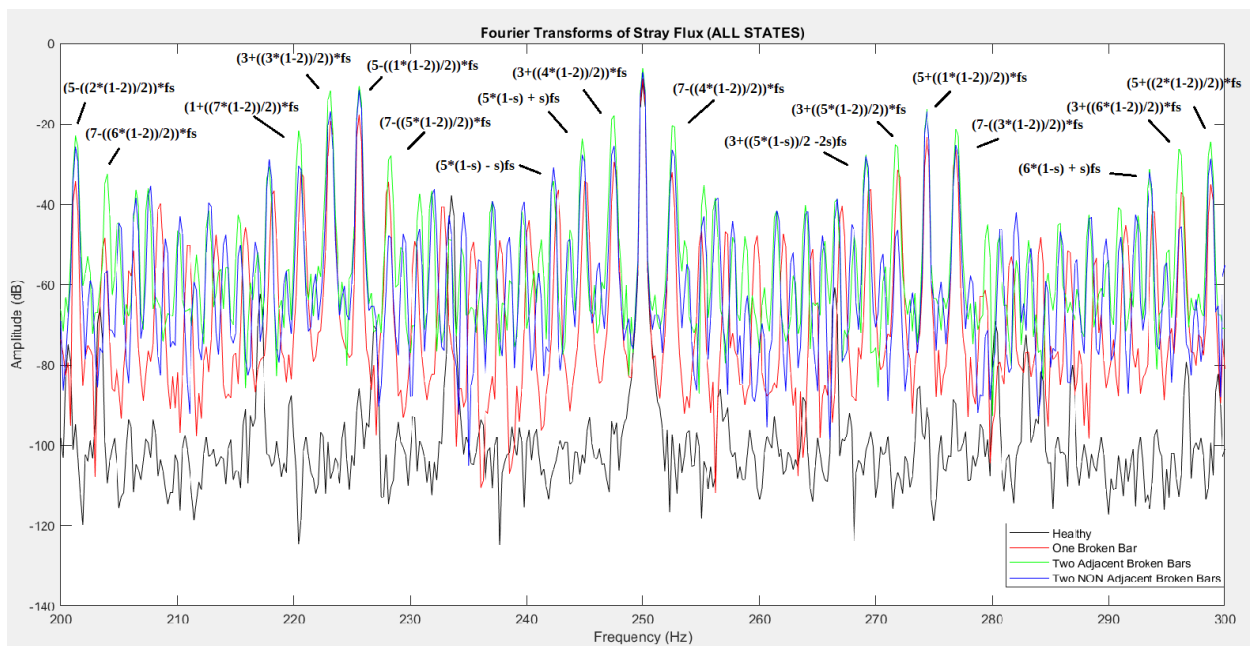
Παρατίθενται από κάτω εικόνες με τα φάσματα της μαγνητικής ροής, για κάθε περίπτωση, επισημαίνοντας χαρακτηριστικές αρμονικές ενδιαφέροντος που προδίδουν σφάλμα και αποτυπώνουν όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως.



Εικόνα 9.8 FFT Stray Flux για όλες τις καταστάσεις του κινητήρα σε συχνότητες 0-100Hz.



Εικόνα 9.9 FFT Stray Flux για όλες τις καταστάσεις του κινητήρα σε συχνότητες 100-200Hz.

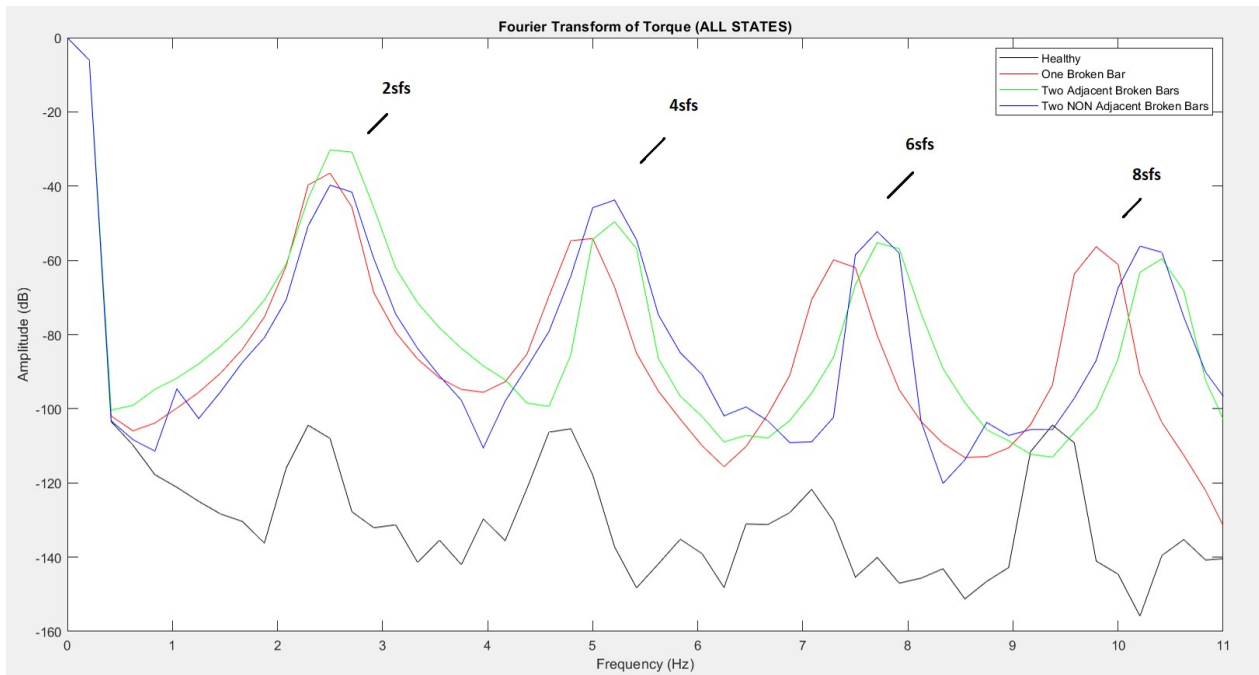


Εικόνα 9.10 FFT Stray Flux για όλες τις καταστάσεις του κινητήρα σε συχνότητες 200-300Hz.

9.4 Παρακολούθηση Ροπής στην Μόνιμη Κατάσταση

Όπως είδαμε στην ενότητα 5 στο φάσμα της ροπής στην μόνιμη κατάσταση εμφανίζονται υπογραφές που υποδηλώνουν την ύπαρξη σφάλματος σπασμένης μπάρας στον δρομέα. Αυτές οι συχνότητες βρίσκονται από τους τύπους:

$$f_{bb}=2 \cdot k \cdot s \cdot f_s \quad \text{και} \quad f_{bb}=300 \pm 2 \cdot k \cdot s \cdot f_s$$

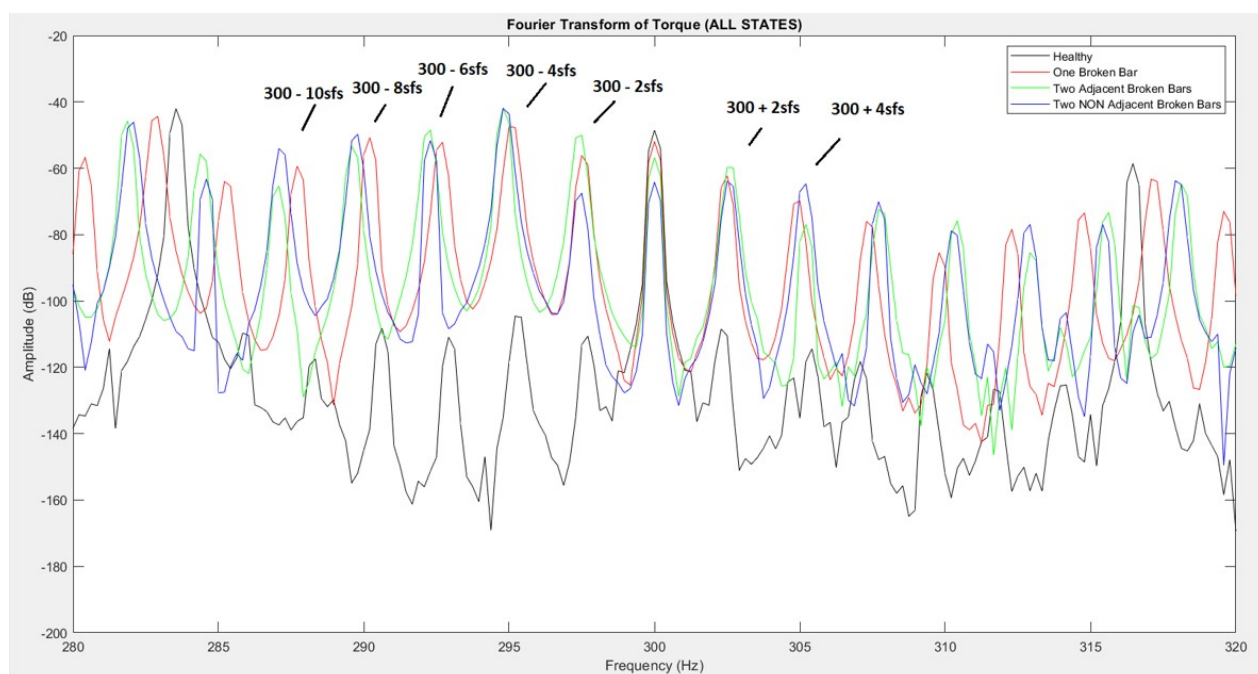


Εικόνα 9.11 FFT ροπής για όλες τις καταστάσεις του κινητήρα στις χαμηλές συχνότητες.

Στις χαμηλές συχνότητες που παρουσιάζει η παραπάνω εικόνα βλέπουμε ξεκάθαρα αρμονικό περιεχόμενο στις περιπτώσεις ύπαρξης σφάλματος το πλάτος του οποίου είναι κατά πολύ μεγαλύτερο αυτού της υγιούς κατάστασης κάνοντας την διάγνωση εύκολη. Μεταξύ των διαφορετικών τύπων σφάλματος υπάρχουν αυξομειώσεις στα πλάτη των αρμονικών. Συγκεκριμένα διαφορές εμφανίζονται στις πρώτες τρεις όπου για την συχνότητα 2sfs το μεγαλύτερο πλάτος το έχει η περίπτωση των δυο γειτονικών σπασμένων μπαρών κατά 6 και 9.5 dB από αυτά της μιας σπασμένης μπάρας και των μη γειτονικών σπασμένων μπαρών αντίστοιχα. Στις άλλες δύο, 4sfs και 6sfs, μεγαλύτερη τιμή εμφανίζεται στην περίπτωση των μη γειτονικών σπασμένων μπαρών με αυτή των γειτονικών να ακολουθεί με διαφορά 6 και 3 dB αντίστοιχα, ενώ για την μια σπασμένη μπάρα οι αρμονικές απέχουν από την μεγαλύτερη κατά 9.5 και 7.5 dB. Ακόμη λόγω μικρών μεταβολών στην ταχύτητα άρα και στην ολίσθηση οι υπογραφές ανά σφάλμα δεν εντοπίζονται ακριβώς στην ίδια συχνότητα. Επίσης λόγω ταλαντώσεων της ταχύτητας η μέτρηση της δεν είναι απόλυτα ακριβής, αυτό το γεγονός μαζί με ανακρίβεια του FFT, οδηγεί σε ελαφριές αποκλίσεις των θεωρητικών συχνοτήτων από αυτές που εμφανίζονται στο φάσμα.

Υπογραφή	Συχνότητα Υγιή Κινητήρας (Hz)	Συχνότητα Σπασμένη Μπάρα (Hz)	Συχνότητα. Δύο Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (Hz)	Συχνότητα. Δύο Μη Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (Hz)	Πλάτος Αρμονικής. Υγιή Κινητήρας (db)	Πλάτος Αρμονικής. Σπασμένη Μπάρα (db)	Πλάτος Αρμονικής. Δύο Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (db)	Πλάτος Αρμονικής. Δύο Μη Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (db)
2sfs	2.29	2.5	2.5	2.5	-104.44	-36.48	-30.29	-39.75
4sfs	4.79	5	5.2	5.2	-105.39	-54.36	-49.59	-43.76
6sfs	7.08	7.29	7.7	7.7	-121.71	-59.88	-55.25	-52.25
8sfs	9.375	9.79	10.41	10.2	-104.40	-56.35	-59.59	-56.18

Πίνακας 9.6 Πλάτη και συχνότητες αρμονικών ροπής ανά κατάσταση για χαμηλές συχνότητες.



Εικόνα 9.12 FFT ροπής για όλες τις καταστάσεις του κινητήρα στις συχνότητες γύρω από τα 300Hz.

Στις υψηλότερες συχνότητες παρατηρούμε πως στην υγιή κατάσταση έχουμε αρμονικές στα 300, 283.54, 316.45, όπου η πρώτη είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της 1ης αρμονικής στάτη με την 5η του δρομέα. Στις περιπτώσεις σφάλματος εμφανίζονται επιπλέον αρκετές αρμονικές γύρω από τις προηγούμενες, διαφόρων μεγεθών που επαρκούν για την διάγνωση του σφάλματος. Οι μεγαλύτερες αρμονικές βρίσκονται ανάμεσα στα 300 και 283.54 και τα χαρακτηριστικά τους, μαζί με μερικών άλλων, παρατίθενται στον πίνακα παρακάτω. Ανάμεσα στα σφάλματα δεν υπάρχουν διαφορές, στα πλάτη τους, που να καθιστούν την διάγνωση μη αποτελεσματική αφού η διαφορές τους με την υγιή είναι σημαντικές. Μεταξύ των σφαλμάτων επικρατούν διάφορες διαφορές. Γειτονικά των 300 Hz, παρατηρείται αύξηση στο πλάτος, από την περίπτωση της μιας σπασμένης μπάρας σε αυτή των δύο γειτονικών και στην συνέχεια ακόμη μεγαλύτερη πτώση στην περίπτωση των

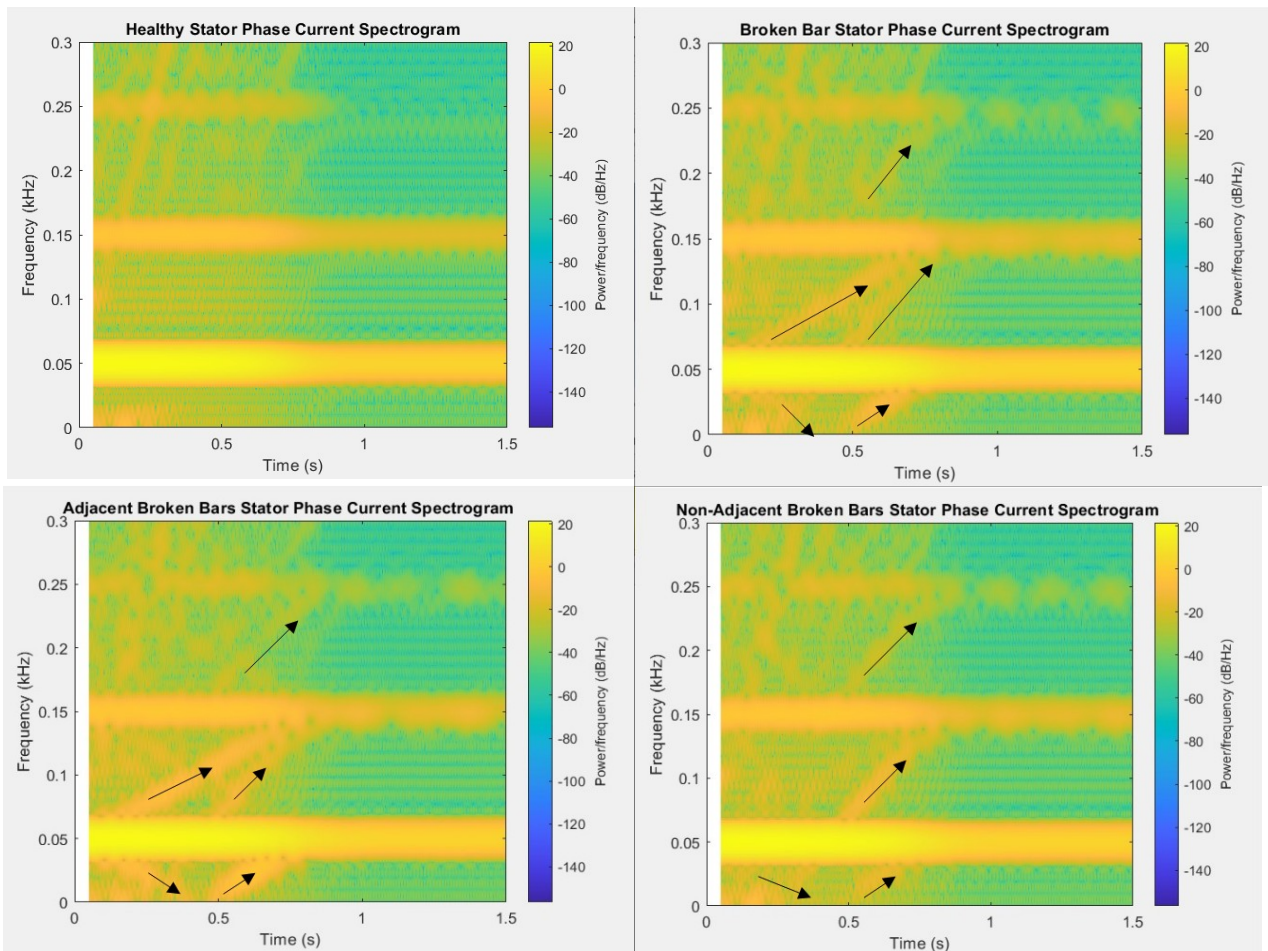
μη γειτονικών σπασμένων μπαρών. Όμως όσο απομακρυνόμαστε από τα 300 Hz οι τιμές των δύο περιπτώσεων διπλής σπασμένης μπάρας αντιστρέφονται και η περίπτωση των μη γειτονικών εμφανίζει το μεγαλύτερο πλάτος ενώ αυτή των γειτονικών το μικρότερο, ακόμα και από αυτό της μιας σπασμένης μπάρας.

Υπογραφή	Συχνότητα Υγιής Κινητήρας (Hz)	Συχνότητα Σπασμένη Μπάρα (Hz)	Συχνότητα Δύο Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (Hz)	Συχνότητα Δύο Μη Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (Hz)	Πλάτος Αρμονικής Υγιής Κινητήρας (db)	Πλάτος Αρμονικής Σπασμένη Μπάρα (db)	Πλάτος Αρμονικής. Δύο Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (db)	Πλάτος Αρμονικής. Δύο Μη Γειτονικές Σπασμένες Μπάρες (db)
300+4sfs	305.41	305	305.2	305.2	-114.36	-69.80	-76.92	-64.66
300+2sfs	302.29	302.5	302.5	302.5	-108.45	-62.27	-59.67	-63.88
300-2sfs	297.70	297.5	297.5	297.5	-110.55	-56.13	-49.97	-67.50
300-4sfs	295.2	295	294.79	294.79	-104.61	-47.47	-41.91	-41.91
300-6sfs	292.91	292.7	292.29	292.29	-110.87	52.10	-48.47	-51.58
300-8sfs	290.62	290.2	289.58	289.79	-108.19	-50.75	-53.38	-49.69
300-10sfs	288.33	287.7	287.08	287.08	-117.51	-59.38	-65.36	-54.04

Πίνακας 9.7 Πλάτη και συχνότητες αρμονικών ροπής ανά κατάσταση για υψηλές συχνότητες.

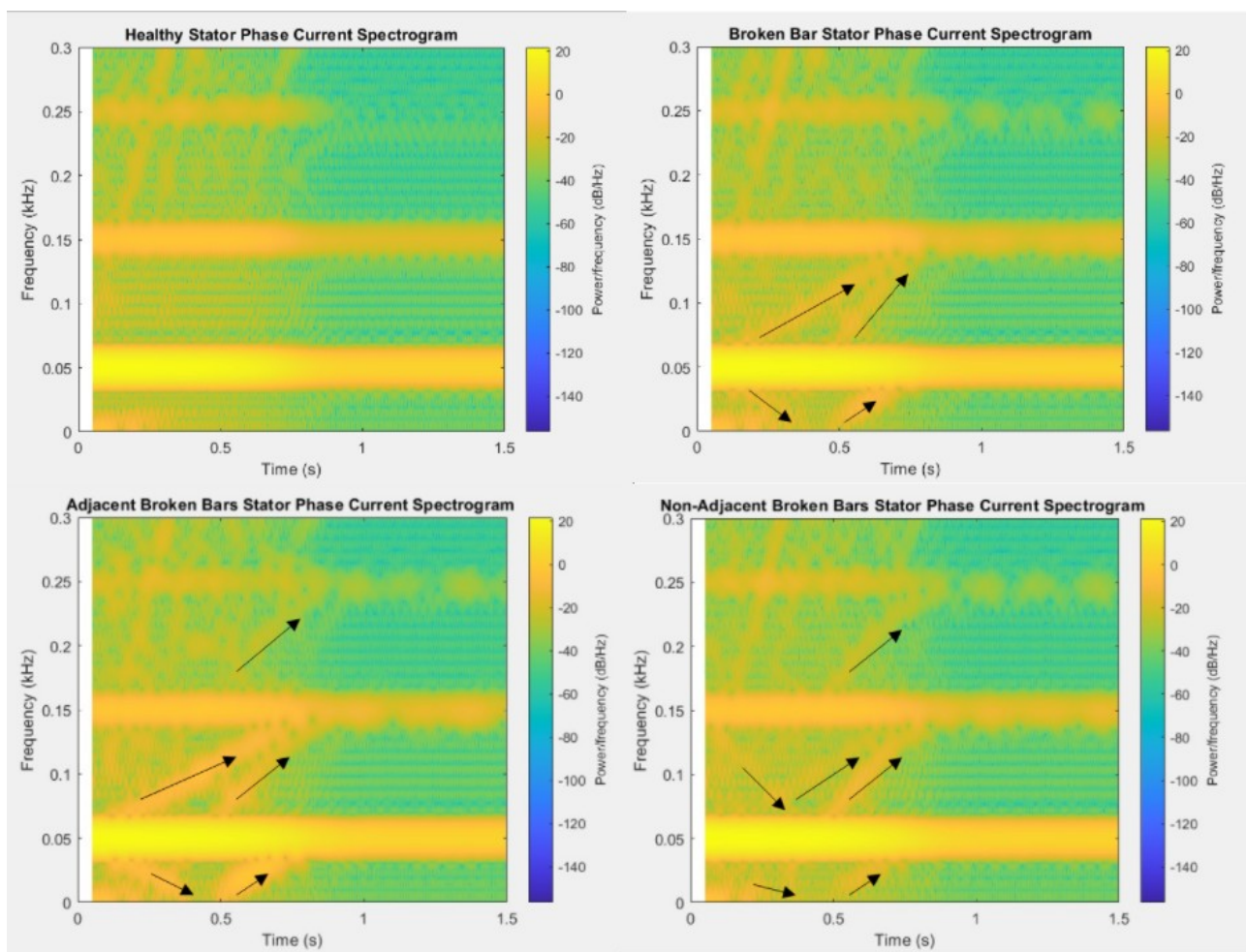
9.5 Παρακολούθηση Ρεύματος στην Εκκίνηση

Κάνοντας χρήση της συνάρτησης spectrogram του MATLAB, παίρνουμε το STFT των ρευμάτων λαμβάνοντας έτσι πληροφορία για την μεταβολή της συχνότητας τους στον χρόνο. Η μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιείται στα ρεύματα γραμμής καθώς και στα ρεύματα φάσης του κινητήρα. Παραθέτουμε πρώτα τα αποτελέσματα του φασματογραφήματος των φυσικών ρευμάτων του στάτη.



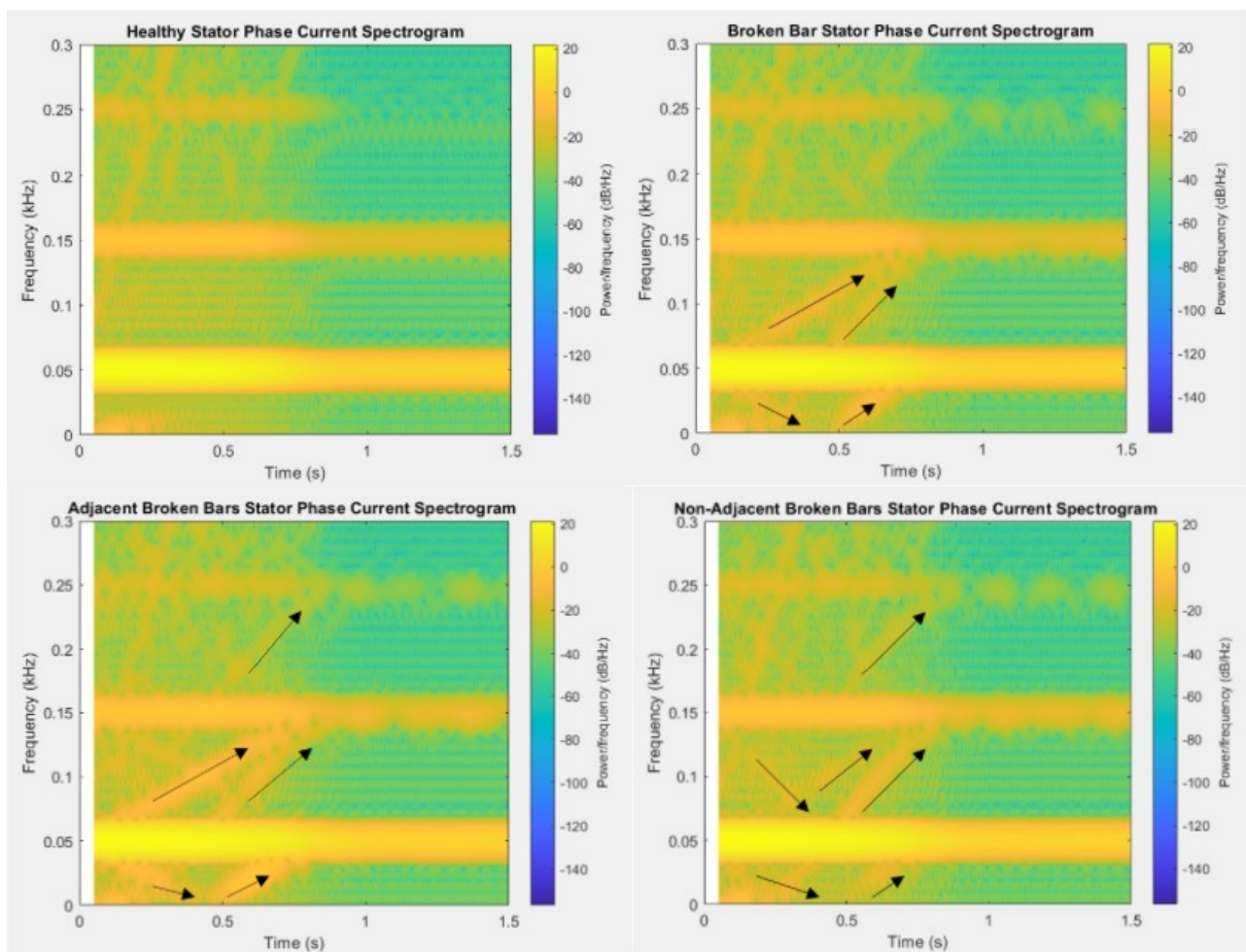
Εικόνα 9.13 Φασματογράφημα φασικού ρεύματος στάτη (φάση A) για όλες τις καταστάσεις του κινητήρα.

Στην υγιή κατάσταση το αρμονικό περιεχόμενο περιορίζεται κυρίως στην βασική αρμονική (50Hz) καθώς και στη 3η (150Hz). Η 5η αρμονική (250 Hz) εμφανίζεται σε μικρότερη ένταση και για όσο διαρκεί η εκκίνηση του κινητήρα. Στις εσφαλμένες καταστάσεις υπάρχουν τροχιές που υποδηλώνουν την ύπαρξη σφάλματος και ιδιαίτερα η $(1-2s)f_s$ που σχηματίζει το χαρακτηριστικό V σχήμα. Επιπλέον σε κάθε μια από τις τρεις περιπτώσεις έχουμε αρμονικές που καταλήγουν στα 150 Hz $(3-4s)f_s$ και στα 250 Hz $(5-2s)f_s$. Σε αντίθεση με την περίπτωση των μη γειτονικών σπασμένων μπαρών, οι άλλες εσφαλμένες καταστάσεις εμπεριέχουν στο φάσμα τους μια ακόμη τροχιά που καταλήγει στα 150 Hz $(3-2s)f_s$. Σε επίπεδο έντασης οι αρμονικές για μια σπασμένη και για δυο γειτονικές μπάρες δεν έχουν μεγάλες διαφορές ενώ για μη γειτονικές πέρα από την μία λιγότερη εμφανίζεται και αποδυναμωμένη η κύρια τροχιά σχήματος V.



Εικόνα 9.14 Φασματογράφημα φασικού ρεύματος στάτη (φάση B) για όλες τις καταστάσεις του κινητήρα.

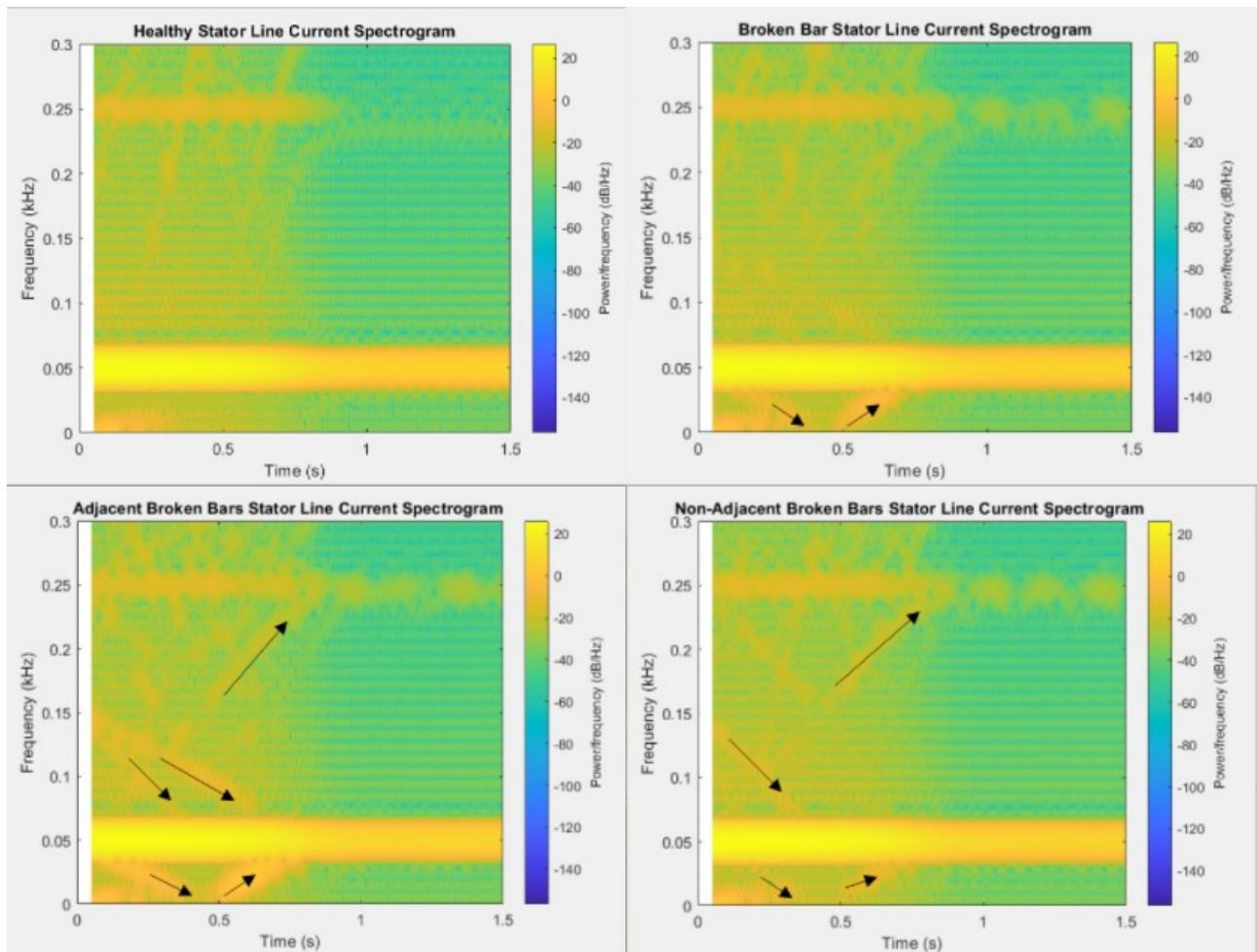
Στην υγιή κατάσταση τα αποτελέσματα δεν διαφέρουν με αυτά της φάσης A. Στις περιπτώσεις σφάλματος υπάρχουν μερικές διαφορές. Στην μια σπασμένη μπάρα δεν εμφανίζεται αρμονική που να προσεγγίζει τα 250 Hz, αντίθετα με προηγουμένως στην περίπτωση των μη γειτονικών μπαρών δεν χάνουμε μια αρμονική αλλά εντοπίζεται επιπλέον μία για $(1-4s)f_s$. Τα υπόλοιπα αποτελέσματα ομοιάζουν απόλυτα την περίπτωση της φάσης A τόσο ως προς τις τροχιές όσο και ως προς την ένταση τους.



Εικόνα 9.15 Φασματογράφημα φασικού ρεύματος στάτη (φάση C) για όλες τις καταστάσεις του κινητήρα.

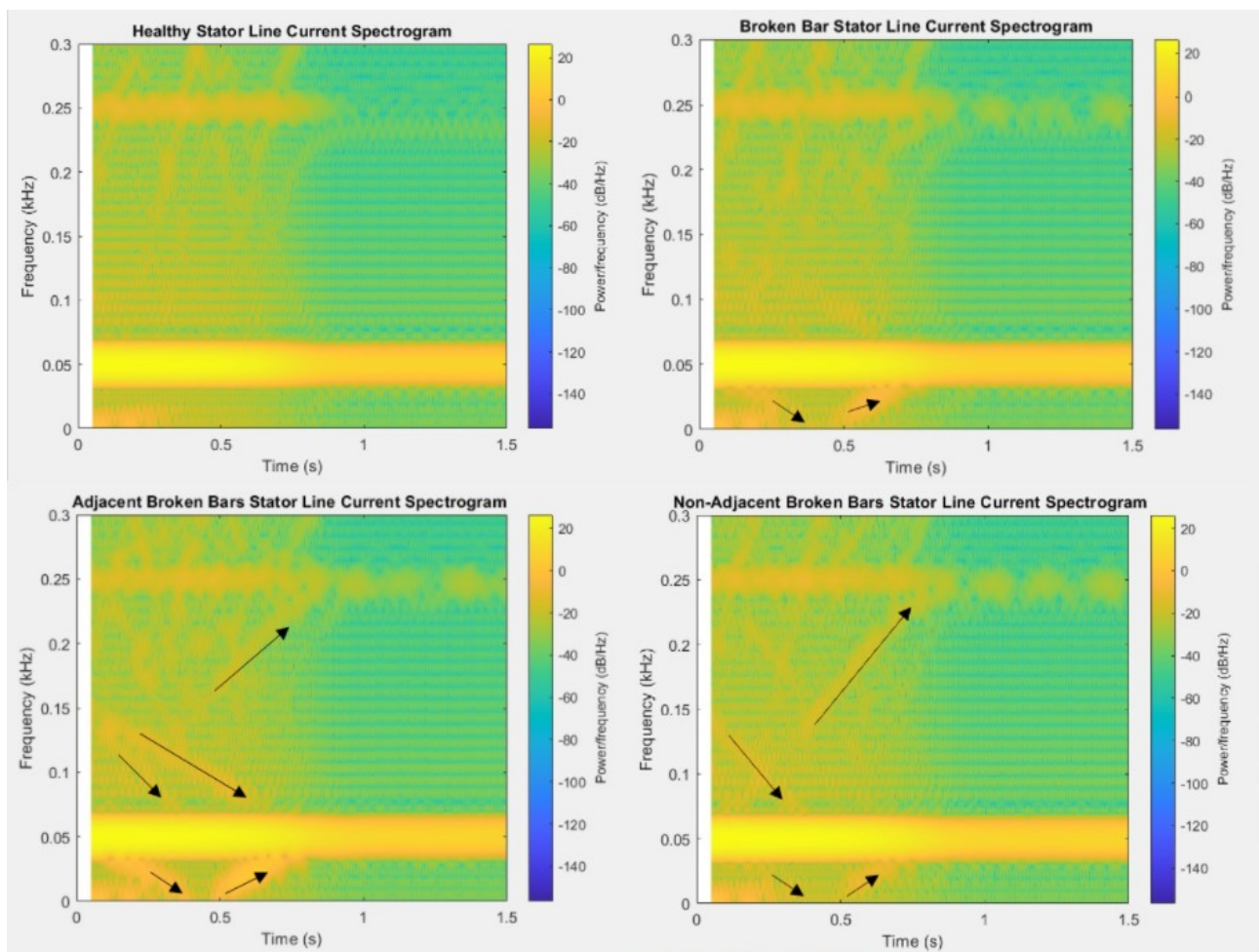
Για το φασικό ρεύμα του στάτη στην φάση C παρατηρούμε όμοια αποτελέσματα με την δεύτερη φάση.

Στην συνέχεια εξετάζουμε το ρεύμα γραμμής του στάτη.

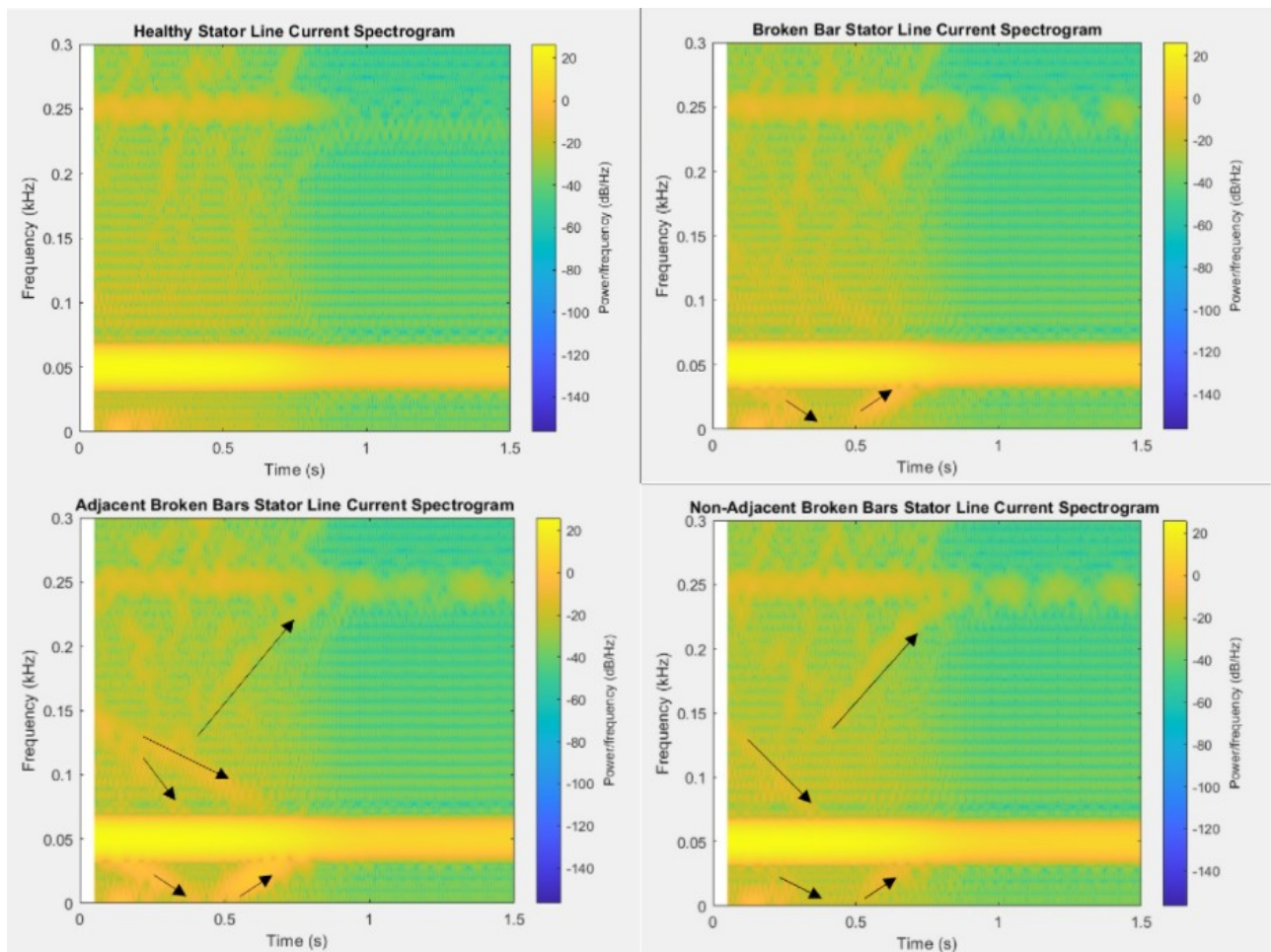


Εικόνα 9.16 Φασματογράφημα ρεύματος γραμμής στάτη (φάση Α) για όλες τις καταστάσεις του κινητήρα.

Στην περίπτωση του ρεύματος γραμμής, λόγω της συνδεσμολογίας αστέρα των πηγών οι αρμονικές που σχετίζονται με την 3η αρμονική στα 150 Hz απουσιάζουν. Έτσι στην υγιή κατάσταση μένουμε με την βασική αρμονική των 50 Hz και με την 5η στα 250 Hz που διατηρείται ορατή μέχρι να επέλθει η μόνιμη κατάσταση. Στις εσφαλμένες καταστάσεις υφίσταται κανονικά η βασική ένδειξη παρουσίας σφάλματος, η τροχιά με το σχήμα V $(1-2s)f_s$ με την ένταση της να είναι μειωμένη στο παράδειγμα των μη γειτονικών σπασμένων μπαρών. Για δύο σπασμένες μπάρες έχουμε να καταλήγει στα 250 Hz η αρμονική $(5-2s)f_s$. Η απουσία των αρμονικών που καταλήγουν στα 150Hz οδηγεί στο να γίνουν αντιληπτές νέες αρμονικές. Στην περίπτωση των γειτονικών σπασμένων μπαρών έχουμε τροχιές που χαρακτηρίζονται από συχνότητα $(1+2s)f_s, (1-4s)f_s$, εκκινούν από τα 150Hz και καταλήγουν στα 50 με την δεύτερη να έχει στη πορεία φτάσει στο μηδέν. Η τελευταία εμφανίζεται και στην περίπτωση των μη γειτονικών σπασμένων μπαρών. Τα παραπάνω συμβαδίζουν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των υπόλοιπων φάσεων του ρεύματος γραμμής του στάτη.



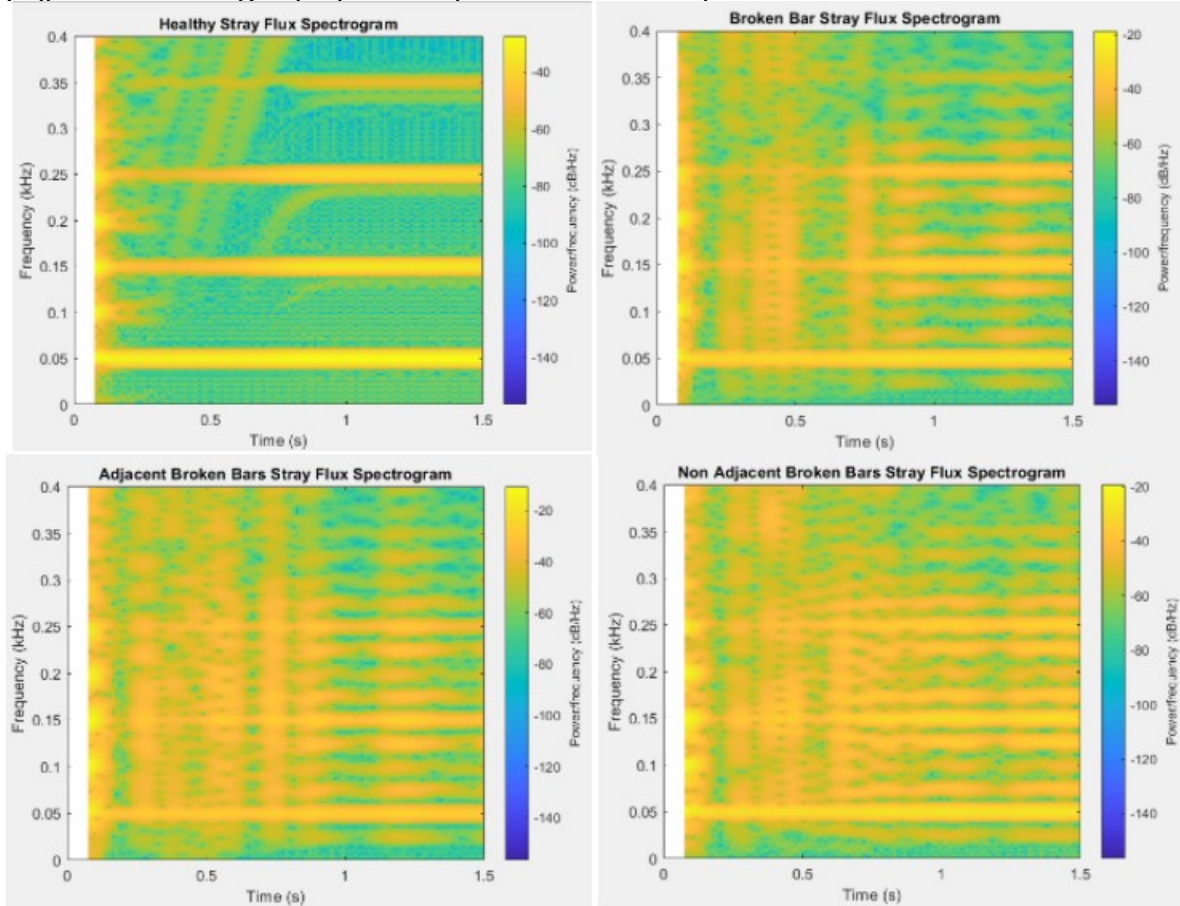
Εικόνα 9.18 Φασματογράφημα ρεύματος γραμμής στάτη (φάση Β) για όλες τις καταστάσεις του κινητήρα.



Εικόνα 9.19 Φασματογράφημα ρεύματος γραμμής στάτη (φάση C) για όλες τις καταστάσεις του κινητήρα.

9.6 Παρακολούθηση Stray Flux στην Εκκίνηση

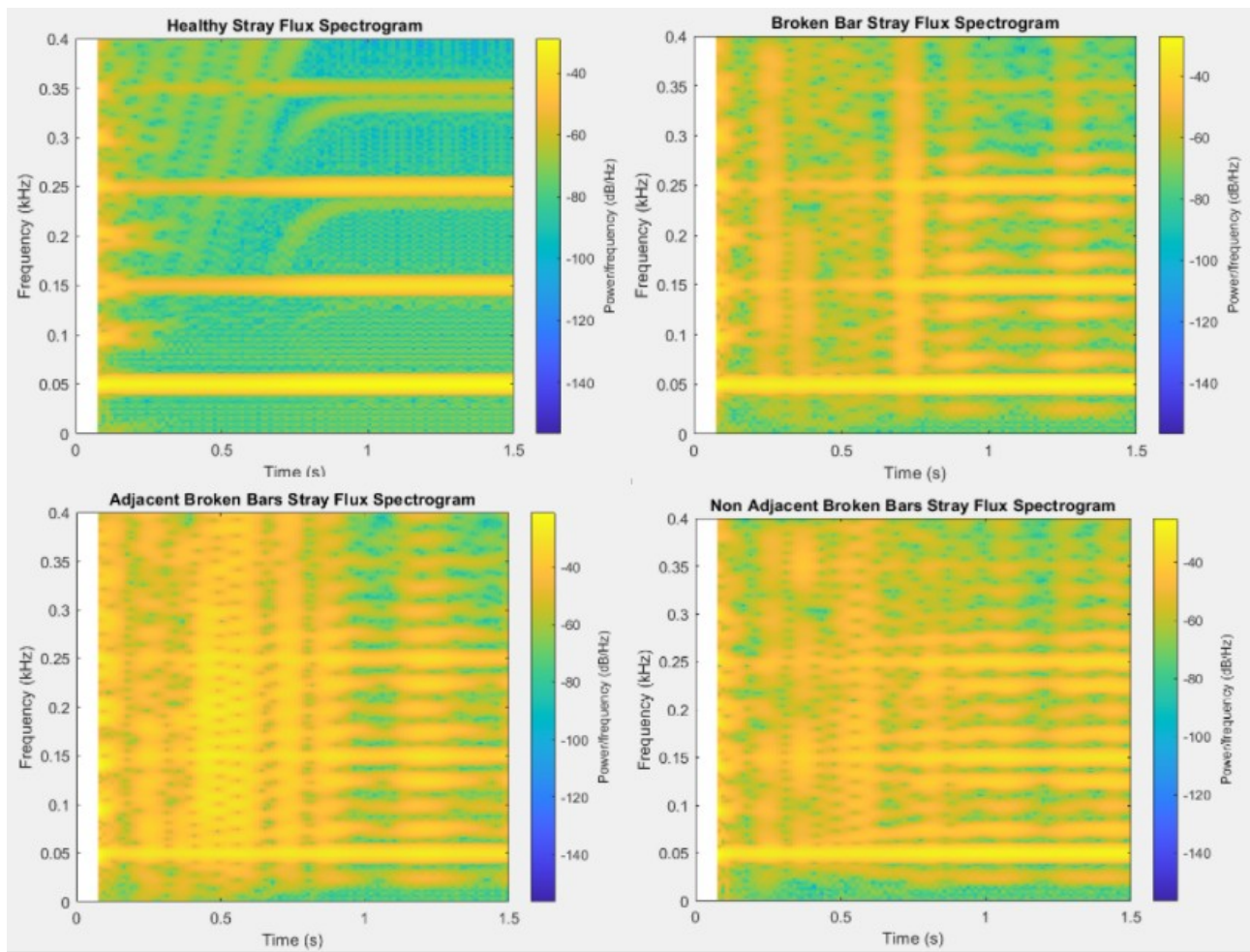
Με την χρήση της τάσης που αναπτύσσεται στα άκρα των αισθητήρων μπορούμε να εξάγουμε ποιοτικά το αρμονικό περιεχόμενο της stray flux. Χρησιμοποιώντας το MATLAB επεξεργαζόμαστε τα σήματα των αισθητήρων για όλες τις περιπτώσεις λειτουργίας του κινητήρα και καταλήγουμε με τα παρακάτω αποτελέσματα.



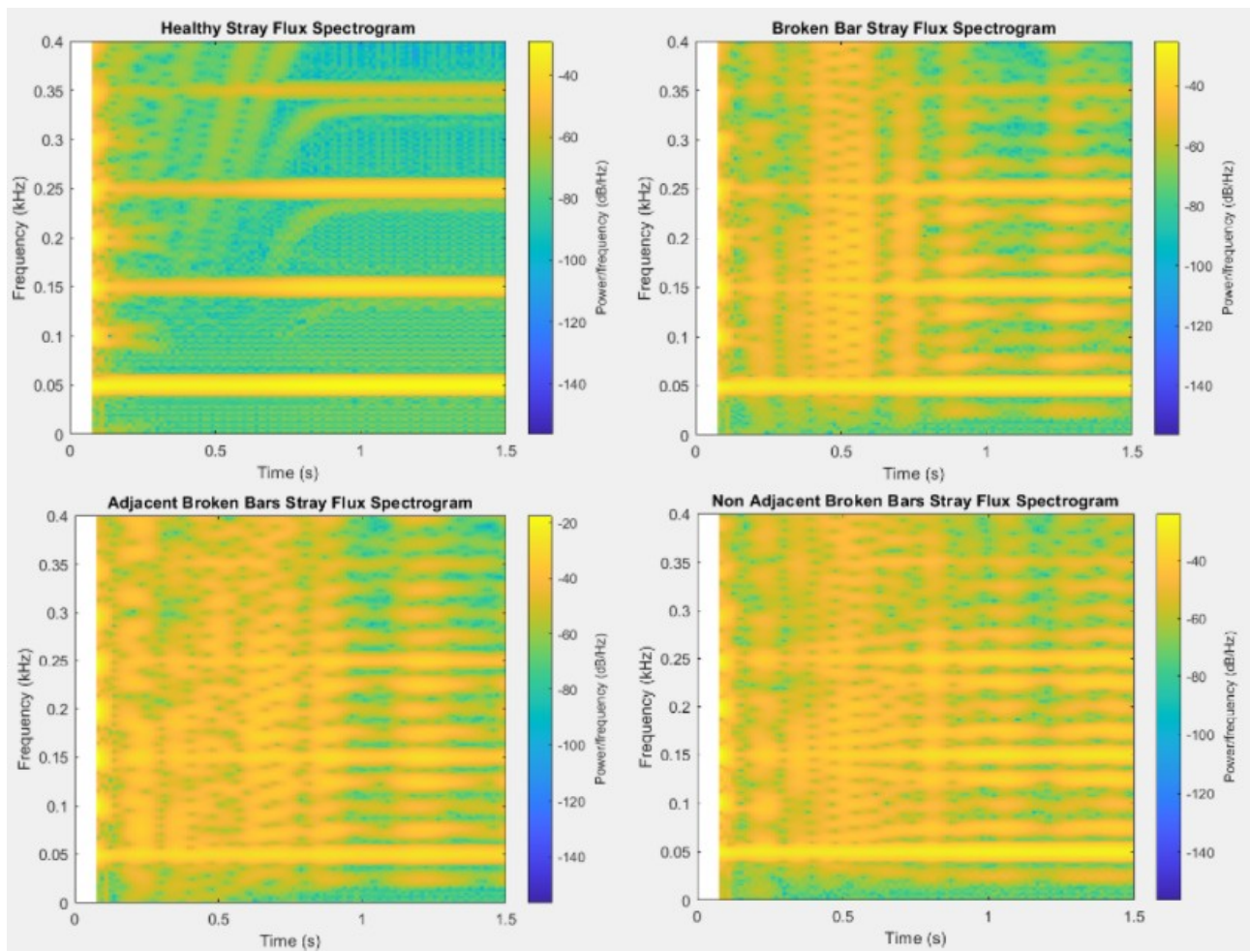
Εικόνα 9.20 Φασματογράφημα stray flux του αισθητήρα στις 0 μοίρες για όλες τις καταστάσεις του κινητήρα.

Παρατηρούμε ότι στην υγιή κατάσταση εμφανίζονται κυρίως οι τροχιές που αντιστοιχούν στην 1η, 3η, 5η αρμονική της μαγνητικής ροής. Η παρουσία σφάλματος δημιουργεί σωρεία αρμονικών στο φάσμα σε συχνότητες που εξαρτιούνται από την μηχανική ταχύτητα και γίνονται εύκολα αντιληπτές σε συχνότητες πηγάζουν από τον τύπο $m + \frac{n(1-s)f_s}{p}, m, n \in \mathbb{Z}$.

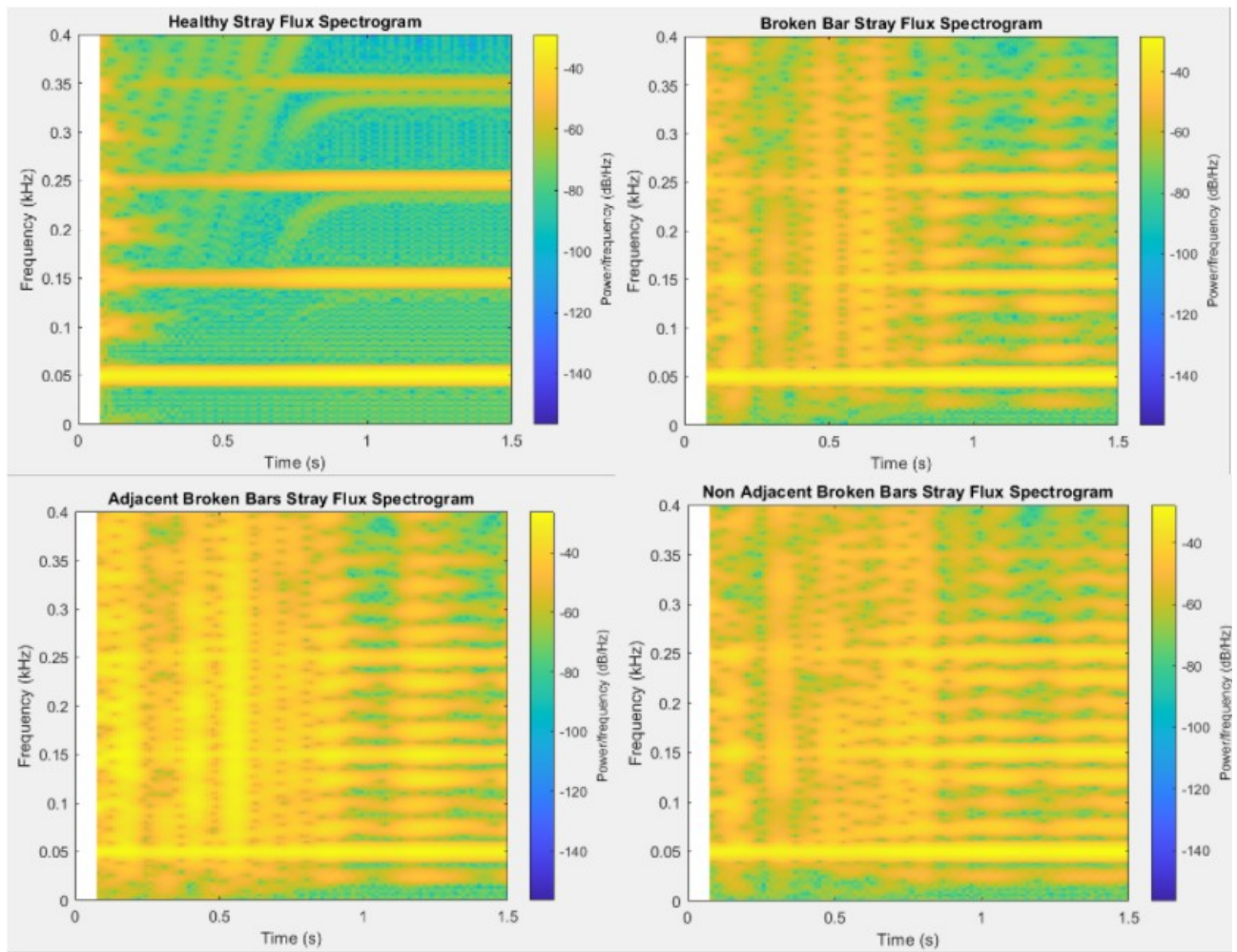
Συγκριτικά όσο αυξάνεται η σοβαρότητα του σφάλματος τόσο εντονότερες γίνονται οι αρμονικές και πιο ευδιάκριτες οι χαρακτηριστικές διαγώνιες τροχιές στο χρονικό διάστημα πριν την μόνιμη κατάσταση. Μάλιστα όταν οι σπασμένες μπάρες δεν είναι γειτονικές τότε το αρμονικό περιεχόμενο γίνεται ισχυρότερο διότι το σφάλμα εντοπίζεται από τον αισθητήρα δύο φορές μέσα σε μία πλήρη περιστροφή του δρομέα επηρεάζοντας έτσι τις υπογραφές του σφάλματος περιοδικά. Παρακάτω παρατίθενται τα ίδια αποτελέσματα για τους υπόλοιπους αισθητήρες.



Εικόνα 9.21 Φασματογράφημα stray flux του αισθητήρα στις 60 μοίρες για όλες τις καταστάσεις του κινητήρα.



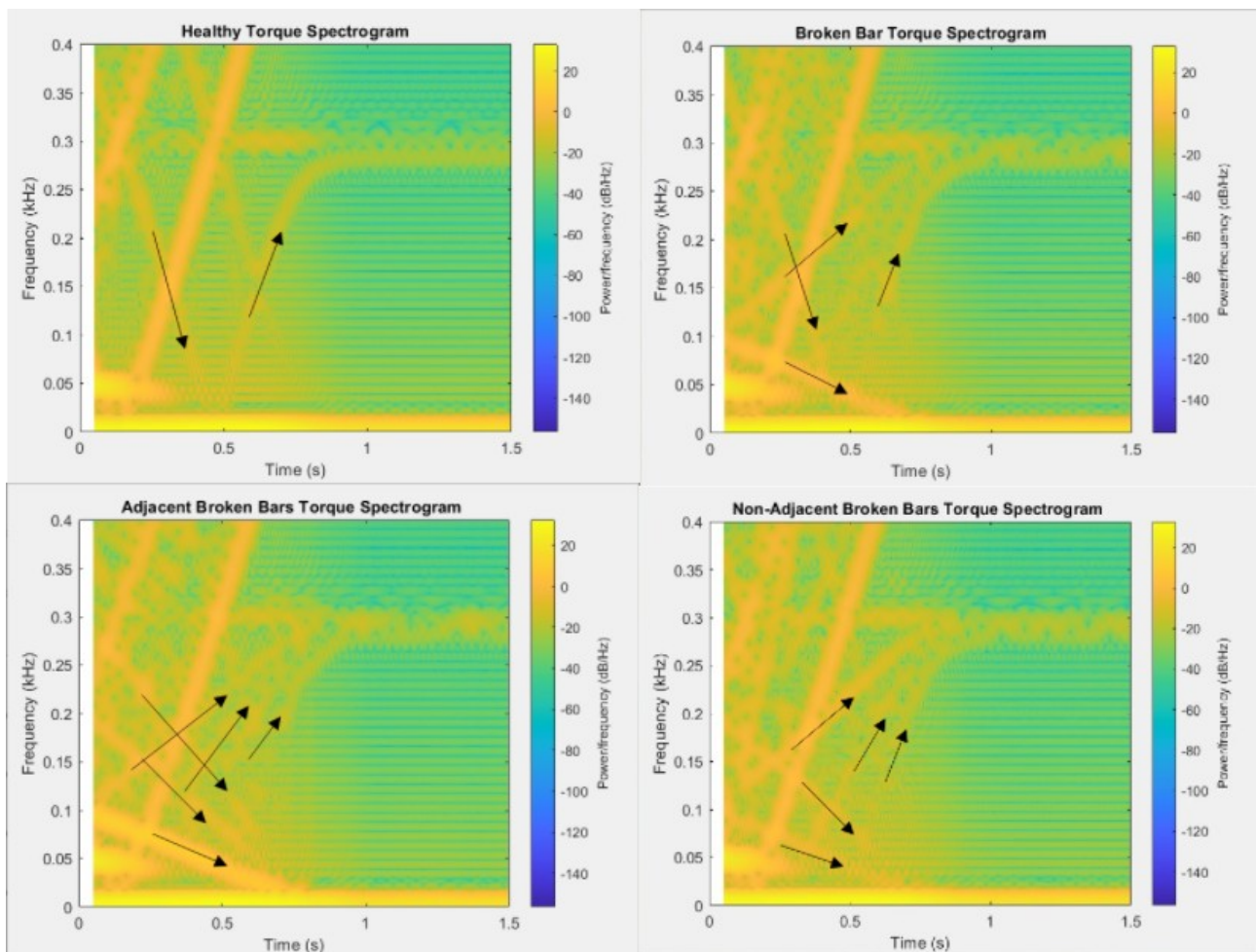
Εικόνα 9.22 Φασματογράφημα stray flux του αισθητήρα στις 120 μοίρες για όλες τις καταστάσεις του κινητήρα.



Εικόνα 9.23 Φασματογράφημα stray flux του αισθητήρα στις 240 μοίρες για όλες τις καταστάσεις του κινητήρα.

9.7 Παρακολούθηση Ροπής στην Εκκίνηση

Έχοντας τα πλήρη σήματα της ροπής και για τις τέσσερις περιπτώσεις, μέσω της συνάρτησης spectrogram του MATLAB, εξάγουμε το φασματογράφημα των ροπών που εκφράζει την μεταβολή της συχνότητας της ροπής κατά πλάτος στο χρόνο.



Εικόνα 9.24 Φασματογράφημα ροπής για όλες τις καταστάσεις του κινητήρα.

Συγκρίνοντας τις παραπάνω εικόνες βλέπουμε όπως είναι φυσιολογικό πως όλες περιέχουν έντονο το DC κομμάτι της ροπής, ενώ παρουσιάζουν άλλες κοινές τροχιές αρμονικών προς μεγαλύτερες συχνότητες. Ακόμη κοινή σε όλες τις περιπτώσεις είναι αρμονική στα 300 Hz καθώς και η τροχιά $(6 - 6s)f_s$ ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης 1ης αρμονικής δρομέα και 5ης στάτη.

Στην υγιή επίσης εντοπίζουμε την $8sf_s$. Στις περιπτώσεις που έχουμε σφάλμα η οικογένεια αρμονικών $2ksf_s$ κάνει εντονότερη την εμφάνιση της. Συγκεκριμένα στην μία σπασμένη μπάρα έχουμε $2sf_s, 8sf_s$, στις γειτονικές μπάρες $2sf_s, 4sf_s, 6sf_s$ και στις μη

γειτονικές $2sf_s, 4sf_s$. Επιπλέον γειτονικά των 300Hz την $(6-6s)f_s$ συνοδεύουν οι τροχιές $(6-4s)f_s, (6-5s)f_s$.

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

10.1 Συμπεράσματα

Η μέθοδος MCSA εμφανίστηκε αποτελεσματική στον εντοπισμό σφάλματος σπασμένης μπάρας, σε όλες της τις εκδοχές, εμφανίζοντας χαρακτηριστικές αρμονικές, το πλάτος των οποίων ξεπερνούσε κατά πολύ τις αντίστοιχες της υγιούς κατάστασης. Εξετάζοντας τα σφάλματα μεταξύ του προκύπτουν διάφορες αυξομειώσεις ανά περίπτωση. Επικεντρωνόμενοι στην υπογραφή (1-2s)fs στην οποία βασίζεται, κατά κύριο λόγο, η διάγνωση στον πραγματικό κόσμο βλέπουμε πως όταν το σφάλμα είναι σε μη γειτονικές μπάρες τότε το πλάτος της πέφτει σε επίπεδα μικρότερα της αντίστοιχης της μιας σπασμένης μπάρας. Μάλιστα ξεπερνά οριακά το εμπειρικό -40db, τιμή που σηματοδοτεί σφάλμα, πράγμα που μπορεί εν τέλει να μην επηρεάζει την διάγνωση ως προς την ύπαρξη ή όχι σφάλματος αλλά σίγουρα υποκρύπτει την σοβαρότητα του.

Η παρακολούθηση της stray flux στην μόνιμη κατάσταση έδωσε εμφανή αποτελέσματα που οδηγούν στην διάγνωση της ύπαρξης σφάλματος σπασμένης μπάρας, κάθε τύπου, λόγω της εμφάνισης πληθώρας αρμονικών στο φάσμα. Η σοβαρότητα του σφάλματος εντοπίζεται στο γεγονός ύπαρξης επιπλέον αρμονικών όταν το σφάλμα περιλαμβάνει δύο σπασμένες μπάρες. Συγκρίνοντας τις δύο περιπτώσεις διπλής σπασμένης μπάρας βλέπουμε πως το πλάτος των αρμονικών είναι μεγαλύτερο σε αυτή των γειτονικών σπασμένων μπαρών.

Η παρακολούθηση της ροπής στην μόνιμη κατάσταση αποτέλεσε αποτελεσματική μέθοδο για την διάγνωση σφάλματος σπασμένης μπάρας καθώς και σε αυτή την περίπτωση το φάσμα της εμπεριέχει, σε χαμηλές και υψηλές συχνότητες, αρμονικές που το ύψος τους είναι πολύ μεγαλύτερο στην λειτουργία υπό σφάλμα σε σχέση με την αντίστοιχη υγιή.

Η παρακολούθηση των ρευμάτων στην εκκίνηση μέσω φασματογραφήμάτων ήταν επιτυχής μέθοδος στον εντοπισμό σφαλμάτων σπασμένης μπάρας. Στην περίπτωση αυτών εμφανίζονται χαρακτηριστικές τροχιές που απουσιάζουν στην υγιή. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα ανά σφάλμα, το περιεχόμενο τροχιών, σε ένταση και πλήθος, παρουσιάζεται εντονότερο όταν έχουμε δυο σπασμένες μπάρες με την περίπτωση των γειτονικών να υπερτερεί καθώς, πέρα από το πλήθος των τροχιών, η χαρακτηριστικότερη τροχιά σχήματος V (1-2s)fs εμφανίζεται αποδυναμωμένη όταν οι σπασμένες μπάρες δεν είναι γειτονικές.

Αντίστοιχα στην περίπτωση της stray flux η παρακολούθηση της κατά την εκκίνηση παρείχε ασφαλή συμπεράσματα για την ύπαρξη ή όχι σπασμένης μπάρας. Τα φασματογραφήματα υπό σφάλμα εμφανίζουν πληθώρα χαρακτηριστικών τροχιών που γίνονται εντονότερες όσο αυτό διογκώνεται, με την περίπτωση των μη γειτονικών σπασμένων μπαρών να προηγείται.

Η μέθοδος παρακολούθησης της ροπής στην εκκίνηση, εμφανίστηκε εξ' ίσου αποτελεσματική στην διάγνωση σφάλματος με χαρακτηριστικές τροχιές να κάνουν την εμφάνιση τους στα φασματογραφήματα. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα ανά σφάλμα αυτά είναι παρόμοια με αυτά του ρεύματος. Δύο σπασμένες μπάρες προκαλούν εντονότερο

αρμονικό περιεχόμενο με αυτό των μη γειτονικών να υπολείπεται ελαφρώς σε πλήθος και ένταση από αυτό των γειτονικών.

Ακολουθώντας συγκρίνοντας τις μεθόδους μεταξύ τους προκύπτουν τα παρακάτω σημαντικά συμπεράσματα.

Στην περίπτωση της μιας σπασμένης μπάρας, όταν το σφάλμα βρίσκεται στο χαμηλότερο του επίπεδο, οι μέθοδοι παρουσιάζονται εξ' ίσου αποτελεσματικές. Το σύνολο των πλεονεκτημάτων που συνοδεύουν τις μεθόδους που βασίζονται στην παρακολούθηση του ρεύματος όπως, η απλότητα και το χαμηλότερο κόστος εφαρμογής τους, η μη ανάγκη πρόσβασης στην μηχανή, κ.α τις κάνουν πιο προσιτές και συμπερασματικά καλύτερες, με αυτή στην μόνιμη κατάσταση, MCSA, να υπερτερεί ως προς την ευκρίνεια των αποτελεσμάτων της. Τα ίδια ισχύουν και όταν έχουμε δυο γειτονικές σπασμένες μπάρες.

Αντίθετα όταν οι σπασμένες μπάρες είναι μη γειτονικές οι μέθοδοι που στηρίζονται στην ανάλυση του ρεύματος υστερούν. Τα καλύτερα αποτελέσματα τα παρέχει η stray flux και ιδιαίτερα στην περίπτωση της παρακολούθησης της κατά την εκκίνηση όπου οι χαρακτηριστικές τροχιές που υποδηλώνουν την ύπαρξη σφάλματος παραμένουν, στο σύνολο τους, ξεκάθαρα ευδιάκριτες

Επικεντρωνόμενοι στην μόνιμη κατάσταση, καλύτερη μέθοδος είναι αυτή της παρακολούθησης της stray flux και της ροπής καθώς το αρμονικό περιεχόμενο είναι εντονότατο και για τα τρία επίπεδα σφάλματος. Όμοιο συμπέρασμα εξάγεται και για την εκκίνηση. Βέβαια όσον αφορά μεθόδους βασισμένους πάνω στην ροπή της μηχανής, δεν πρέπει να αμελείται το γεγονός πως η ροπή ως μέγεθος συνήθως δεν μετράται απευθείας καθώς η χρήση ροπόμετρου κρίνεται ακριβή και μη πρακτική και αντ' αυτού επιλέγεται η εκτίμηση της μέσω των ρευμάτων και τάσεων πράγμα που περιορίζει την χρήση της μεθόδου στην βιομηχανία. Για αυτό εν τέλει προκρίνουμε την παρακολούθηση της stray flux.

Για όλα τα παραπάνω πρέπει να ληφθεί υπόψιν ότι δουλεύουμε σε περιβάλλον προσομοίωσης όπου ο κινητήρας είναι απόλυτα συμμετρικός, οι πηγές τάσης είναι τέλειες και δεν εμφανίζουν δικές τους αρμονικές, ενώ το μοντέλο είναι δισδιάστατο χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η παρουσία των δαχτυλιδιών (end rings). Όλα αυτά εξωραΐζουν τα αποτελέσματα της υγιούς μηχανής κάνοντας αυτά των εσφαλμένων καταστάσεων να ξεχωρίζουν σε βαθμό που δεν ισχύει απαραίτητα όταν εξετάζονται πραγματικοί κινητήρες.

10.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

- Γενίκευση των αποτελεσμάτων μέσω εξέτασης άλλων κινητήρων.
- Κατασκευή και προσομοίωση τρισδιάστατων μοντέλων κινητήρα.
- Επαλήθευση αποτελεσμάτων μέσω πειραματικής εξέτασης πραγματικών κινητήρων.

11. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Finite Element Method Magnetics Version 4.2 User's Manual October 25, 2015 David Meeker
2. Simcenter Magnet Introduction to Magnetostatic 2D Modeling Software Version 2022.1 April 2022
3. M. Jeong, J. Yun, Y. Park, S. B. Lee and K. N. Gyftakis, "Quality Assurance Testing for Screening Defective Aluminum Die-Cast Rotors of Squirrel Cage Induction Machines," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 3, pp. 2246-2254, May-June 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2805828.
4. J. Yun and S. B. Lee, "Influence of Aluminum Die-Cast Rotor Porosity on the Efficiency of Induction Machines," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 54, no. 11, pp. 1-5, Nov. 2018, Art no. 8104905, doi: 10.1109/TMAG.2018.2841912.
5. Zakari Maddi, Djamel Aouzellag, "Dynamic Modelling of Induction Motor Squirrel Cage for Different Shapes of Rotor Deep Bars with Estimation of the Skin Effect". *Progress In Electromagnetics Research M* 59:147-160 July 2017 DOI:10.2528/PIERM17060508\
6. 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," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 28, no. 2, pp. 267-277, June 2013, doi: 10.1109/TEC.2013.2240683.
7. D. Karampasoglou, J. Bonet-Jara and K. Gyftakis, "Static, Dynamic and Mixed Eccentricity Fault Detection Using MCSA and Stray Flux Monitoring via Finite Element Analysis," *2023 IEEE 14th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, Chania, Greece, 2023, pp. 272-278, doi: 10.1109/SDEMPED54949.2023.10271409.
8. <https://snskcompany.com/airgap-flux-probe/>
9. Angela Navarro-Navarro, Israel Zamudio-Ramirez, Vicente Biot-Monterde, Roque A. Osornio-Rios and Jose A. Antonino-Daviu, "Current and Stray Flux Combined Analysis for the Automatic Detection of Rotor Faults in Soft-Started Induction Motors". March 2022 *Energies* 15(7):2511 DOI:10.3390/en15072511
10. Y. Park *et al.*, "Stray Flux Monitoring for Reliable Detection of Rotor Faults Under the Influence of Rotor Axial Air Ducts," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 10, pp. 7561-7570, Oct. 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2880670.
11. T. C. Anil Kumar, G. Singh and V. N. A. Naikan, "Effectiveness of vibration and current monitoring in detecting broken rotor bar and bearing faults in an induction motor," *2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*, New Delhi, India, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICPES.2016.7584030.

12. <https://www.efficientplantmag.com/2004/11/detecting-broken-rotor-bars-prevents-catastrophic-damage/#:~:text=Replacement%20of%20the%20rotor%20core,losses%20due%20to%20unplanned%20downtime>
13. Jawad Faiz, Mansour Ojaghi, "Different indexes for eccentricity faults diagnosis in three-phase squirrel-cage induction motors: A review". February 2009, *Mechatronics* 19(1):2-13, DOI:10.1016/j.mechatronics.2008.07.004
14. Zheng Liu, "Stray Magnetic Field Based Health Monitoring of Electrical Machines". BSc MSc School of Engineering Newcastle University.
15. <https://www.amazon.ca/Bosch-1614011141-Parts-Armature/dp/B00YCPAHHA>
16. https://www.engineeringtoolbox.com/electrical-motors-torques-d_651.html
17. https://www.researchgate.net/figure/The-power-flow-diagram-of-the-induction-motor_fig4_320990845
18. N. Bessous, S. Sbaa and A. Toumi, "A detailed study of the spectral content in the stator current of asynchronous machines under broken rotor bar faults using MCSA technique," *2018 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT)*, Istanbul, Turkey, 2018, pp. 1-8, doi: 10.1109/CEIT.2018.8751876.
19. J. Milimonfared, H. M. Kelk, S. Nandi, A. D. Minassians and H. A. Toliyat, "A novel approach for broken-rotor-bar detection in cage induction motors," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no. 5, pp. 1000-1006, Sept.-Oct. 1999, doi: 10.1109/28.793359.
20. A. Ceban, R. Pusca and R. Romary, "Study of Rotor Faults in Induction Motors Using External Magnetic Field Analysis," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 5, pp. 2082-2093, May 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2163285.
21. J. Park *et al.*, "Evaluation of the detectability of broken rotor bars for double squirrel cage rotor induction motors," *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Atlanta, GA, USA, 2010, pp. 2493-2500, doi: 10.1109/ECCE.2010.5617950.
22. J. A. Antonino, M. Riera, J. Roger-Folch and M. P. Molina, "Validation of a new method for the diagnosis of rotor bar failures via wavelet transformation in industrial induction machines," *2005 5th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, Vienna, Austria, 2005, pp. 1-6, doi: 10.1109/DEMPED.2005.4662530.
23. C. Yang, T. -J. Kang, D. Hyun, S. B. Lee, J. A. Antonino-Daviu and J. Pons-Llinares, "Reliable Detection of Induction Motor Rotor Faults Under the Rotor Axial Air Duct Influence," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 4, pp. 2493-2502, July-Aug. 2014, doi: 10.1109/TIA.2013.2297448.
24. S. Shin, J. Kim, S. B. Lee, C. Lim and E. J. Wiedenbrug, "Evaluation of the influence of rotor magnetic anisotropy on condition monitoring of 2 pole induction motors," *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Pittsburgh, PA, USA, 2014, pp. 638-645, doi: 10.1109/ECCE.2014.6953455.

25. M. Riera-Guasp, M. F. Cabanas, J. A. Antonino-Daviu, M. Pineda-Sánchez and C. H. R. García, "Influence of Nonconsecutive Bar Breakages in Motor Current Signature Analysis for the Diagnosis of Rotor Faults in Induction Motors," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 1, pp. 80-89, March 2010, doi: 10.1109/TEC.2009.2032622.
26. V. V. Thomas, K. Vasudevan and V. J. Kumar, "Online cage rotor fault detection using air-gap torque spectra," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 18, no. 2, pp. 265-270, June 2003, doi: 10.1109/TEC.2003.811718.
27. K. N. Gyftakis, P. A. Panagiotou and S. B. Lee, "The Role of the Mechanical Speed Frequency on the Induction Motor Fault Detection via the Stray Flux," *2019 IEEE 12th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, Toulouse, France, 2019, pp. 201-207, doi: 10.1109/DEMPED.2019.8864863.
28. Y. Park, M. Jeong, S. B. Lee, J. A. Antonino-Daviu and M. Teska, "Influence of blade pass frequency vibrations on MCSA-based rotor fault detection of induction motors," *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Milwaukee, WI, USA, 2016, pp. 1-8, doi: 10.1109/ECCE.2016.7855199.
29. K. N. Gyftakis, E. Palomeno, D. V. Spyropoulos and E. D. Mitronikas, "Detection of Rotor Electrical Faults in Induction Motors during the Start-up via Torque Monitoring," *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Lisbon, Portugal, 2019, pp. 3673-3678, doi: 10.1109/IECON.2019.8927170.
30. Y. Park, H. Choi, S. B. Lee and K. Gyftakis, "Flux-based Detection of Non-adjacent Rotor Bar Damage in Squirrel Cage Induction Motors," *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Baltimore, MD, USA, 2019, pp. 7019-7026, doi: 10.1109/ECCE.2019.8912859.
31. S. Ozdemir, "Load-Torque Estimation Under Four-Quadrant Operation of Vector Controlled Three-Phase Induction Motor Using Stator Current and Voltages," *2020 2nd Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, Izmir, Turkey, 2020, pp. 187-191, doi: 10.1109/GPECOM49333.2020.9247921.
32. William T. Thomson, Ian Culbert, "Current Signature Analysis for Condition Monitoring of Cage Induction Motors. Industrial Applications and Case Histories.
33. G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, and H. Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines - Design, Evaluation, Aging, Testing and Repair*. IEEE Press Series on Power Engineering, 2004.
34. M. Yu, Yigang He, Hai Wang, Juan Xu, D. Wang and VietHung Nguyen, "Intelligent fault diagnosis of induction motor with stator winding fault," *2015 11th International Conference on Natural Computation (ICNC)*, Zhangjiajie, China, 2015, pp. 730-735, doi: 10.1109/ICNC.2015.7378081.
35. V. F. Pires, D. Foito, J. F. Martins and A. J. Pires, "Detection of stator winding fault in induction motors using a motor square current signature analysis (MSCSA)," *2015 IEEE*

5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Riga, Latvia, 2015, pp. 507-512, doi: 10.1109/PowerEng.2015.7266369.

36. Y. Gritli, A. O. Di Tommaso, F. Filippetti, R. Miceli, C. Rossi and A. Chatti, "Investigation of motor current signature and vibration analysis for diagnosing rotor broken bars in double cage induction motors," International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Sorrento, Italy, 2012, pp. 1360-1365, doi: 10.1109/SPEEDAM.2012.6264465.

37. S. M. A. Cruz, "An Active-Reactive Power Method for the Diagnosis of Rotor Faults in Three-Phase Induction Motors Operating Under Time-Varying Load Conditions," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 1, pp. 71-84, March 2012, doi: 10.1109/TEC.2011.2178027.

38. M. Yang, N. Chai, Z. Liu, B. Ren and D. Xu, "Motor Speed Signature Analysis for Local Bearing Fault Detection With Noise Cancellation Based on Improved Drive Algorithm," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 5, pp. 4172-4182, May 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2922919.

39. H. Akçay and E. Germen, "Identification of acoustic spectra for fault detection in induction motors," *2013 Africon*, Pointe aux Piments, Mauritius, 2013, pp. 1-5, doi: 10.1109/AFRCON.2013.6757650.

40. O. Wallscheid, "Thermal Monitoring of Electric Motors: State-of-the-Art Review and Future Challenges," in *IEEE Open Journal of Industry Applications*, vol. 2, pp. 204-223, 2021, doi: 10.1109/OJIA.2021.3091870.

41. <https://www.solutionsinit.com/store/00cd4db0481657ef0d62c28b12343487.pdf>

42. J. A. Antonino-Daviu, K. N. Gyftakis, R. Garcia-Hernandez, H. Razik and A. J. Marques Cardoso, "Comparative influence of adjacent and non-adjacent broken rotor bars on the induction motor diagnosis through MCSA and ZSC methods," *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Yokohama, Japan, 2015, pp. 001680-001685, doi: 10.1109/IECON.2015.7392343.

43. Διάλεξη 5 Μαθήματος “Ηλεκτρικές Μηχανές”, Κωνσταντίνου Γυφτάκη.

44. “Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC”, Stephen J. Chapman 5η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα.

45. “Ηλεκτρικές Μηχανές”, Παντελής Β. Μαλατέστας, 4η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα.

46. Διάλεξη “Παρακολούθηση Κατάστασης, Διάγνωση και Πρόγνωση Σφαλμάτων σε ΗΜ - Εισαγωγή” Μαθήματος “Ειδικά Κεφάλαια Ηλεκτρικών Μηχανών”, Κωνσταντίνου Γυφτάκη.

47. Διδακτορική Διατριβή, “Ηλεκτρομαγνητική ανάλυση σφαλμάτων σε επαγωγικούς κινητήρες και ανάπτυξη νέων μεθόδων διάγνωσης αυτών”, Κωνσταντίνος Γυφτάκης.